



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

TESE DE DOUTORADO

Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil

Elise Saraiva
Doutoranda

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D.
Orientador

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc.
Coorientador

Uberlândia, setembro/2011



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores
oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição
para o diagnóstico de vida útil

Tese de doutorado submetida à
Universidade Federal de Uberlândia por
Elise Saraiva como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Doutor (a) em Ciências.

Banca Examinadora:

Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D. (Orientador) – UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc. (Coorientador) – UFU

José Roberto Camacho, Ph.D. – UFU

Washington Luiz Araújo Neves, Dr.Sc. – UFCG

Hélder de Paula, Dr.Sc. – UFMG

Geraldo Caixeta Guimarães

Orientador

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Coorientador

Alexandre Cardoso

Coordenador do Curso de Pós-graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Ismael (em memória) e Antonia, à minha irmã Eliane, meu cunhado Moacir, meu sobrinho Mateus e ao meu noivo Rafael, pela compreensão e incentivo dedicados a mim para a realização do mesmo e pela compreensão nos momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a **Deus**, que através de seus exemplos e ensinamentos pude superar os momentos difíceis.

O meu muito obrigada a minha mãe **Antonia Saraiva** e ao meu noivo **Rafael Féo de Castro** que sempre me apoiaram e incentivaram a seguir em frente, apesar das barreiras encontradas. Ao meu pai **Ismael Saraiva** (*em memória*), que mesmo ausente deixou a mim conselhos que pude seguir e chegar ao final desta importante etapa de minha vida.

Um agradecimento mais que especial a minha irmã **Eliane Saraiva**, meu cunhado **Moacir Pires de Camargos Júnior** e meu sobrinho **Mateus Saraiva de Camargos**, aos filhos do meu noivo, **Rafael Féo de Castro Filho** e **Roger Bruno Moreira Féo**, por todo incentivo e compreensão nas horas de ausência, e todo apoio nos momentos de indecisão.

Ao professor **Geraldo Caixeta Guimarães** por ter me aceitado como sua aluna de doutorado no programa de pós-graduação.

Ao professor **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** meus sinceros agradecimentos pelo apoio, paciência, incentivo e colaboração durante esta intensa convivência profissional. Agradeço também, pela amizade e confiança dispensada, que, com toda certeza, estão além da conclusão do curso de doutorado.

Ao professor **Antonio Carlos Delaiba** pelos conhecimentos a mim transmitidos, juntamente com toda a paciência e apoio no desenvolvimento e compreensão sobre o assunto aqui estudado.

Ao professor **José Roberto Camacho** pelo tempo a mim dispensado, em seus ensinamentos sobre elementos finitos, além de todo o apoio para a obtenção de referências bibliográficas, indispensáveis para a conclusão do trabalho.

Aos amigos e companheiros de projeto, **Ronaldo Guimarães** e **Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior** pelas conversas e discussões sobre os assuntos relacionados à Engenharia Elétrica e ao tema dessa tese, os quais foram fundamentais para o desenvolvimento da mesma. O companheirismo destes dois amigos foi impecável e de extrema importância.

Aos amigos: **Paulo César Álvares Mota**, **Afonso Bernardinho Júnior**, **Camilla de Sousa Chaves** pelo companheirismo e importante apoio que me deram durante toda a tese.

Ao amigo **Carlos Eduardo Tavares** os meus sinceros agradecimentos pela gentileza ao ceder um microcomputador com configurações adequadas para a utilização do *software* FLUX3D.

Aos demais amigos, colegas e professores, que apesar de não terem sido citados aqui, também estão presentes nos agradecimentos que faço, por todo carinho e apoio, ao longo de minha vida e para realização desse trabalho.

À **Cinara Fagundes P. Mattos** e **Hudson Capanema Zaidan** pela presteza nos encaminhamentos junto à secretaria da pós-graduação.

Ao professor **Sandoval Carneiro Júnior**, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por disponibilizar os trabalhos de **Helvio Jailson Azevedo Martins** e **Karina Stockler Herszterg**, os quais foram fundamentais para o

entendimento e implementação do modelo de transformadores para a análise da resposta em frequência.

Ao Doutor **Laszlo Kiss** pela disponibilização do livro “*Large Power Transformers*”, também fundamental para a implementação do modelo acima mencionado.

À **Chesf**, que através do Projeto de P&D intitulado “*Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“Inrush”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”*”, contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento desta tese.

À **CAPES** pelo apoio financeiro.

RESUMO

Um estudo das alterações dos parâmetros de transformadores oriundas de deformações nos enrolamentos: uma contribuição para o diagnóstico de vida útil

Esta tese tem como objetivo estudar as alterações que possam ocorrer nos parâmetros de transformador quando algum tipo de deformação incidir em seus enrolamentos. Para a verificação de tais efeitos, optou-se por analisar possíveis variações em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos as quais podem indicar um decaimento na vida útil de tal equipamento.

Para o desenvolvimento de tal estudo optou-se por utilizar duas ferramentas computacionais para modelar o transformador: o *software* ATP (*Alternative Transient Program*) e o programa FLUX em sua versão 3D, o qual emprega o método de elementos finitos.

Deformações serão aplicadas nos modelos e análises realizadas para a verificação dos parâmetros supracitados. De posse de tais análises e de técnicas já utilizadas para a detecção de deformações mecânicas nos enrolamentos de transformadores, será apresentada uma metodologia computacional para a realização de tal diagnóstico, antes que este tipo de falha possa retirar o transformador de operação.

Palavras chave: Transformadores, metodologia computacional, método dos elementos finitos, ATP, deformações nos enrolamentos.

ABSTRACT

A study of transformer parameter changes caused by deformations in windings: a contribution to lifetime diagnosis

This thesis aims to study the changes that may occur in transformer parameters when any type of deformation is caused in its windings. To verify such effects, it will be analyzed possible variations in electrical, magnetic and mechanical parameters, which may indicate a lifetime decay of such equipment.

To conduct this work, it will be used two computational tools for transformer modeling: ATP (Alternative Transient Program) and FLUX 3D which employs the finite element method.

Some deformations are then applied in the transformer windings in order to verify the aforementioned parameters. Therefore, with such studies and techniques able to detect mechanical deformations in transformer windings, a computer methodology is developed for carrying out a diagnosis before such kind of failure removes the transformer from operation.

Keywords: Transformers, computer methodology, finite element method, ATP, winding deformations.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - MOTIVAÇÃO	2
1.3 - OBJETIVOS DA TESE.....	4
1.4 - ESTADO DA ARTE	5
1.4.1 - SÍNTESE DAS PUBLICAÇÕES	6
A) MODELAGENS DE TRANSFORMADORES	6
B) MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	7
C) AVALIAÇÃO DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES E ESTIMATIVA DAS FORÇAS E ESTRESSES ELETROMAGNÉTICOS	10
D) TÉCNICAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ENROLAMENTOS	11
1.5 - CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE.....	13
A) ANÁLISE DAS METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS.....	14
B) APRIMORAMENTO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSFORMADOR UTILIZANDO O FEM.....	14
C) VERIFICAÇÃO DAS POSSÍVEIS ALTERAÇÕES EM PARÂMETROS ELÉTRICOS, MAGNÉTICOS E MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS CAUSADOS POR DEFORMAÇÕES	15
D) APRESENTAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS MECÂNICAS NOS ENROLAMENTOS	15
E) CONTRIBUIÇÃO NAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO DE P&D ENTRE UFU, UFCG E CHESF.....	15
1.6 - ESTRUTURA DA TESE	16

CAPÍTULO II - MODELAGENS E IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DE TRANSFORMADORES

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
2.2 - CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO.....	22
2.3 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA ATP, PARA ESTUDOS NO DOMÍNIO DO TEMPO	25
2.3.1- METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO	27
A) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO INTERNO E COLUNA (LIC)	27
B) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO INTERNO E EXTERNO (LIE)	28
C) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE FASES LAT	28
D) DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS DE ENTREFERROS	28
E) DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS NÃO LINEARES.....	30
F) DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO	30
2.3.2 - AJUSTE DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.....	30
2.3.3 - PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO CALCULADOS PARA O TRANSFORMADOR DE 15 kVA	31
2.3.4 - IMPLEMENTAÇÃO NO MODELO PARA CÁLCULO DE FORÇAS RADIAIS E AXIAIS E ESTRESSES RADIAIS NOS ENROLAMENTOS	33
A) FORÇAS E ESTRESSES RADIAIS	34
B) FORÇAS E ESTRESSES AXIAIS	36
2.3.5 - IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO ATP/ATPDraw.....	37
2.4 - REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA FLUX3D PARA ESTUDOS MAGNÉTICOS	38

2.4.1 - REPRESENTAÇÃO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA.....	40
2.4.2 - REPRESENTAÇÃO DO TANQUE DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA.....	41
2.4.3 - REPRESENTAÇÃO DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA.....	41
2.4.4 - CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MALHA	45
2.4.5 - CRIAÇÃO DO CIRCUITO EXTERNO	46
2.5 - REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA FLUX3D PARA ESTUDOS ELETROSTÁTICOS	47
2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	48

CAPÍTULO III - ENSAIOS LABORATORIAIS E CÁLCULOS ANALÍTICOS

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	50
3.2 - ENSAIOS LABORATORIAIS.....	51
3.2.1 - ENSAIO EM VAZIO.....	52
3.2.2 - ENSAIO DE ENERGIZAÇÃO.....	53
3.2.3 - ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	56
3.2.4 - MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS.....	57
3.3 - CÁLCULOS ANALÍTICOS	68
3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	69

CAPÍTULO IV - VALIDAÇÃO DAS MODELAGENS DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA NO ATP E NO FLUX3D

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	71
4.2 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	72
4.3 - RESULTADOS OBTIDOS COMPUTACIONALMENTE	75
A) SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO A VAZIO.....	75
A.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	76
A.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	76
B) SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL.....	76
B.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	77
B.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	77
C) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	77
C.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	78
C.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	78
D) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”	78
D.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	79
D.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	80
D.3) GRANDEZAS MECÂNICAS	81
E) SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (<i>INRUSH</i>)	84
E.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	84
E.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	84
E.3) GRANDEZAS MECÂNICAS	85
F) MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS	87
4.4 - VALIDAÇÃO DOS MODELOS	88
A) OPERAÇÃO A VAZIO	89

B) OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL	89
C) CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	89
D) CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”	90
E) ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (<i>INRUSH</i>).....	94
F) CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS	95
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	95

CAPÍTULO V - ESTUDOS COMPUTACIONAIS IMPONDO DEFORMAÇÃO TÍPICA AOS ENROLAMENTOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	99
5.2 - FALHAS ELETROMECÂNICAS EM TRANSFORMADORES.....	100
5.3 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO INTERNO - FLUX3D	102
5.3.1 - CASO 1.....	102
5.3.2 - CASO 2.....	103
5.4 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO INTERNO - ATP	104
5.5 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS	106
A - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO A VAZIO	107
A.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	107
A.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	108
B - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL	108
B.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	108
B.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	109
C) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	110
C.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	110
C.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	111
D) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”	112
D.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS	112
D.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	112
D.3) GRANDEZAS MECÂNICAS	113
E) SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (<i>INRUSH</i>)	117
E.1) ESTUDOS DAS FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA CÁLCULOS DE FORÇAS RADIAIS E AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DURANTE A ENERGIZAÇÃO	118
E.1.1) ESTUDOS REALIZADOS NO FLUX3D	119
A) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO EXTERNO	119
B) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO INTERNO.....	122
E.1.2) ESTUDOS REALIZADOS NO ATP EMPREGANDO FORMULAÇÕES ANALÍTICAS CONVENCIONAIS	123
A) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO EXTERNO	124
B) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO INTERNO.....	125
E.1.3) COMPARATIVO ENTRE OS ESTUDOS APRESENTADOS.....	125
E.1.4) ESTUDOS REALIZADOS NO ATP EMPREGANDO FORMULAÇÕES ANALÍTICAS MODIFICADAS	127
E.2) GRANDEZAS ELÉTRICAS	130
E.3) GRANDEZAS MAGNÉTICAS	131
E.4) GRANDEZAS MECÂNICAS	131
F) DETERMINAÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS.....	132

5.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	133
----------------------------------	-----

CAPÍTULO VI - METODOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	141
6.2 – AVALIAÇÃO ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DA CONDIÇÃO MECÂNICA DOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES.....	142
6.3 – PRINCIPAIS TÉCNICAS LABORATORIAIS PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO MECÂNICA DOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES.....	143
6.3.1 – MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA DO ENROLAMENTO E ANÁLISES DO FATOR DE DISSIPACÃO (FD) E FATOR DE POTÊNCIA (FP) DE ISOLAMENTO	143
6.3.2 – MEDIÇÃO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO	145
6.3.3 – MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO	146
6.3.4 – MÉTODO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DAS PERDAS ADICIONAIS (FRSL).....	149
6.3.5 – ANÁLISE POR IMPULSO EM BAIXA TENSÃO (LVI)	153
6.3.6 – ANÁLISE POR RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRA).....	154
A) MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	155
B) TIPOS DE TESTE DO FRA.....	158
B.1) TESTE “END-TO-END OPEN”	158
B.2) TESTE “END-TO-END SHORT-CIRCUIT”	159
B.3) TESTE “CAPACITIVE INTER-WINDING”	161
B.5) TESTE “INDUCTIVE INTER-WINDING”	162
C) INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO FRA	163
D) EXEMPLOS DE MEDIÇÕES E INTERPRETAÇÃO DO FRA.....	164
E) MODELAGEM DO TRANSFORMADOR PARA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA NO ATP	166
6.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	175

CAPÍTULO VII - CONSIDERAÇÕES GERAIS

7.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	179
7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	187
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189
ANEXO I.....	195
ANEXO II	201

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: PERCENTAGEM DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE USINA EM RELAÇÃO AO COMPONENTE AFETADO E À ORIGEM DO DEFEITO.	3
FIGURA 1.2: PERCENTAGEM DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE SUBESTAÇÃO EM RELAÇÃO AO COMPONENTE AFETADO E À ORIGEM DO DEFEITO.	3
FIGURA 2.1: VISTA SUPERIOR DO TRANSFORMADOR UTILIZADO (DIMENSÕES EM MILÍMETROS).	23
FIGURA 2.2: VISTAS DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO (DIMENSÕES EM MILÍMETROS).....	23
FIGURA 2.3: VISTA FRONTAL DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR (DIMENSÕES EM MILÍMETROS), CONSIDERANDO OS ENROLAMENTOS.	24
FIGURA 2.4: CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO DA CHAPA DE AÇO SILÍCIO DE GRAU ORIENTADO UTILIZADA NO TRANSFORMADOR (FORNECIDO PELA ACESITA) - CAMPO [Oe] x INDUÇÃO [kG].	24
FIGURA 2.5: CIRCUITO MAGNÉTICO EQUIVALENTE DA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO NO TRANSFORMADOR.....	25
FIGURA 2.7: DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR.	34
FIGURA 2.8: SEÇÃO TRANSVERSAL DE UM TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS CONCÊNTRICOS MOSTRANDO AS FORÇAS RADIAIS (F_r) E A DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO AXIAL (B_A).	34
FIGURA 2.9: MÉTODO PARA CÁLCULO DE ESTRESSE DE TRAÇÃO MÉDIO.	35
FIGURA 2.10: ÍCONE CRIADO PARA REPRESENTAR O TRANSFORMADOR NO ATPDRAW.	38
FIGURA 2.11: DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES E ISOLANTE NO ENROLAMENTO.....	43
FIGURA 2.12: REPRESENTAÇÃO DOS ENROLAMENTOS, NÚCLEO E TANQUE DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA.	44
FIGURA 2.13: DETALHE DA REPRESENTAÇÃO DO TRANSFORMADOR NO FLUX3D.	45
FIGURA 2.14: MALHA CRIADA PELO FLUX3D.	46
FIGURA 3.1: ARRANJO LABORATORIAL UTILIZADO PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES.	51
FIGURA 3.2: CORRENTES NAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR SOB ENSAIO A VAZIO COM NEUTRO ATERRADO. .	52
FIGURA 3.3: TENSÕES ANTES E DEPOIS DO CHAVEAMENTO NAS FASES A, B E C.	54
FIGURA 3.4: CORRENTES NAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR, SOB ENSAIO DE ENERGIZAÇÃO.	55
FIGURA 3.5: CAPACITÂNCIAS EXISTENTES NO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.	58
FIGURA 3.6: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR.	59
FIGURA 3.7: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A PRIMEIRA SITUAÇÃO.	60
FIGURA 3.8: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A SEGUNDA SITUAÇÃO.	61
FIGURA 3.9: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A TERCEIRA SITUAÇÃO.	62
FIGURA 3.10: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A PRIMEIRA MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE ACOPLAMENTO.	64
FIGURA 3.11: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A SEGUNDA MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE ACOPLAMENTO.	65
FIGURA 3.12: ARRANJO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS NO TRANSFORMADOR PARA A TERCEIRA MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS DE ACOPLAMENTO.	66
FIGURA 4.1: CIRCUITOS UTILIZADOS DURANTE AS SIMULAÇÕES.....	74
FIGURA 4.2: CORRENTES NAS TRÊS FASES DOS ENROLAMENTOS EXTERNOS E INTERNOS DURANTE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	79
FIGURA 4.3: FORÇAS RADIAIS TOTAIS NOS ENROLAMENTOS INTERNOS, SOB CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	82
FIGURA 4.4: FORMAS DE ONDA DAS FORÇAS RADIAIS TOTAIS NOS ENROLAMENTOS INTERNOS, PARA A SIMULAÇÃO DE ENERGIZAÇÃO.....	86

FIGURA 4.5: COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS FORÇAS RADIAIS [N], NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.....	91
FIGURA 4.6: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO NOS ENROLAMENTOS E ENTRE ELES, NA FASE B, DURANTE O PICO DA CORRENTE.	92
FIGURA 4.7: COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS FORÇAS AXIAIS COMPRESSIVAS TOTAIS [N], NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.	93
FIGURA 4.8: COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS FORÇAS AXIAIS COMPRESSIVAS [N] NOS ENROLAMENTOS INTERNOS, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.	93
FIGURA 4.9: COMPARAÇÃO DOS VALORES DAS FORÇAS AXIAIS COMPRESSIVAS [N] NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.....	93
FIGURA 5.1: CURVATURA “LIVRE” NO ENROLAMENTO INTERNO: “FREEBUCKLING”.....	101
FIGURA 5.2: DEFEITO EM ENROLAMENTOS DEVIDO À UMA ALTA COMPRESSÃO RADIAL CAUSANDO UMA SALIÊNCIA NOS MESMOS – “FREEBUCKLING”.....	101
FIGURA 5.3: DEFEITO APLICADO AO ENROLAMENTO INTERNO DA FASE B - VISTA INFERIOR (CASO 1).	103
FIGURA 5.4: DEFEITO APLICADO AO ENROLAMENTO INTERNO DA FASE B - VISTA INFERIOR (CASO 2).	103
(A) ENROLAMENTO INTERNO	115
(B) ENROLAMENTO EXTERNO	115
FIGURA 5.5: VARIAÇÕES PERCENTUAIS DAS FORÇAS RADIAIS.	115
FIGURA 5.6: VARIAÇÕES PERCENTUAIS DAS FORÇAS AXIAIS.....	116
FIGURA 5.7: CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS.....	120
FIGURA 5.8: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO NO INSTANTE DE CORRENTE MÁXIMA NA FASE B.....	121
FIGURA 5.9: CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO NOS ENROLAMENTOS INTERNOS.....	122
FIGURA 5.10: DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO NO INSTANTE DE CORRENTE MÁXIMA NA FASE B.....	123
FIGURA 5.11: CORRENTES DE ENERGIZAÇÃO NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS.....	124
FIGURA 6.1: GRÁFICO DO RESULTADO DA MEDIDA DE RESISTÊNCIA VARIANDO A FREQUÊNCIA.	151
FIGURA 6.2: RESULTADOS DE MEDIDAS DE RESISTÊNCIA VARIANDO A FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES.....	152
FIGURA 6.3: DEFEITO NA FASE C DIAGNOSTICADO PELO MÉTODO FRSL.	152
FIGURA 6.4: A) MUDANÇA NOS OSCIOGRAMAS ATRAVÉS DE MEDIÇÃO LVI APÓS TRANSFORMADOR SER SUBMETIDO AO TESTE DE CURTO-CIRCUITO; B) ÁREA DE DEFORMAÇÃO DIAGNOSTICADA.	154
FIGURA 6.5: REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO CIRCUITO RLC INTERNO AO TRANSFORMADO, O QUAL FORNECE UMA IMPRESSÃO DIGITAL PARA COMPARAÇÕES FUTURAS.....	157
FIGURA 6.6: CIRCUITO EQUIVALENTE BÁSICO PARA TESTE.	157
FIGURA 6.7: CONFIGURAÇÃO DO TESTE “END-TO-END OPEN” PARA UM TRANSFORMADOR ESTRELA-DELTA.	159
FIGURA 6.8: EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DO TESTE “END-TO-END OPEN” (TRANSFORMADOR 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).	159
FIGURA 6.9: CONFIGURAÇÃO DO TESTE “END-TO-END SHORT-CIRCUIT” PARA UM TRANSFORMADOR ESTRELA - DELTA.	160
FIGURA 6.10: COMPARAÇÃO DO TESTE “END-TO-END OPEN” E “END-TO-END SHORT-CIRCUIT” NO ENROLAMENTO AT DO TRANSFORMADOR 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV.	160
FIGURA 6.11: CONFIGURAÇÃO DO TESTE “CAPACITIVE INTER-WINDING” PARA UM TRANSFORMADOR ESTRELA-DELTA.	161
FIGURA 6.12: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DO TESTE “CAPACITIVE INTER-WINDING” APLICADO ENTRE OS ENROLAMENTOS AT E BT (TRANSFORMADOR 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).	162
FIGURA 6.13: CONFIGURAÇÃO DO TESTE “INDUCTIVE INTER-WINDING” PARA UM TRANSFORMADOR ESTRELA-DELTA.	162

FIGURA 6.14: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DO TESTE “INDUCTIVE INTER-WINDING” APLICADO ENTRE OS ENROLAMENTOS AT E BT (TRANSFORMADOR 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).	163
FIGURA 6.15: FAIXA TÍPICA DE FREQUÊNCIA PARA INTERPRETAÇÃO DO FRA.	164
FIGURA 6.16: RESPOSTAS FRA MOSTRANDO UMA FALHA DE “HOOP BUCKLING” DO ENROLAMENTO INTERNO BT DA FASE B.	165
FIGURA 6.17: EFEITO “BUCKLING” DIAGNOSTICADO NO ENROLAMENTO INTERNO BT.	165
FIGURA 6.18: MODELO DE ENROLAMENTO PARA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA COM PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS.	167
FIGURA 6.19: REPRESENTAÇÃO DA FASE B NO ATPDRAW PARA ESTUDOS DO FRA.	169
FIGURA 6.20: RESULTADOS DO FRA PARA OS TRÊS CASOS DE DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO	172
FIGURA 6.21: RESULTADOS DO FRA PARA OS TRÊS CASOS DE DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO – PRIMEIRO E SEGUNDO PICOS DE RESSONÂNCIA	173
FIGURA 6.22: RESULTADOS DO FRA PARA OS TRÊS CASOS DE DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO – TERCEIRO, QUARTO E QUINTO PICOS DE RESSONÂNCIA.....	174
FIGURA 6.23: RESULTADOS DO FRA PARA OS TRÊS CASOS DE DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO – ÚLTIMOS PICOS DE RESSONÂNCIA	174

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR.....	22
TABELA 2.2: PARÂMETROS DO MODELO DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA (REFERIDOS À TENSÃO DE 100 V).	31
TABELA 2.3: CORRENTE E FLUXO MAGNÉTICO PARA REPRESENTAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS NÃO LINEARES.	32
TABELA 2.4: CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DIELÉTRICOS.	48
TABELA 3.1: VALORES (PICO E EFICAZ) DAS CORRENTES NAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR, E PERDA TOTAL, SOB ENSAIO A VAZIO COM NEUTRO ATERRADO.	53
TABELA 3.2: ÂNGULOS DE FASE DE TENSÃO OBTIDOS NA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.	55
TABELA 3.3: VALOR DO PRIMEIRO PICO NAS CORRENTES DAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR, SOB ENSAIO DE ENERGIZAÇÃO.	56
TABELA 3.4: VALORES EFICAZES DE TENSÃO E CORRENTE, NAS TRÊS FASES DO TRANSFORMADOR, SOB ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO.	57
TABELA 3.5: PARÂMETROS OBTIDOS ATRAVÉS DE MEDIÇÕES	63
TABELA 3.6: PARÂMETROS CALCULADOS ATRAVÉS DA METODOLOGIA ANALÍTICA.....	63
TABELA 3.7: PARÂMETROS OBTIDOS ATRAVÉS DE MEDIÇÕES	67
TABELA 3.8: PARÂMETROS CALCULADOS ATRAVÉS DA METODOLOGIA ANALÍTICA.....	67
TABELA 3.9: CORRENTE E DENSIDADES DE FLUXO NOMINAIS.	68
TABELA 3.10: CORRENTE E DENSIDADE DE FLUXO DURANTE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.	68
TABELA 3.11: RESULTADOS OBTIDOS PARA FORÇA RADIAL – TRANSFORMADOR 15 kVA.....	69
TABELA 3.12: ESTRESSES CAUSADOS PELA FORÇA RADIAL – TRANSFORMADOR 15 kVA.	69
TABELA 3.13: RESULTADOS OBTIDOS PARA FORÇA AXIAL – TRANSFORMADOR 15 kVA.....	69
TABELA 4.1: DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS.....	72
TABELA 4.2: DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS ANALISADOS NOS CASOS SIMULADOS	73
TABELA 4.3: SÍNTESE DE ALGUNS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO ENSAIO A VAZIO.	76
TABELA 4.4: SÍNTESE DOS VALORES DE DENSIDADES DE FLUXOS MAGNÉTICOS NO NÚCLEO PARA O ENSAIO A VAZIO.....	76
TABELA 4.5: VALORES DE CORRENTES (PICO E EFICAZ) PARA OS ENROLAMENTOS EXTERNOS E INTERNOS, E POTÊNCIA CONSUMIDA PARA SIMULAÇÃO NA CONDIÇÃO NOMINAL.	77
TABELA 4.6: DENSIDADE DE FLUXO PARA COLUNAS, CULATRAS E DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO NOMINAL.	77
TABELA 4.7: VALORES DE CORRENTE EFICAZ E TENSÃO APLICADA AOS ENROLAMENTOS EXTERNOS, E PERDA NO TRANSFORMADOR, PARA A SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	78
TABELA 4.8: DENSIDADE DE FLUXO PARA COLUNAS, CULATRAS E DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.	78
TABELA 4.9: SÍNTESE DOS VALORES DO PRIMEIRO PICO PARA AS CORRENTES DO ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO "PASSANTE"	80
TABELA 4.10: DENSIDADES DE FLUXOS PARA COLUNAS E CULATRAS, DO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE"	80
TABELA 4.11: DENSIDADES DE FLUXOS DE DISPERSÃO, DO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE"	80
TABELA 4.12: MÓDULO DAS FORÇAS E ESTRESSES PARA A CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE"	83
TABELA 4.13: SÍNTESE DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	84
TABELA 4.14: DENSIDADES DE FLUXOS PARA COLUNAS E CULATRAS, DO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO.	85
TABELA 4.15: MÓDULOS DAS FORÇAS E ESTRESSES PARA A CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO.	87

TABELA 4.16: CAPACITÂNCIAS OBTIDAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO NO FLUX3D.....	88
TABELA 5.1: NOVOS PARÂMETROS DE INDUTÂNCIAS E RESISTÊNCIA PARA UTILIZAÇÃO NO MODELO DO ATP.	105
TABELA 5.2: SÍNTESE DE RESULTADOS DA OPERAÇÃO A VAZIO.	107
TABELA 5.3: SÍNTESE DOS VALORES DE DENSIDADES DE FLUXOS MAGNÉTICOS NO NÚCLEO PARA AS SIMULAÇÕES A VAZIO.....	108
TABELA 5.4: VALORES DE CORRENTES (PICO E EFICAZ) PARA OS ENROLAMENTOS EXTERNOS E INTERNOS, E POTÊNCIA CONSUMIDA PARA AS SIMULAÇÕES NA CONDIÇÃO NOMINAL.....	109
TABELA 5.5: DENSIDADE DE FLUXO PARA COLUNAS, CULATRAS E DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO NOMINAL.	109
TABELA 5.6: VALORES DE CORRENTE EFICAZ E TENSÃO APLICADA AOS ENROLAMENTOS EXTERNOS, E PERDA NO TRANSFORMADOR, PARA A SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.....	110
TABELA 5.7: DENSIDADE DE FLUXO PARA COLUNAS, CULATRAS E DISPERSÃO NO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA.	111
TABELA 5.8: SÍNTESE DOS VALORES DO PRIMEIRO PICO PARA AS CORRENTES NAS SIMULAÇÕES EM CURTO-CIRCUITO "PASSANTE".	112
TABELA 5.9: DENSIDADES DE FLUXOS PARA COLUNAS E CULATRAS, DO TRANSFORMADOR, NAS SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	113
TABELA 5.10: DENSIDADES DE FLUXOS DE DISPERSÃO, DO TRANSFORMADOR, NAS SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	113
TABELA 5.11: MÓDULO DAS FORÇAS E ESTRESSES PARA AS SIMULAÇÕES NO FLUX3D DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	114
TABELA 5.12: MÓDULO DAS FORÇAS E ESTRESSES PARA AS SIMULAÇÕES NO ATP DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO "PASSANTE".....	114
TABELA 5.13: COMPARATIVO ENTRE FLUX3D E ATP COM FORMULAÇÕES ANALÍTICAS ORIGINAIS (ATP1).....	126
TABELA 5.13: COMPARATIVO ENTRE FLUX3D E ATP COM FORMULAÇÕES ANALÍTICAS COM E SEM MODIFICAÇÕES.....	129
TABELA 5.14: COMPARATIVO ENTRE FLUX3D E ATP COM FORMULAÇÕES ANALÍTICAS COM E SEM MODIFICAÇÕES.....	130
TABELA 5.15: SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR.	130
TABELA 5.16: DENSIDADES DE FLUXOS PARA COLUNA E DISPERSÃO NA FASE B, DO TRANSFORMADOR, NA CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO.	131
TABELA 5.17: MÓDULOS DAS FORÇAS E ESTRESSES PARA A CONDIÇÃO DE ENERGIZAÇÃO.	132
TABELA 5.18: CAPACITÂNCIAS OBTIDAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES NO FLUX3D	133
TABELA 6.1: CATEGORIAS PARA TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA, DISTRIBUIÇÃO E REGULAÇÃO IMERSOS EM LÍQUIDO.	148
TABELA 6.2: VARIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO PERMITIDA PARA CATEGORIA I.	148
TABELA 6.3: VARIAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DO ENROLAMENTO EM FUNÇÃO DA FALTA.....	169
TABELA 6.4: VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DO FRA.	171
TABELA 6.5: COMPARAÇÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO DE DEFORMAÇÃO NOS ENROLAMENTOS.	176

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

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

As falhas que acometem os transformadores são bem conhecidas e amplamente divulgadas, e podem ser decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação como operativas. De um modo geral, no entanto, estas podem ser classificadas como sendo de origens elétricas, mecânicas, térmicas e químicas [1].

Em geral, os fabricantes de tais equipamentos vem se aprimorando cada vez mais nas técnicas de fabricação dos mesmos para que se tornem mais resistentes e confiáveis. Na prática, um transformador tem uma vida útil em torno de 20 a 35 anos, podendo chegar a 60 anos quando há uma boa manutenção [1].

Obviamente, quando o equipamento é fabricado, este apresenta uma boa suportabilidade térmica, dielétrica, química e mecânica. Mas com o passar do

tempo, há o enfraquecimento do isolamento dos seus condutores/bobinas causado pelos fenômenos eletroquímicos do líquido de resfriamento (óleo), pelas vibrações produzidas pelas forças eletromecânicas durante a sua operação normal, ou seja, em regime permanente, e também pelas deformações dos enrolamentos causadas pelas altas correntes de curto-circuito e energização.

Espera-se que um transformador experimente e suporte um determinado número de curtos-circuitos durante seu tempo de vida útil. Porém, mais cedo ou mais tarde, um novo evento causará algum leve movimento no enrolamento, e a capacidade do transformador de suportar novos esforços eletromecânicos será então reduzida. Neste sentido, torna-se importante a verificação periódica das suas condições mecânicas, principalmente nas unidades com muito tempo de operação (unidades mais antigas), de forma a se obter subsídios para impedir falhas catastróficas. Técnicas especiais são requeridas para o monitoramento e avaliação das condições mecânicas do enrolamento de um transformador. Apesar de este assunto ser uma preocupação constante dos projetistas e fabricantes de transformadores, bem como dos profissionais de manutenção e operação das empresas de energia elétrica, há certa carência de metodologias e ferramentas robustas para se avaliar os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes das elevadas correntes transitórias sobre estes dispositivos [2].

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

1.2 - MOTIVAÇÃO

Falhas em transformadores são decorrentes de diferentes causas e condições tanto de instalação como operativas. De modo geral, no entanto, estas

podem ser classificadas como sendo de origens elétricas (suportabilidades térmica e dielétrica), químicas e mecânicas (suportabilidade mecânica)[3].

A pesquisa [4] apresenta as percentagens de falhas que ocorrem nos transformadores de usina e de subestação, destacando-se os principais componentes afetados, bem como a origem do defeito, como pode ser visualizado nas Figuras 1.1 e 1.2.

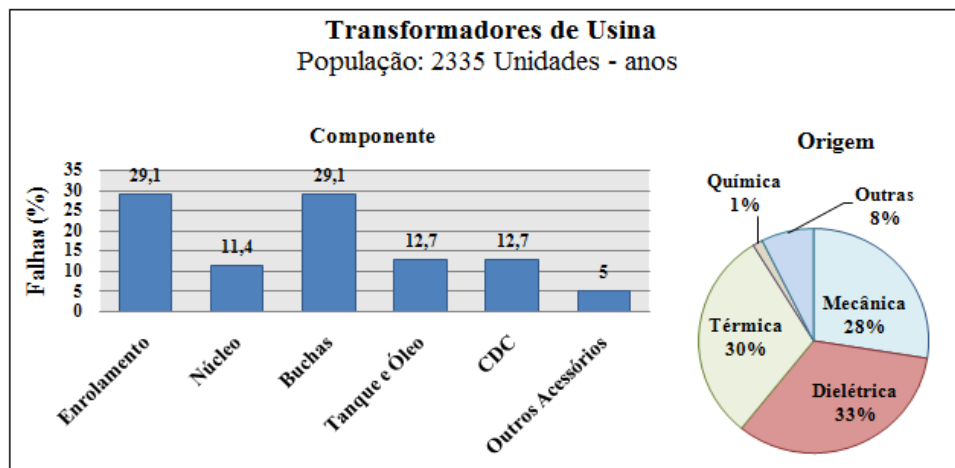


Figura 1.1: Percentagem de falhas em transformadores de usina em relação ao componente afetado e à origem do defeito.

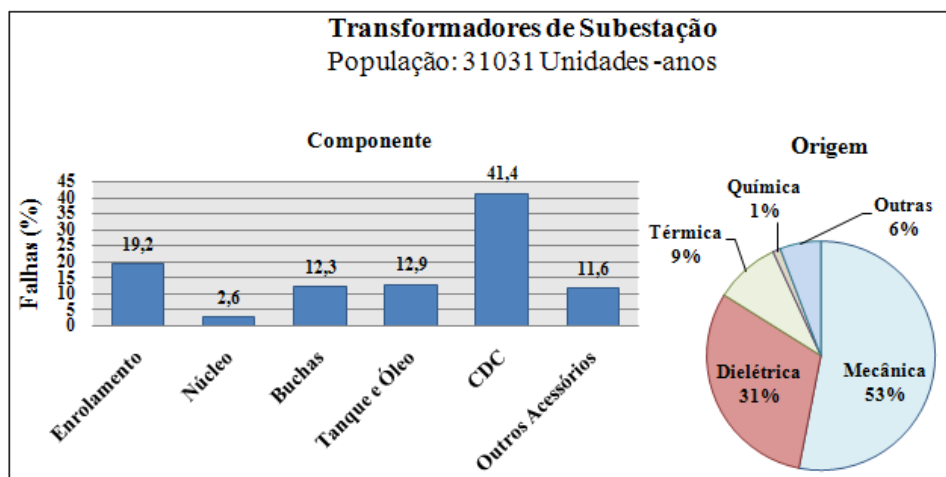


Figura 1.2: Percentagem de falhas em transformadores de subestação em relação ao componente afetado e à origem do defeito.

*CDC= comutador de derivações com carga

Analisando tais figuras, nota-se que as falhas nos enrolamentos foram bem significativas. Além disso, uma grande percentagem dos defeitos foi de origem mecânica e dielétrica. Quanto às falhas dielétricas, considera-se que

algumas delas iniciam-se com os movimentos mecânicos dos enrolamentos, os quais poderiam ser evitados por meio do monitoramento das condições mecânicas dos enrolamentos e do núcleo [5].

A deformação das bobinas também pode provocar a diminuição ou aumento do diâmetro das mesmas, prejudicando os canais de circulação do óleo e provocando aquecimento localizado na isolação, acarretando aceleração do envelhecimento do papel isolante e ainda produzindo um aumento na reatância de dispersão. Podendo, como efeito destes eventos, levar à ruptura dos elementos dielétricos.

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

1.3 - OBJETIVOS DA TESE

Com base nas informações preliminares apresentadas anteriormente, esta tese tem como objetivo estudar os efeitos que possam ocorrer no transformador quando algum tipo de deformação incidir em seus enrolamentos. Para a verificação de tais efeitos, optou-se por analisar possíveis variações em seus parâmetros elétricos, magnéticos e eletromecânicos, ou seja, prováveis alterações nas correntes e tensões, indutâncias de dispersão, forças radiais, estresses radiais, forças axiais e capacitâncias intrínsecas, bem como qualquer outro parâmetro que se julgar importante. Tais variações poderiam inclusive indicar um decaimento na vida útil de tal equipamento.

Tendo em vista tal objetivo e sabendo-se que, em se tratando de transformadores trifásicos, os esforços para se desenvolver modelos

computacionais robustos são ainda maiores. Observada a complexidade de tal equipamento em termos magnéticos e elétricos, optou-se por utilizar duas ferramentas computacionais para assessorar o desenvolvimento deste trabalho, a saber: o *software* ATP (*Alternative Transient Program*) [46] e o programa FLUX em sua versão 3D [16].

O ATP é utilizado por se tratar de um programa considerado referência pela comunidade mundial de engenharia elétrica e fornecer resultados confiáveis, além de empregar a resolução no domínio do tempo, bem como no domínio da frequência, e com tempo de processamento pequeno. Já FLUX3D emprega a análise dos elementos finitos e vem sendo cada vez mais utilizado por sua precisão, o que na tese em questão é de extrema importância. O programa computacional escolhido, apesar de possuir certa complexidade, proporciona análises refinadas sobre estresses eletromecânicos, bem como possíveis variações em parâmetros elétricos ou magnéticos quando se considerar o enrolamento com certa deformação.

1.4 - ESTADO DA ARTE

A incontestável importância dos transformadores para o sistema elétrico de potência, aliada à vasta quantidade de bibliografia e estudos encontrados na literatura sobre o equipamento em questão, ainda existe certa carência de publicações sobre os efeitos dos esforços mecânicos decorrentes de elevadas correntes transitórias sobre estes dispositivos. Entretanto, mesmo reconhecendo esta escassez, as investigações bibliográficas conduzidas e reportadas nesta tese procuraram obter, dentro do cenário nacional e internacional, uma seleção das publicações mais relevantes sobre o tema.

Para uma melhor compreensão, as referências foram agrupadas com a seguinte estruturação: modelagens de transformadores, método de elementos finitos, avaliação das falhas em transformadores e estimativa das forças e

estresses eletromagnéticos, e técnicas para diagnóstico de falhas em enrolamentos.

Publicações de difusão mundial, tal como os periódicos do IEEE, CIGRÉ e outros eventos internacionais, foram pesquisados, de forma a contribuir com uma consolidação do presente trabalho. É conveniente ressaltar também que o processo da divulgação e acesso ao conhecimento constitui-se numa ação contínua e dinâmica, o que pode resultar na omissão de um ou outro documento de caráter relevante no corpo da presente pesquisa.

Destaca-se que a investigação bibliográfica realizada, a qual expressa o estado da arte sobre o assunto em pauta, constou de:

- 06 normas, recomendações e manuais;
- 05 livros;
- 13 dissertações de mestrado e teses de doutorado;
- 24 artigos técnicos.

1.4.1 - SÍNTESE DAS PUBLICAÇÕES

Na sequência são sumarizados e apresentados os documentos, publicações científicas e livros considerados relevantes para fins do trabalho.

A) MODELAGENS DE TRANSFORMADORES

Dentre as várias referências existentes sobre o assunto “Modelagens de transformadores”, cada uma delas trata de modelos específicos que dependem do tipo de estudo que se deseja realizar. Para a tese em questão, o modelo necessita responder bem aos transitórios eletromagnéticos, uma vez que o foco principal deste trabalho é o estudo dos esforços eletromecânicos nos enrolamento dos transformadores quando submetidos às elevadas correntes de curto-circuito e energização.

Em meio às técnicas utilizadas para a devida representação deste dispositivo perante tais distúrbios, destacam-se aqueles que se baseiam em [6]: indutâncias próprias e mútuas, indutâncias de dispersão, medições, o princípio da dualidade e campos eletromagnéticos (empregando o método elementos finitos). As duas últimas técnicas supracitadas serão utilizadas para o desenvolvimento desta tese.

A modelagem que emprega o princípio da dualidade [7-13] tem como ponto de partida a distribuição de fluxo magnético no transformador, que por sua vez dá origem ao circuito magnético representativo do equipamento. Neste tipo de modelo, cada enrolamento é considerado como uma fonte de força magnetomotriz, e cada caminho de fluxo é representado por uma relutância, que é linear para quando este percorrer o ar, e não linear para o material ferromagnético empregado no núcleo do transformador. Com a aplicação do princípio da dualidade, chega-se a um circuito elétrico dual onde cada relutância acima mencionada é representada por uma indutância. Esta técnica é recomendada pelo fato de considerar o acoplamento magnético entre fases, o qual acaba sendo negligenciado em determinadas modelagens. Esta técnica será utilizada para a modelagem do transformador no *software* ATP.

Não foi encontrada nenhuma referência que empregasse o princípio da dualidade, utilizando o programa ATP e calculando simultaneamente as forças e estresses radiais e axiais nos enrolamentos quando percorridos pelas correntes de curto-circuito trifásico “passante” e energização.

A outra metodologia que será utilizada neste trabalho emprega a técnica dos elementos finitos e é apresentada no item seguinte.

B) MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos soluciona um problema através de uma discretização ou decomposição do domínio sob estudo em pequenos subdomínios chamados de “*elementos finitos*”, que são conectados entre si por meio

de pontos discretos, denominados “nós”. O conjunto de elementos utilizados na discretização é denominado *malha*. Uma vez que a *malha* e seus respectivos *nós* são obtidos, o modelo matemático é então representado por um número finito de equações diferenciais ordinárias ou de equações algébricas, cuja resolução numérica conduz aos valores das incógnitas nodais. Determinadas estas incógnitas, os valores das variáveis de campo no interior dos elementos podem ser avaliados empregando-se funções de interpolação [14, 15].

Dentre os diversos *softwares* que empregam o método de elementos finitos em seus cálculos, aquele escolhido para auxiliar o desenvolvimento desta tese é o FLUX, o qual é utilizado para simulações dos tipos eletrostática, eletrodinâmica, magnética ou térmica, tanto em duas (2D) quanto em três (3D) dimensões. Os módulos básicos incluem o pré-processamento (modelagem, definição das propriedades físicas e confecção das malhas), processamento (resolução de problemas) e pós-processamento (análise dos resultados). Este programa é adequado para a concepção, otimização e análise de quaisquer dispositivos eletromagnéticos, tais como, motores elétricos e geradores, atuadores lineares, transformadores, sensores, cabos, compatibilidade eletromagnética, etc. [16].

Dentre as muitas referências que empregam as potencialidades do método acima descrito nesta etapa do trabalho, destacam-se aquelas que foram amplamente utilizadas para o balizamento dos estudos a serem realizados.

As referências [17, 18] representam um papel fundamental no trabalho desenvolvido. Na primeira, há uma investigação das forças eletromagnéticas e o estresse mecânico resultantes de correntes de curto-circuito “passantes” e correntes de energização que se estabelecem no interior de transformadores. A segunda apresenta uma melhoria da primeira, realizando algumas modificações no modelo do transformador, em especial nos enrolamentos. Ambas utilizam o *software* FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) em seus estudos, onde o transformador é modelado em 2D.

Além de tais trabalhos, a presente tese utilizou discussões e conclusões retiradas das referências [19, 20, 21], que também empregam o método de elementos finitos, para o enriquecimento e verificações de possíveis resultados obtidos com os estudos aqui desenvolvidos.

A referência [19] apresenta formulações para cálculos das forças eletromagnéticas axiais e radiais, a partir da expressão da densidade de força e baseadas em expressões aproximadas de correntes transitórias que se manifestam durante curtos-circuitos trifásicos. Os resultados das simulações são comparados com fórmulas convencionais utilizadas em cálculos de projetos de transformadores, referentes aos curtos-circuitos trifásicos. As análises realizadas permitiram concluir que as fórmulas convencionais utilizadas para se efetuar cálculos de forças radiais, na fase de projeto, podem necessitar de ajustes para os enrolamentos localizados dentro das janelas, devido à influência do núcleo de ferro. É recomendado, no artigo, que a força axial seja determinada utilizando métodos numéricos.

O trabalho [20] faz uso do FEM para efetuar o cálculo das forças eletromagnéticas. Para tanto, utiliza como dado de entrada, o valor do primeiro pico da corrente de curto-circuito trifásico que circula nos enrolamentos. Os resultados dos testes computacionais mostraram que as componentes axiais das forças são mais intensas nas extremidades dos enrolamentos, sendo que o deslocamento se dá na direção axial. Por outro lado, as componentes radiais produzem estresses de tração no enrolamento externo e estresses de compressão no enrolamento interno.

A publicação [21] utiliza também o método supracitado para modelar um transformador monofásico do tipo núcleo envolvente, em duas e três dimensões. As análises foram efetuadas levando-se em consideração a influência da curvatura dos enrolamentos, o desalinhamento axial e a localização das derivações, para verificar o efeito das forças nessas situações. A influência exercida pelos efeitos *skin* e de proximidade na distribuição das forças também

foram consideradas. A confrontação dos resultados obtidos para os modelos 2D e 3D mostraram que existe uma boa correlação para regiões que podem ser modeladas em 2D. Contudo, o modelo 3D permite que se examine assimetrias e se calcule forças na região dos enrolamentos localizada fora da janela do núcleo. Não foi verificada uma grande influência produzida pelos efeitos *skin* e de proximidade no estresse eletromecânico.

C) AVALIAÇÃO DAS FALHAS EM TRANSFORMADORES E ESTIMATIVA DAS FORÇAS E ESTRESSES ELETROMAGNÉTICOS

Para os estudos referentes às avaliações de falhas em transformadores e a estimativa de forças e estresses eletromagnéticos, além das já mencionadas referências [17-21], que além de empregar o método de elementos finitos, também apresentam estudos sobre tais assuntos, esta tese também se baseou nas considerações apresentadas nas obras [2, 22] que representaram um dos principais pilares para o desenvolvimento deste trabalho.

Em [22], o autor aborda temas referentes aos curtos-circuitos e seus efeitos nos enrolamentos dos transformadores. Expressões para cálculo das forças eletromagnéticas axiais e radiais decorrentes das elevadas correntes em transformadores com enrolamentos concêntricos são apresentadas, juntamente aos efeitos dinâmicos associados, além das características mecânicas do material utilizado na construção dos transformadores. Também são apresentados alguns métodos para medição dessas forças eletromagnéticas, como o método do *strainingauge*.

Já a referência [2] avalia o desempenho de transformadores submetidos a curtos-circuitos tendo como base: as condições de serviço de tais equipamentos, pertencentes às concessionárias que participaram da pesquisa; os métodos analíticos utilizados pelas concessionárias para calcular as forças eletromagnéticas e o estresse eletromecânico nos enrolamentos e ainda os

procedimentos que devem ser adotados para avaliar a suportabilidade dos grandes transformadores de potência às forças eletromagnéticas.

Outros trabalhos que ajudaram no balizamento da presente tese tiveram sua contribuição em linhas de pesquisas diferentes, quais sejam: pelos estudos das forças e estresses mecânicos propriamente ditos [23, 24, 25], pelo comportamento dinâmico dos enrolamentos de grandes transformadores submetidos às correntes de curtos-circuitos [26], por estudos estatísticos [4] ou de acompanhamento [27] para avaliação de taxas de falhas em transformadores, e pelo fornecimento de valores de referências para estresses admissíveis associados aos enrolamentos dos transformadores [28, 29].

Todas as referências relacionadas a esta seção contribuíram de alguma forma no entendimento das forças eletromagnéticas, sejam elas axiais ou radiais, bem como suas consequências para os enrolamentos do transformador.

D) TÉCNICAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ENROLAMENTOS

A já mencionada referência [2] apresenta, ao final de suas análises, algumas técnicas utilizadas no diagnóstico e monitoramento de transformadores de potência sob curto-circuito. E, além deste trabalho, a pesquisa aqui realizada encontrou outras publicações que empregam tais técnicas, as quais foram utilizadas como base para o desenvolvimento da presente tese.

Dentre as técnicas empregadas atualmente para o diagnóstico de falhas mecânicas em enrolamentos, destacam-se: a medição de capacitâncias do enrolamento [2, 30], medição das correntes de magnetização [2, 31], medição da impedância de curto-circuito/reatância de dispersão [2, 32], medição pelo método de resposta em frequência das perdas adicionais (FRSL) [32, 33], análise por impulso de baixa tensão (LVI) [2, 34, 35] e análise de resposta em frequência (FRA) [36, 37, 38].

Esta última técnica vem sendo cada vez mais utilizada e dentre os trabalhos que dela fizeram uso, muitos [39-45] apresentam a modelagem do

transformador, com enrolamento tipo disco, para estudos computacionais e verificação de deformações nos enrolamentos por variações de parâmetros elétricos, como indutâncias próprias, mútuas e capacitâncias intrínsecas.

Em [39, 40], os autores propõem um modelo matemático para a representação dos enrolamentos de transformadores de potência, considerando a dependência dos parâmetros envolvidos com a frequência. Estes parâmetros são determinados a partir da geometria interna e das propriedades dos materiais do transformador, visando obter uma função de transferência que retrate o comportamento do enrolamento em uma ampla faixa de frequência. Além disso, desenvolve um estudo analítico sobre o comportamento da resposta em frequência de um transformador, com o seu enrolamento submetido às principais condições de falhas ou defeitos.

No trabalho de dissertação [41] são estudadas as duas principais metodologias para a realização da análise de resposta em frequência (FRA), apresentando as principais vantagens e desvantagens de cada método. Também são apresentadas as principais características do FRA no sentido de indicar correlação entre faltas e parâmetros modificados nos transformadores, fatores que influenciam tais medições e considerações sobre a modelagem de enrolamentos de transformadores de potência.

Em [42] destacam-se os seguintes assuntos: implementação de um modelo analítico de enrolamentos de transformadores; simulações de defeitos típicos no modelo e também em experimentos laboratoriais; implementação do sistema de medição em plataforma comercial; sistema de avaliação e suporte ao diagnóstico; e, finalmente, funcionamento do sistema de medição de resposta em frequência para o equipamento energizado.

O trabalho [43] trata da análise da resposta em frequência aplicada em transformadores de potência. Nesta referência foi dado um enfoque aos métodos de medição do FRA para cercear futuros estudos sobre o diagnóstico de faltas mecânicas. Durante a pesquisa, foi desenvolvido um sistema de medição que

realiza os testes por meio da varredura de frequência, o qual pode ser aplicado em campo (subestação). Também foi proposto um modelo de circuito equivalente para a representação dos enrolamentos no domínio da frequência, baseado em medições realizadas em transformadores de potência reais e que descreve os fenômenos físicos principais dos enrolamentos.

A dissertação [44] apresenta uma excelente revisão bibliográfica sobre transformadores, uma fundamentação sobre transitórios eletromagnéticos contemplando os tipos de modelos de transformadores divididos por faixa de frequência e métodos de aquisição de resposta em frequência. Neste enfoque, duas linhas de trabalho foram desenvolvidas na referida dissertação. A primeira delas é sobre o estudo e modelagem do transformador para baixas e médias frequências, cujos parâmetros são determinados a partir da sua resposta em frequência medida e dos seus dados construtivos. O modelo leva em conta também os efeitos não lineares e dependentes da frequência dos enrolamentos e dos materiais ferromagnéticos, bem como as capacitâncias parasitas dos enrolamentos. A segunda linha é sobre o modelo de transformador para altas frequências, em que os parâmetros do modelo são determinados utilizando as respostas em frequência experimentais em conjunto com uma ferramenta de algoritmo genético.

É importante mencionar que a base de todos estes trabalhos, para a representação do transformador para estudos em altas frequências, foram retirados de [45], a qual representa uma referência de grande importância para este tipo de estudo.

1.5 - CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE

Dentro do contexto apresentado, esta tese irá contribuir nos seguintes aspectos:

A) ANÁLISE DAS METODOLOGIAS ANALÍTICAS PARA O CÁLCULO DAS FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS

A presente tese emprega as já conhecidas formulações analíticas [17, 18, 22] para a determinação de forças e estresses eletromecânicos nos enrolamentos do transformador quando pelo mesmo percorrem as elevadas correntes de curto-circuito “passante”, ou de energização. Tais formulações são implementadas no modelo do transformador desenvolvido no ATP (*Alternative Transient Program*), utilizando a rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), sendo os seus resultados confrontados com os obtidos diretamente do *software* FLUX3D. Este último pacote computacional utiliza o método de elementos finitos, o qual o torna mais preciso em análises tão complexas como a mencionada acima.

B) APRIMORAMENTO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL DO TRANSFORMADOR UTILIZANDO O FEM

Um dos estudos realizados nas referências [17, 18] foi a implementação computacional de transformadores utilizando o FEM, visando avaliar os esforços causados pelas elevadas correntes de curto-circuito. Entretanto, nestes dois trabalhos foram utilizados a modelagem em 2D. Neste sentido, esta tese faz uma melhoria na modelagem do transformador em elementos finitos, utilizando agora uma modelagem mais detalhada e em 3D: consequentemente, são apresentados resultados mais fidedignos quando do transformador submetido às altas correntes transitórias. Além de se realizar os estudos referentes às correntes de curto-circuito, apresentam-se também resultados para as correntes de energização.

C) VERIFICAÇÃO DAS POSSÍVEIS ALTERAÇÕES EM PARÂMETROS ELÉTRICOS, MAGNÉTICOS E MECÂNICOS NOS ENROLAMENTOS CAUSADOS POR DEFORMAÇÕES

A partir de um estudo minucioso de como as forças e os estresses eletromecânicos atuam nos enrolamentos do transformador, foi possível identificar os principais tipos de deformações que possam vir a ocorrer nas bobinas do equipamento. Neste sentido, simulações computacionais podem ser desenvolvidas em modelos de transformadores, cujos enrolamentos apresentem deformações típicas. Desta forma, podem ser constatados os principais parâmetros que sofrem algum tipo de variação em relação às deformações nos enrolamentos.

D) APRESENTAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS MECÂNICAS NOS ENROLAMENTOS

Com base nos estudos e análises realizadas será ainda apresentada uma sequência de metodologias para o diagnóstico de possíveis falhas mecânicas nos enrolamentos. Esta avaliação possibilitará, por exemplo, uma manutenção preventiva do transformador antes que o mesmo saia de operação por defeitos mecânicos, elevando até mesmo a vida útil deste equipamento. Esta metodologia se baseará em referências já utilizadas para a detecção de tais falhas [2, 30-45].

E) CONTRIBUIÇÃO NAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS NO PROJETO DE P&D ENTRE UFU, UFCG E CHESF

Esta tese foi fundamental para o desenvolvimento das atividades realizadas no projeto de P&D entre UFU, UFCG e CHESF, intitulado: “Estresse

Eletromecânico em Transformadores Causado pelas Altas Correntes de Energização (“*Inrush*”) e de Curtos-Circuitos “Passantes”.

1.6 - ESTRUTURA DA TESE

A fim de alcançar os objetivos aqui propostos, além do presente capítulo, esta tese será estruturada conforme apresentado na sequência:

Capítulo II MODELAGENS E IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DE TRANSFORMADORES

Apresentam-se neste capítulo as descrições das modelagens e as implementações computacionais de transformadores, que tem por objetivo, viabilizar a criação de uma estratégia computacional que determine o estresse eletromecânico nestes equipamentos, quando submetidos às altas correntes de energização ou de curto-circuito “passantes”. Inicia-se o capítulo com os dados de um transformador de 15 kVA, que será utilizado nesta tese para a realização dos estudos propostos. Na sequência apresenta-se a modelagem inserida no ATP, a qual é descrita de forma detalhada, juntamente com a inserção para cálculo das forças e estresses radiais e forças axiais, baseadas em formulações analíticas. A representação do transformador também é descrita no *software* FLUX3D.

Capítulo III ENSAIOS LABORATORIAIS E CÁLCULOS ANALÍTICOS

Os ensaios laboratoriais e cálculos analíticos que serão utilizados para a validação dos modelos, desenvolvidos no capítulo anterior, são apresentados neste capítulo. As

medições realizadas no transformador de 15 kVA foram: em vazio, curto-circuito com tensão reduzida, energização e medições de capacitâncias parasitas. Os parâmetros provenientes de cálculos analíticos levam em consideração que o transformador esteja operando sob condição nominal e curto-circuito trifásico com tensão plena.

Capítulo IV VALIDAÇÃO DAS MODELAGENS DO TRANSFORMADOR DE 15 KVA NO ATP E NO FLUX3D

Para validar os modelos do transformador no ATP e no FLUX3D, estes serão submetidos às mesmas condições operacionais de medições e cálculos analíticos apresentados no capítulo anterior. Os resultados obtidos computacionalmente, para cada uma das simulações realizadas, são apresentados de forma simultânea para os dois *softwares* utilizados nesta tese. Sendo a maioria deles mostrados apenas em tabela. Ao final do capítulo são realizadas as comparações entre tais resultados e aqueles exibidos no Capítulo III, de forma que a validação dos modelos possa ser efetuada.

Capítulo V ESTUDOS COMPUTACIONAIS IMPONDO DEFORMAÇÃO TÍPICA AOS ENROLAMENTOS

Neste Capítulo serão apresentados estudos computacionais, nos modelos do transformador de 15 kVA inseridos nos *softwares* ATP e FLUX3D, considerando a deformação do tipo “curvatura livre” no enrolamento interno da fase central (Fase B). Este estudo será realizado para verificar possíveis alterações em parâmetros elétricos, magnéticos ou

mecânicos, de forma que se possa detectar tal falha mecânica antes mesmo que o transformador seja retirado de operação. Feitas tais alterações, os modelos são submetidos às mesmas simulações utilizadas para validá-los, ou seja, em vazio, nominal, curto-circuito com tensão reduzida, curto-circuito trifásico “passante”, energização e verificação das capacitâncias intrínsecas, sendo esta última verificada apenas no FLUX3D. Os valores obtidos em cada uma destas simulações serão comparados com os resultados obtidos no Capítulo IV, para a verificação de possíveis alterações nos parâmetros acima mencionados.

Capítulo VI METODOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

Após as análises que serão realizadas no Capítulo V será descrito no presente Capítulo técnicas de diagnóstico e monitoramento para avaliar as condições dos mesmos quando submetidos às elevadas correntes de curto-circuito e “*inrush*”.

Tais técnicas são comprovadas, dentro de certo limite, com o auxílio dos estudos computacionais apresentados no decorrer da tese.

Capítulo VII CONSIDERAÇÕES GERAIS

Por fim, este capítulo destina-se em apresentar conclusões sobre as principais investigações realizadas ao longo de todo o trabalho. Complementarmente, citam-se algumas sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

MODELAGENS E IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DE TRANSFORMADORES

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para iniciar o desenvolvimento desta tese, apresenta-se neste capítulo as descrições das modelagens e as implementações computacionais de transformadores. Tais modelagens viabilizarão a criação de uma estratégia computacional que possa estimar o estresse eletromecânico nos enrolamentos destes equipamentos, quando submetidos às altas correntes de energização e de curto-circuito “passantes”. Além disto, possibilitarão também análises de possíveis variações em parâmetros elétricos e magnéticos quando os enrolamentos possuírem deformações devido a estes estresses. Tais variações poderão indicar um decaimento na vida útil de tal equipamento.

Cada vez mais, pesquisas voltadas para determinadas áreas utilizam de forma crescente a simulação computacional. Isto vem ocorrendo devido às disponibilidades de computadores mais rápidos, com capacidade para armazenar grande quantidade de dados e executar cálculos matemáticos complexos, associados à existência de *software* rico em ferramentas de análises e geração de resultados em diversas formas.

O uso da simulação digital, para os objetivos desta tese, requer que o dispositivo, no caso, o transformador trifásico, seja representado por modelos matemáticos precisos, para que os resultados obtidos pós simulação sejam confiáveis. Desta forma, fatores complicadores tais como: interação entre os fluxos magnéticos das diferentes fases do transformador e consequências das elevadas correntes de curto-circuito e energização para os enrolamentos, como por exemplo, uma deformação nos mesmos, deve ser levada em consideração nas representações computacionais aqui propostas.

Para se obter um estudo mais detalhado e confiável, a proposta desta tese, é a utilização de dois modelos, um no *software* ATP (*Alternative Transient Program*) [46] e outro no programa FLUX, em sua versão 3D [16].

O ATP é utilizado por se tratar de um programa amplamente recomendado pela comunidade de engenharia elétrica e fornecer resultados confiáveis, além de empregar a resolução no domínio do tempo, bem como no domínio da frequência, e com tempo de processamento rápido. O modelo inserido neste *software* se baseará na distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, levando em consideração, desta forma, o acoplamento magnético existente entre fases [7-12]. Pelo fato do ATP trabalhar apenas com parâmetros elétricos, ou seja, resistências, capacitâncias e indutâncias, tal distribuição de fluxo é transformada, através do princípio da dualidade [7-13], em variáveis elétricas. No caso dos estresses eletromecânicos causados nos enrolamentos, quando submetidos a curtos-circuitos trifásicos e correntes de energização, será introduzida no modelo a formulação baseada naquela já utilizada e consagrada em várias referências [17, 18, 22].

Entretanto, tal modelagem se baseia em características construtivas, quando os enrolamentos são considerados intactos, ou seja, sem qualquer deformação. No caso de um estudo, no qual o enrolamento esteja deformado, por uma consequência de estresses eletromecânicos, é necessário estimar os novos parâmetros elétricos representativos de tal modelo. Uma formulação

matemática que estime tais parâmetros poderia se tornar, neste caso, complexa e inviável.

Desta forma, optou-se por utilizar o outro *software*, ou seja, o FLUX3D, que emprega a análise dos elementos finitos para os cálculos das grandezas estudadas, sejam elas eletrodinâmicas, eletrostáticas, magnéticas ou térmicas. O método de elementos finitos [17-21] vem sendo cada vez mais utilizado por sua precisão, o que na tese em questão é de extrema importância.

O programa computacional escolhido, apesar de possuir certa complexidade, proporcionará análises refinadas sobre estresses eletromecânicos, bem como possíveis variações em parâmetros elétrico ou magnéticos quando se considerar o enrolamento com certa deformação. A utilização deste *software* possibilitará também uma análise crítica sobre as formulações empregadas no ATP para a determinação dos estresses eletromecânicos, que, mesmo sendo consagrada, utilizam simplificações, que por vezes podem levar a conclusões errôneas sobre o valor do estresse causado ao enrolamento. Este programa também trabalha no domínio do tempo, entretanto, o tempo de processamento, dependendo do computador utilizado, pode ser bem demorado.

Neste contexto, a utilização de dois *softwares* para a realização de estudos referentes às análises de estresse eletromecânicos em enrolamentos de transformadores, bem como possíveis variações de parâmetros elétricos ou magnéticos decorrentes de deformações, vem contribuir para que os estudos a serem apresentados nesta tese tenham subsídios suficientes para viabilizar a criação de uma estratégia computacional que estime o estresse eletromecânico nos enrolamentos do transformador, bem como o possível decaimento da vida útil do dispositivo devido a tais deformações.

2.2 - CARACTERIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR UTILIZADO

O transformador a ser modelado é trifásico de três colunas, com núcleo envolvido e dois enrolamentos helicoidais por fase. As características construtivas do transformador são apresentadas na Tabela 2.1.

A Figura 2.1 mostra a vista superior do transformador detalhando algumas dimensões dos enrolamentos interno e externo, e do núcleo de ferro necessárias para os cálculos dos parâmetros, na inclusão do modelo no ATP, bem como para a sua representação no FLUX3D.

Tabela 2.1: Características do transformador.

Potência do transformador	15 kVA	
Número de fases	3	
Tensão	Enr. externo e interno	220 V
Tipo de ligação (enrolamentos com terminais acessíveis)	Enr. externo e interno	estrela ou delta
Dimensões do fio de cobre	Enr. externo e interno	3,5 x 4,5 mm ²
Densidade de corrente	Enr. externo e interno	2,58 A/mm ²
Número de espiras	Enr. externo e interno	66
Perdas em curto	Enrolamento externo	190 W
	Enrolamento interno	132 W
Peso do enrolamento	Enrolamento externo	13 kg
	Enrolamento interno	9 kg
Resistência do enrolamento	Enrolamento externo	125 mΩ
	Enrolamento interno	85 mΩ
Bobina interna	Diâmetro externo	106 mm
	Diâmetro interno	87 mm
Bobina externa	Diâmetro externo	151 mm
	Diâmetro interno	132 mm
Área aparente	coluna	49,996 mm ²
	culatra	52,826 mm ²
Área líquida	coluna	47,496 mm ²
	culatra	50,185 mm ²
Largura	coluna	80 mm
	culatra	66 mm
Densidade de fluxo magnético	coluna	1,55 Tesla
	culatra	1,44 Tesla
Comprimento médio do caminho magnético	coluna	260 mm
	culatra	163 mm
Impedância percentual	3,47 %	
Perdas totais no ferro	96 W	
Peso total do núcleo	54 kg	
Frequência de operação	60 Hz	

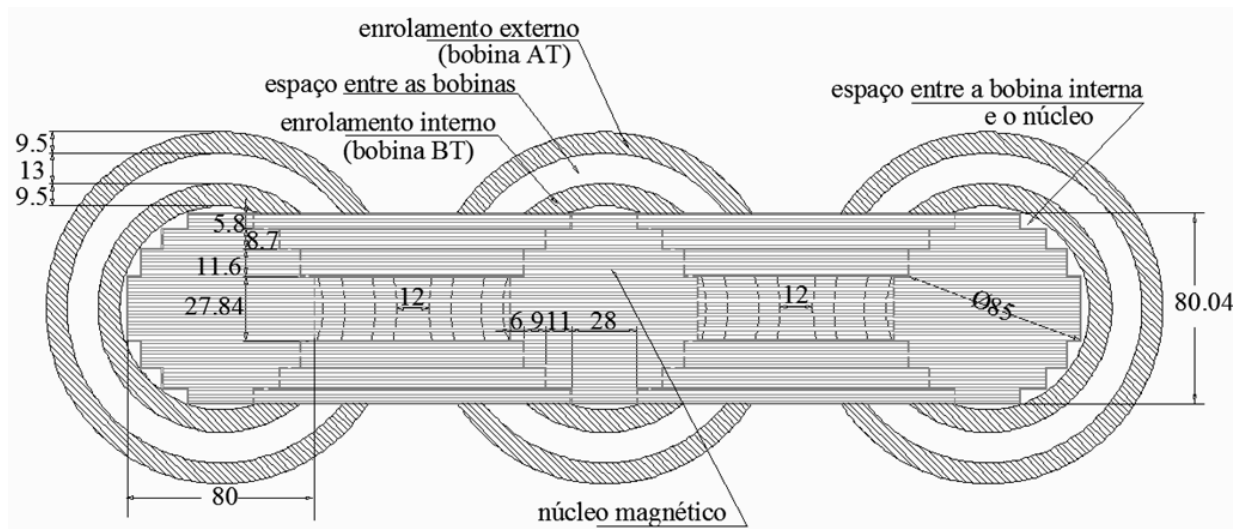


Figura 2.1: Vista superior do transformador utilizado (dimensões em milímetros).

As vistas frontal e lateral do núcleo de ferro são apresentadas nas Figuras 2.2(a) e 2.2(b). A Figura 2.3 mostra uma vista frontal do transformador só que agora incluindo os enrolamentos, sendo os enrolamentos interno e externo da fase central mostrados em corte.

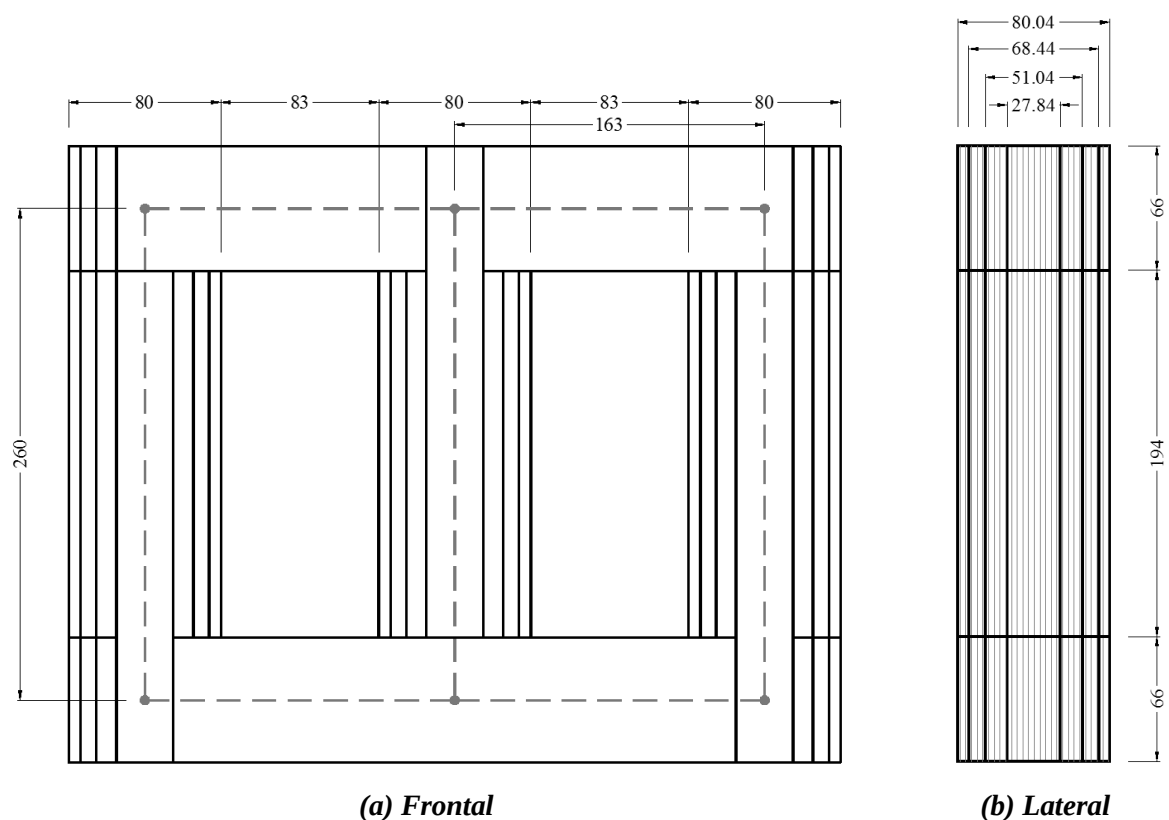


Figura 2.2: Vistas do núcleo do transformador utilizado (dimensões em milímetros).

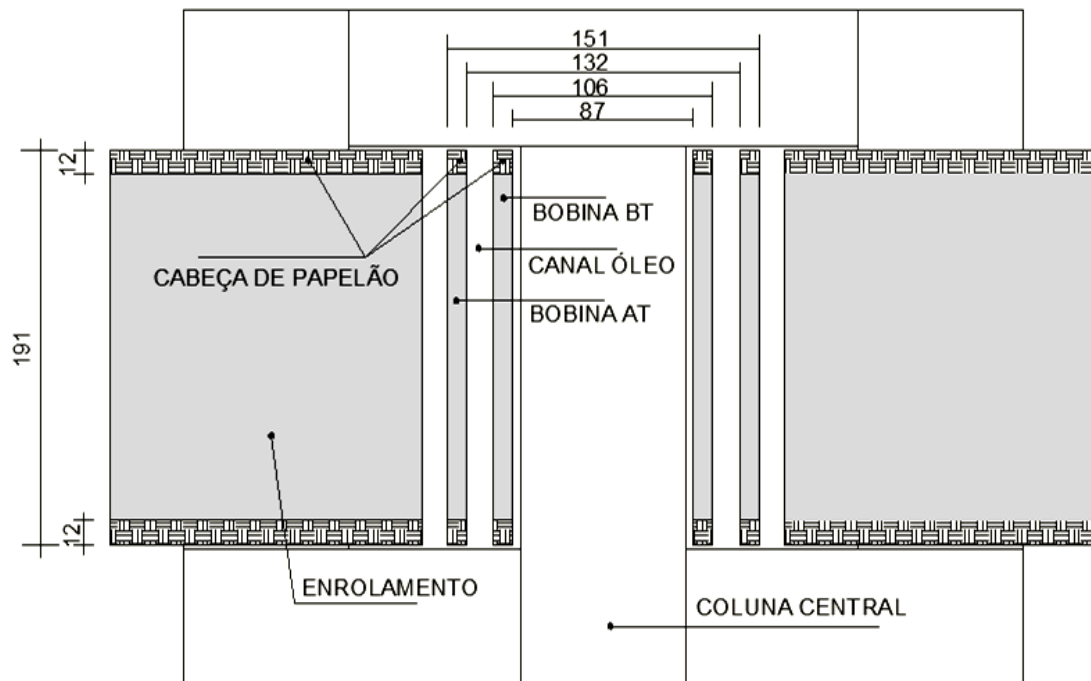


Figura 2.3: Vista frontal do núcleo do transformador (dimensões em milímetros), considerando os enrolamentos.

A Figura 2.4 mostra a curva BH da chapa de aço silício utilizada no núcleo, fornecida pela ACESITA.

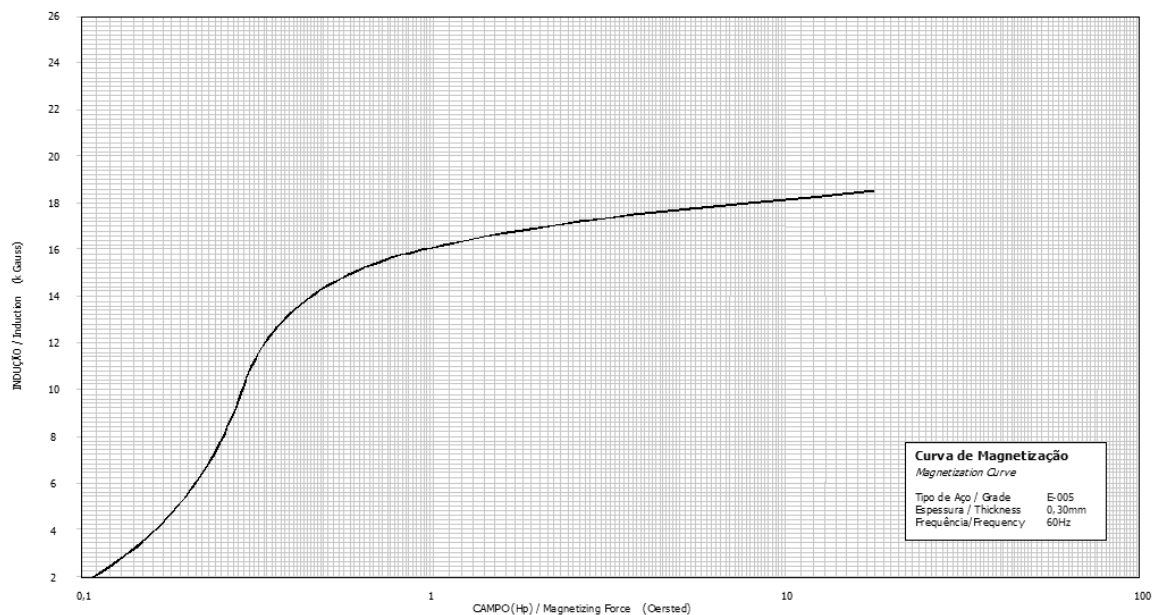


Figura 2.4: Característica de magnetização da chapa de aço silício de grau orientado utilizada no transformador (fornecido pela ACESITA) - Campo [Oe] x Indução [kG].

2.3 - MODELAGEM DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA ATP, PARA ESTUDOS NO DOMÍNIO DO TEMPO

O programa ATP (*Alternative Transient Program*) é uma ferramenta de grande flexibilidade e importância na realização de estudos no domínio do tempo e da frequência, onde a topologia do problema a ser estudado não permite uma simples representação monofásica.

O programa permite a representação de dispositivos com parâmetros concentrados ou distribuídos e componentes não lineares, tais como: transformadores, reatores, sendo disponíveis diversas alternativas para esta finalidade.

Dentre as várias metodologias empregadas para modelagens dos transformadores no ATP, a escolhida aqui é a mesma utilizadas nas referências [7-11]. Neste caso, o modelo inserido tem como base a distribuição de fluxo magnético no transformador, que por sua vez dá origem ao circuito magnético representativo do equipamento [10], conforme apresentado na Figura 2.5.

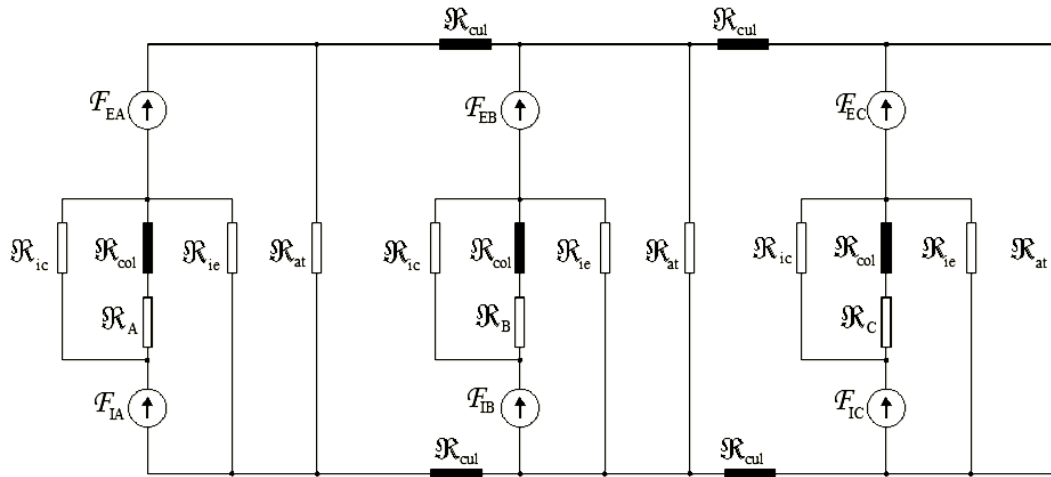


Figura 2.5: Circuito magnético equivalente da distribuição de fluxo no transformador.

Observando a Figura 2.5, nota-se a existência das forças magnetomotrizes produzidas pelos enrolamentos externo (F_E) e interno (F_I), em cada uma das fases (A, B e C). As relutâncias R_{col} e R_{cul} (preenchidas) representam o caminho

percorrido pelos fluxos nas colunas e culatras, respectivamente. Associados às colunas existem as relutâncias lineares (não preenchidas) indicativas de entreferros $\mathcal{R}_A, \mathcal{R}_B$ e $\mathcal{R}_C$ [9, 10]. As demais relutâncias lineares existentes são: $\mathcal{R}_{at}$ que representa o caminho percorrido pelo fluxo dado pelo ar e tanque do transformador, $\mathcal{R}_{ic}$ o caminho do espaço de ar entre o enrolamento interno e a coluna do núcleo ferromagnético, e, finalmente, $\mathcal{R}_{ie}$ associada ao fluxo de dispersão cujo caminho é formado pelo espaço de ar entre o enrolamento externo e interno.

A partir do circuito magnético da Figura 2.5 e utilizando-se do princípio da dualidade [7-13], obtém-se o circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 2.6.

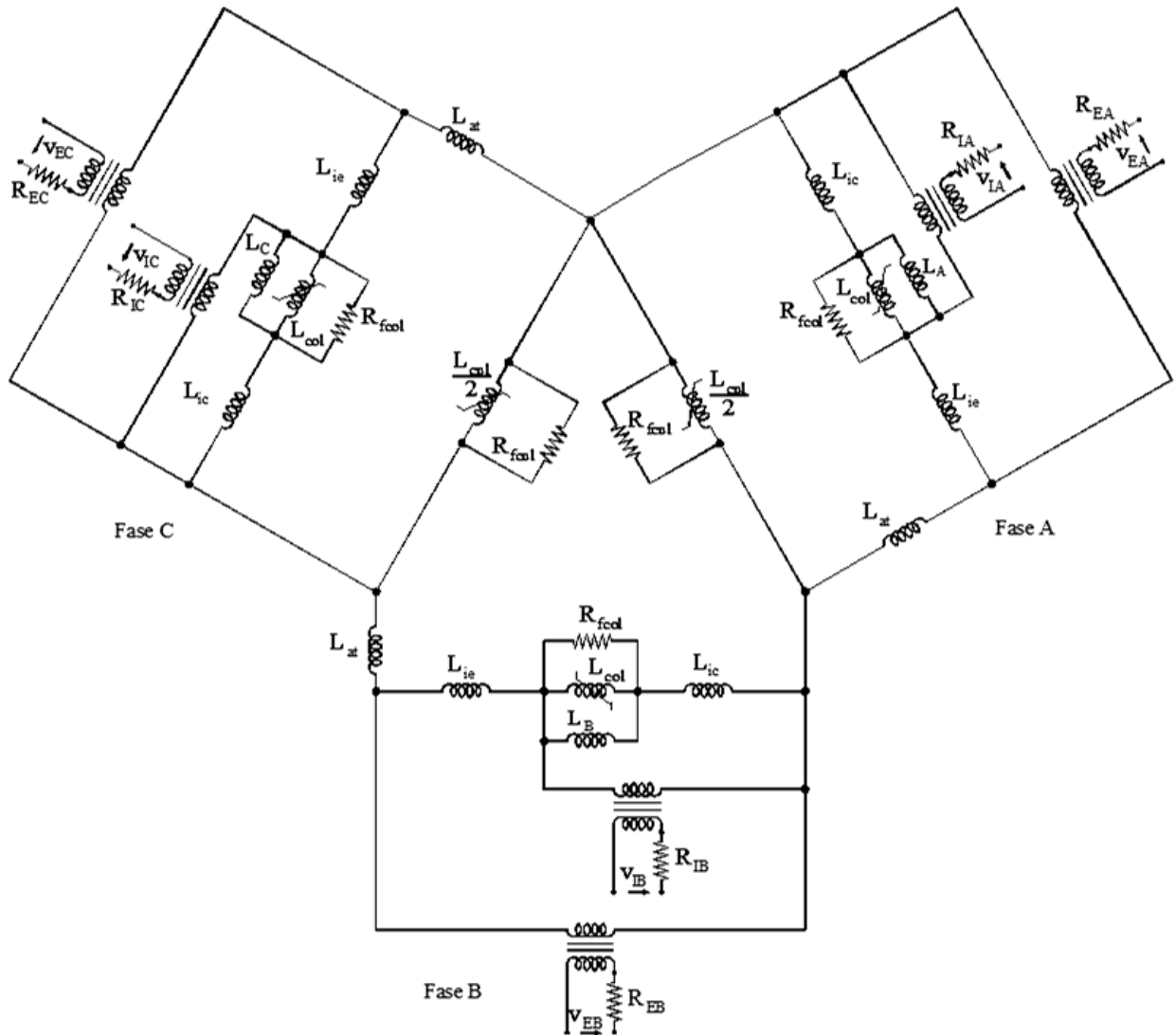


Figura 2.6: Circuito elétrico dual dos transformadores trifásicos de três colunas.

Cada indutância, existente na Figura 2.6, corresponde a uma relutância do circuito magnético e os transformadores ideais representam os enrolamentos internos e externos do transformador. Os índices utilizados em cada elemento elétrico são os mesmos utilizados no circuito magnético para melhor associação do leitor.

Deve-se observar que a indutância L_{cul} aparece, no circuito da Figura 2.6, dividido pelo fator 2; isto ocorre pois, quando se aplica o princípio da dualidade, na Figura 2.5, as duas indutâncias, representativas das relutâncias das culatras de um mesmo lado do transformador, aparecem em paralelo.

As resistências inseridas no modelo elétrico, dadas por R_{fcol} e R_{fcul} estão associadas às perdas no ferro de colunas e culatras, respectivamente. Já as resistências dadas por R_E e R_I estão associadas às perdas no cobre do enrolamento externo e interno em cada fase, respectivamente.

2.3.1- METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO

Para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico apresentados acima, são necessários alguns dados construtivos, da curva de magnetização BH da chapa, bem como alguns ensaios realizados em laboratório, tais como o ensaio a vazio, o ensaio de medição da impedância de sequência zero e o ensaio de medição de resistências dos enrolamentos [9, 10].

A) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO INTERNO E COLUNA (L_{IC})

Para estabelecer o valor da indutância, entre enrolamento interno e coluna, através da Equação 2.1, deve-se calcular inicialmente a relutância magnética ($\mathcal{R}$) para o referido caminho, com o auxílio da Equação 2.2.

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \quad (2.1)$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \times A} \quad (2.2)$$

Onde:

N = número de espiras do enrolamento interno;

μ_0 = permeabilidade do ar ($4 \times \pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

l = altura da coluna [m];

A = área de ar entre coluna e enrolamento interno [m²];

B) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE ENROLAMENTO INTERNO E EXTERNO (L_{IE})

A especificação da indutância de dispersão pode ser feita de duas formas: análoga à apresentada anteriormente, ou seja, através de parâmetros construtivos onde a área utilizada é aquela existente entre os enrolamentos, ou através dos dados de placa, no qual é utilizado o valor da impedância percentual [9, 10].

C) DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA ENTRE FASES L_{AT}

A indutância entre fases é equivalente à metade da diferença entre a indutância de sequência zero e a de dispersão. Pelo fato desta última já ter sido calculada anteriormente, basta calcular a primeira com o auxílio de dados retirados do ensaio de sequência zero [9, 10].

D) DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS DE ENTREFERROS

Para a inserção dos entreferros na modelagem é necessário obter as relutância e na sequência as indutâncias dos mesmos. Estas podem ser

determinadas através de cálculos devidamente embasados em [9, 10]. Para o desenvolvimento das formulações em tais referências foi considerada uma fonte de tensão trifásica simétrica alimentando o transformador. Tal ponderação foi adotada para garantir que, quando o fluxo magnético assumisse o valor de crista em uma coluna, o fluxo nas outras duas colunas corresponderia à metade deste valor e no sentido contrário.

As expressões apresentadas em [9, 10] para os cálculos das relutâncias dos entreferros associados à coluna esquerda – Fase A ($\mathfrak{R}_A$), central – Fase B ($\mathfrak{R}_B$) e direita – Fase C ($\mathfrak{R}_C$) são novamente reproduzidas pelas Equações 2.3, 2.4 e 2.5. As indutâncias lineares relativas às tais relutâncias de entreferros podem ser determinadas pela Equação 2.1.

$$\mathfrak{R}_A = \frac{N}{3 \times \phi} \times (5 \times I_A - I_B - I_C) - \frac{1}{9} \times (6 \times \mathfrak{R}_{col1} + 3 \times \mathfrak{R}_{col2} + 16 \times \mathfrak{R}_{cul1} + 2 \times \mathfrak{R}_{cul2}) \quad (2.3)$$

$$\mathfrak{R}_B = \frac{N}{3 \times \phi} \times (-I_A + 5 \times I_B - I_C) - \frac{1}{9} \times (6 \times \mathfrak{R}_{col1} + 3 \times \mathfrak{R}_{col2} + 8 \times \mathfrak{R}_{cul1} - 8 \times \mathfrak{R}_{cul2}) \quad (2.4)$$

$$\mathfrak{R}_C = \frac{N}{3 \times \phi} \times (-I_A - I_B + 5 \times I_C) - \frac{1}{9} \times (6 \times \mathfrak{R}_{col1} + 3 \times \mathfrak{R}_{col2} + 16 \times \mathfrak{R}_{cul1} + 2 \times \mathfrak{R}_{cul2}) \quad (2.5)$$

Nota-se que tais relutâncias dependem de:

- valores de crista da corrente de magnetização obtidos no ensaio em vazio (I_A , I_B e I_C);
- número de espiras do enrolamento energizado no ensaio supracitado (N);
- fluxo magnético nominal (ϕ);
- valores das relutâncias de colunas e culatras na condição de fluxo nominal ($\mathfrak{R}_{col1}, \mathfrak{R}_{cul1}$) e metade deste valor ($\mathfrak{R}_{col2}, \mathfrak{R}_{cul2}$).

O fluxo magnético nominal e as relutâncias de colunas e culatras, acima mencionadas, são facilmente adquiridos através de equacionamentos simples e bem conhecidos, os quais podem ser visualizados em detalhes nas referências [9, 10].

E) DETERMINAÇÃO DAS INDUTÂNCIAS NÃO LINEARES

As indutâncias não lineares (L_{col} e L_{cul}) são representadas por um indutor pseudo não linear saturável (tipo 98) [46] disponível no programa ATP. Este indutor utiliza como dado de entrada a curva de magnetização BH da chapa, em termos de corrente e fluxo, que constitui o núcleo do transformador.

Uma vez que a indução magnética é função do fluxo e o campo magnético função da corrente no enrolamento, pode-se estabelecer uma correspondência entre esses valores com base na condição nominal, de forma que os pontos da curva BH (indução [T] e campo magnético [A/m]) possam ser convertidos em termos de λI (fluxo total [Wb-espira] e corrente [A]) [9, 10].

F) DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS RELATIVAS ÀS PERDAS NO FERRO

O valor de perda obtida no ensaio em vazio ocorre pela presença das correntes parasitas, e pelo ciclo de histerese existente no núcleo do transformador [9, 10]. Considerando que tais perdas ocorrem no volume total do núcleo, é possível distribuí-la de forma proporcional aos volumes das colunas e culatras. As resistências associadas a estas perdas podem ser determinadas em função da tensão nominal e representadas no circuito elétrico equivalente em paralelo com os indutores não lineares.

2.3.2 - AJUSTE DOS PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR

A proposta de cálculos dos parâmetros do modelo do transformador apresentado tem como base o valor da tensão, corrente e número de espiras dos enrolamentos das fases. Todavia, se for desejado modelar o núcleo em outra base de tensão (V_b), a correção nos parâmetros é simples e deve ser feita nas indutâncias lineares, nas correntes e fluxos totais dos indutores não lineares [9, 10]. Neste sentido, as indutâncias lineares são multiplicadas pela relação

$(V_b/V_n)^2$ e a corrente por (V_n/V_b) . Onde V_n é a tensão nominal aplicada nos equacionamentos apresentados anteriormente.

2.3.3 - PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO CALCULADOS PARA O TRANSFORMADOR DE 15 KVA

Aplicando a metodologia apresentada no transformador de 15 kVA, cujas características construtivas foram descritas na seção 2.2, obtém-se os parâmetros do circuito elétrico representativo deste dispositivo no ATP. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros do modelo devidamente ajustados para a tensão base, no caso 100 V (rms).

Tabela 2.2: Parâmetros do modelo do transformador de 15 kVA (referidos à tensão de 100 V).

Transformador monofásico representativo dos enrolamentos 127/100 V		
Resistência dos enrolamentos		
Bobina externa	$R_{\text{externa}} = 40 \times 10^{-3} \Omega$	
Bobina interna	$R_{\text{interna}} = 29 \times 10^{-3} \Omega$	
Indutores lineares		
Indutância devida ao fluxo entre enrolamento interno e coluna	$L_{\text{ic}} = 0,02453 \times 10^{-3} \text{ H}$	
Indutância devida ao fluxo entre ar e tanque	$L_{\text{at}} = 0,16058 \times 10^{-3} \text{ H}$	
Indutância devida ao fluxo de dispersão entre enrolamento interno e externo	$L_{\text{ie}} = 0,14541 \times 10^{-3} \text{ H}$	
Entreferros		
Coluna Fase A	Coluna Fase B	Coluna Fase C
$L_A = 93,6 \times 10^{-3} \text{ H}$	$L_B = 230,14 \times 10^{-3} \text{ H}$	$L_C = 93,6 \times 10^{-3} \text{ H}$
Indutores não Lineares		
Colunas	$i_{\text{col-100V}} = 0,2508 \text{ A}$	$\lambda_{100\text{V}} = 0,3754 \text{ Wb}$
Culatras	$i_{\text{cul-100V}} = 0,2467 \text{ A}$	$\lambda_{100\text{V}} = 0,3754 \text{ Wb}$
Perdas no Ferro		
Colunas	Resistência $R_{\text{fcol}} [\Omega]$	648,843
Culatras	Resistência $R_{\text{fcul}} [\Omega]$	486,618

A Tabela 2.3 apresenta os pontos utilizados nas indutâncias não lineares de colunas e culatras.

Tabela 2.3: Corrente e fluxo magnético para representação das indutâncias não lineares.

Dados da curva B-H		Coluna		Culatra	
B[T]	H [A/m]	Fluxo [Wb]	Corrente [A]	Fluxo [Wb]	Corrente [A]
0,20	8,4328	0,0493947	0,0422	0,0521389	0,0529
0,30	10,8990	0,0740921	0,0545	0,0782083	0,0684
0,40	12,9674	0,0987895	0,0549	0,1042778	0,0814
0,50	14,9165	0,1234868	0,0746	0,1303472	0,0936
0,60	16,7064	0,1481842	0,0836	0,1564167	0,1049
0,70	18,4964	0,1728816	0,0926	0,1824861	0,1161
0,72	18,6953	0,1778211	0,0936	0,1877000	0,1174
0,76	19,5704	0,1877000	0,0979	0,1981278	0,1228
0,80	20,2864	0,1975789	0,1015	0,2085556	0,1273
0,90	21,6786	0,2222763	0,1085	0,2346250	0,1361
1,00	22,8719	0,2469737	0,1145	0,2606944	0,1436
1,10	24,2641	0,2716711	0,1214	0,2867639	0,1523
1,20	26,4121	0,2963684	0,1322	0,3128333	0,1658
1,30	30,2307	0,3210658	0,1513	0,3389028	0,1898
1,40	36,1973	0,3457632	0,1841	0,3649722	0,2272
1,44	39,2999	0,3556421	0,1967	0,3754000	0,2467
1,50	46,9372	0,3704605	0,2349	0,3910417	0,2946
1,52	50,1193	0,3754000	0,2508	0,3962556	0,3146
1,60	76,3723	0,3951579	0,3822	0,4171111	0,4794
1,70	159,1090	0,4198553	0,7962	0,4431806	0,9987
1,80	572,7924	0,4445526	2,8663	0,4692500	3,5954
1,86	1431,9810	0,4593711	7,1656	0,4848917	8,9885
1,98*	7955,4500	0,4890145	39,8091	0,5161749	48,9364
2,028*	15910,9000	0,5008630	79,6195	0,5286880	99,8785
2,097*	39777,2500	0,5179000	199,0476	0,5466760	249,6964
2,143*	79554,5000	0,5243000	398,0952	0,5586680	499,3927

* – ponto obtido pela extrapolação da curva B-H.

2.3.4 - IMPLEMENTAÇÃO NO MODELO PARA CÁLCULO DE FORÇAS RADIAIS E AXIAIS E ESTRESSES RADIAIS NOS ENROLAMENTOS

As componentes radiais e axiais das forças eletromecânicas nos enrolamentos dos transformadores, bem como os estresses provenientes de tais forças, podem ser calculadas através de um método analítico descrito em [17, 18, 22]. Estas referências apresentam em detalhes várias considerações, com tipos de enrolamentos diferentes e suas respectivas formulações para a determinação de tais parâmetros, para o caso onde os enrolamentos estão sendo submetidos às altas correntes de curto-circuito.

Dentre as análises que serão realizadas nesta tese, encontra-se tanto a energização, quanto curto-circuito trifásico do transformador. Entretanto, não foram encontradas referências que descrevessem a metodologia de cálculo para a determinação das forças e estresses quando os enrolamentos são percorridos pelas correntes “*inrush*”. Optou-se então, por utilizar o equacionamento, acima mencionado, em ambos os casos.

Desta forma, serão apresentadas aqui apenas as equações a serem implementadas no modelo do transformador no ATP, que possui enrolamentos concêntricos de igual comprimento, e sem nenhum tipo de derivação ou desalinhamento de eixo entre o enrolamento interno e externo [22].

Tais formulações serão inseridas no modelo através da rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) [46], na qual é possível especificar valores constantes, bem como equações, dependentes ou não de valores específicos extraídos do modelo.

A Figura 2.7 [17], que representa a distribuição de fluxo de dispersão entre os enrolamentos interno e externo do transformador, irá assessorar o entendimento de alguns parâmetros utilizados nas formulações subsequentes.

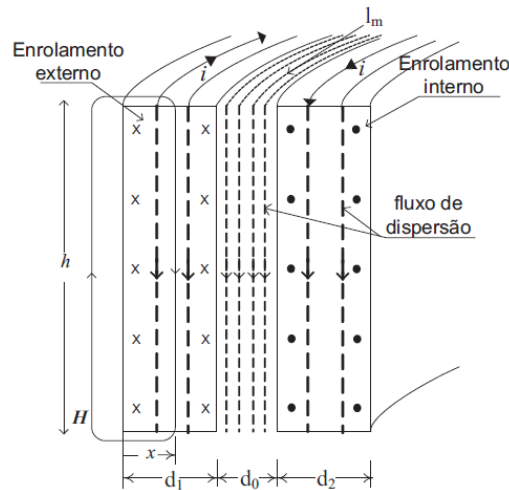


Figura 2.7: Distribuição do fluxo de dispersão no transformador.

A) FORÇAS E ESTRESSES RADIAIS

As componentes das forças agindo radialmente em um transformador com enrolamentos concêntricos são facilmente calculadas por métodos elementares. A Figura 2.8 [18] mostra que o enrolamento externo está em um campo axial, o qual causa uma força radial agindo para fora tendendo a “esticar” o condutor. Por outro lado, o enrolamento interno experimenta uma força similar agindo para dentro tendendo a comprimi-lo. Observa-se que a distribuição do campo axial pode ser aproximada por um trapézio, onde seu máximo valor é constante na região entre o enrolamento interno e externo.

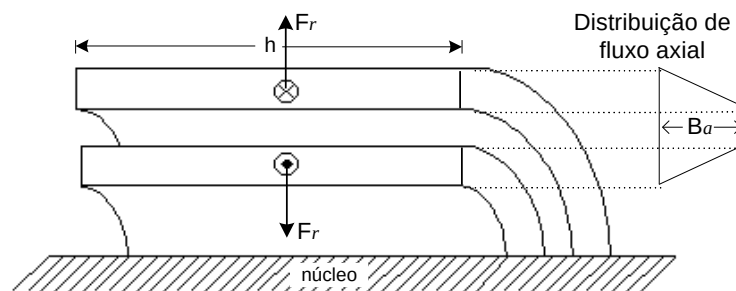


Figura 2.8: Seção transversal de um transformador com enrolamentos concêntricos mostrando as forças radiais (F_r) e a distribuição de fluxo axial (B_a).

Para a implementação destas forças e estresses radiais, a princípio deve-se calcular o valor da densidade de fluxo de dispersão axial no ponto médio entre

os enrolamentos, que é fornecido pela Equação 2.6, onde nI_n é o valor de pico dos ampère-espiras (ou força magnetomotriz) em cada um dos enrolamentos [17], no caso da rotina implementada no ATP, tal valor será extraído diretamente da simulação.

$$B_a = \frac{4\pi \cdot nI_n}{10^7 \cdot h} \quad (2.6)$$

Onde:

B_a : densidade de fluxo de dispersão axial [T];

n : número de espiras do enrolamento;

I_n : corrente nominal do enrolamento [A];

h : altura do enrolamento [m] (Figura 2.7).

A força magnetomotriz total (nI_n) ou ampère-espira de cada enrolamento, encontra-se imersa em uma densidade de fluxo médio igual a $1/2B_a$. Nesta situação, a força radial total atuando sobre um enrolamento de diâmetro médio D_m [m] e altura h [m] pode ser determinada pela Equação 2.7 [17, 18, 22].

$$F_r = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_n)^2 \cdot D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (2.7)$$

A força radial média (F_{rmed}), apresentada na Figura 2.9, que age nas duas metades opostas do enrolamento é equivalente à pressão no diâmetro, enquanto que a força radial total (F_r) é equivalente à pressão na circunferência (πD_m).

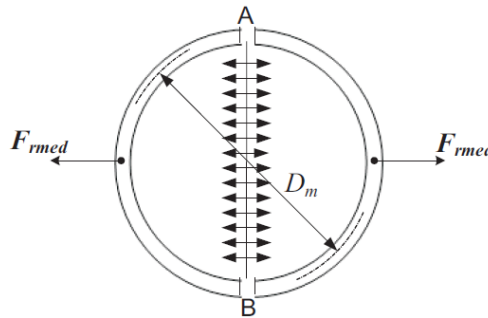


Figura 2.9: Método para cálculo de estresse de tração médio.

Consequentemente, a força radial média será obtida pela Equação 2.8 [17, 18, 22].

$$F_{rmed} = \frac{2\pi \cdot (nI_n)^2 \cdot D_m}{h} 10^{-7} [N] \quad (2.8)$$

O estresse médio de tração no enrolamento será dado pela Equação 2.9 [17, 18, 22].

$$\sigma_{r-medio} = \frac{F_{rmed}}{2 \cdot n \cdot a_c} [N / m^2] \quad (2.9)$$

Onde:

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

B) FORÇAS E ESTRESSES AXIAIS

A formulação para o cálculo das forças axiais apresentadas nas referências supracitadas é mostrada na Equação 2.10, a qual depende da densidade de fluxo de dispersão radial e ocorrem nas duas extremidades das bobinas e estão dirigidas para o ponto médio dos enrolamentos.

$$F_{cTotal} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_n)^2 D_{mt} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right] [N] \quad (2.10)$$

Sendo:

D_{mt} : Diâmetro médio do transformador, ou seja, considerando ambos os enrolamentos [m];

(nI_n) : Representa o ampère-espira em um dos enrolamentos;

d_0 : ducto do transformador [m] (Figura 2.7);

d_i e d_e : Espessura radial do enrolamento interno e externo, respectivamente [m] (Figura 2.27).

Para transformadores maiores, na ausência de uma análise mais detalhada, pode-se considerar que cerca de 2/3 a 3/4 desta força é aplicada no enrolamento interno (F_{c-i}) e os 1/3 a 1/4 restantes estão distribuídos no enrolamento externo (F_{c-e}) [18]. Na referência [18], para o mesmo transformador de 15 kVA utilizado

nesta tese, foi considerada a distribuição 2/3 e 1/3. Desta forma, a força compressiva total para o enrolamento interno será obtida pela Equação 2.11, e para o externo pela Equação 2.12.

$$F_{c-i} = \frac{2}{3} \times F_{cTotal} [N] \quad (2.11)$$

$$F_{c-e} = \frac{1}{3} \times F_{cTotal} [N] \quad (2.12)$$

Como neste transformador não há presença de suportes distribuídos radialmente, e seus enrolamentos são ambos do tipo camada, não existirá o estresse pelo efeito *bending*, nem pelo efeito *tilting*, causados pela força axial [18], ou seja, no ATP não será calculado qualquer estresse axial, apenas o radial.

A inserção de tais fórmulas através da rotina TACS é relativamente simples, pois a maioria dos parâmetros empregados é constante e a única variável retirada diretamente do modelo é a corrente que percorre os enrolamentos.

2.3.5 - IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO ATP/ATPDRAW

O modelo apresentado até o presente momento foi inserido no *software* ATP utilizando os cartões de entradas [46]. O arquivo criado pode ser visto no Anexo 1 desta tese.

Entretanto, para a realização das simulações, optou-se por utilizar o ATPDraw, ou seja, um *software* que utiliza interface gráfica para a inserção do modelo do transformador. Para isto, foi necessário criar um ícone e gerar na biblioteca [46] do referido *software* um arquivo que represente a modelagem em questão.

O ícone gerado para representar o transformador é mostrado na Figura 2.10. Este ícone é trifásico, sendo que a conexão disponível do lado esquerdo representa o enrolamento externo, ou seja, de alta tensão, e a do lado direito do enrolamento interno, ou seja, de baixa tensão. As conexões disponíveis na parte inferior do transformador podem ser utilizadas para aterrar os respectivos enrolamentos.

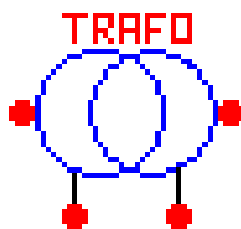


Figura 2.10: Ícone criado para representar o transformador no ATPDraw.

2.4 - REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA FLUX3D PARA ESTUDOS MAGNÉTICOS

O FLUX é um *software* baseado no método de elementos finitos (FEM) utilizado para simulações dos tipos eletrodinâmicas, eletrostáticas, magnéticas ou térmicas. Sendo possível realizar análises tanto em duas (2D) quanto em três (3D) dimensões. Os módulos básicos incluem o pré-processamento (modelagem, definição das propriedades físicas, e confecção das malhas), processamento (resolução de problemas) e pós-processamento (análise dos resultados). Este programa é adequado para a concepção, otimização e análise de quaisquer dispositivos eletromagnéticos, tais como, motores elétricos e geradores, atuadores lineares, transformadores, sensores, cabos, compatibilidade eletromagnética, avaliação não destrutiva de dispositivos [16].

Baseado em 30 anos de experiência, o FLUX se tornou um *software* confiável e com resultados bem precisos, sendo pioneiro no desenvolvimento de formulações baseadas no método de elementos finitos [16].

Com um enorme número de funcionalidades, este *software* será utilizado nesta tese para análise magnética em sua forma AC e transitória, e eletrostática em sua forma DC. Simulações do tipo AC são aquelas onde as grandezas são calculadas em sua forma vetorial, ou seja, com magnitude e ângulo. A simulação transitória é a realizada no domínio do tempo, e a DC é aquela onde as grandezas são obtidas apenas em amplitude.

A fim de proporcionar resultados de simulação no mais curto espaço de tempo computacional, o *software* utiliza fórmulas para análises específicas de forma independente, tanto para 2D quanto para 3D [16]. O usuário possui controle sobre os parâmetros do modelo de forma que toda a geometria e construção de malha sejam realizadas de forma conveniente ao estudo que se propõe. Na construção da malha, o próprio *software* avalia a forma e natureza de cada componente dentro do seu modelo e apresenta uma densidade da malha de qualidade razoável e automaticamente. As propriedades físicas e fontes de excitação são também totalmente controladas pelo usuário. Este programa possui uma ferramenta no qual o modelo pode ser conectado a um circuito externo, o que proporciona análise com vários tipos de distúrbios na fonte, por exemplo.

Os resultados podem ser visualizados de várias maneiras diferentes para examinar claramente o modelo desenvolvido, ou seja, pode-se empregar [16]:

- Mapas de cores ou linhas na região do problema como, por exemplo, a densidade do fluxo magnético no núcleo do transformador;
- Curvas de variação de alguma grandeza versus parâmetros (tempo, posição geométrica)
- Visualização das formas de onda de corrente, tensão, densidades de fluxos, forças eletromecânicas, etc.;

- Analisar as quantidades globais como indutância, energia, força, capacitâncias, etc.

De uma maneira geral, este *software* possui grande confiabilidade na comunidade de engenharia elétrica, sendo que seu manuseio possui certa complexidade. Esta se deve ao fato de que, o elemento a ser representado necessita de todas as características construtivas de forma bem detalhada, uma vez que, os resultados obtidos no pós-processamento são extremamente dependentes de tais dados.

Neste sentido, no trabalho aqui apresentado, optou-se por realizar estudos no FLUX em sua versão 3D, que mesmo sendo mais complexa que a em 2D, e mais demorada em seu tempo de processamento, se tornou a melhor opção pelo detalhamento necessário para se chegar aos objetivos propostos nesta tese. Desta forma, na sequência serão apresentados alguns estudos sobre as características construtivas do transformador de 15 kVA, juntamente com a sua representação no FLUX3D.

É importante mencionar que a representação no FLUX3D será do transformador de 15 kVA, com suas características construtivas e físicas, mas os procedimentos adotados aqui poderão ser seguidos para qualquer tipo de transformador o qual se tenha os detalhes construtivos e físicos.

2.4.1 - REPRESENTAÇÃO DO NÚCLEO DO TRANSFORMADOR DE 15 KVA

A representação do núcleo do transformador terá como base os dados fornecidos na seção 2.2 deste Capítulo. Desta forma, cada uma das dimensões apresentadas nas Figuras 2.1, 2.2 (a) e (b) e 2.3 foram devidamente inseridas no *software*. É importante mencionar que tais dimensões foram fornecidas pelo fabricante do equipamento, de tal forma que caso tenha ocorrido alguma alteração na execução do mesmo, poderá ocorrer alguma diferença entre dados obtidos por simulação e medição.

Assim como no modelo do ATP, o núcleo aqui é caracterizado pela curva de magnetização BH, fornecida pela ACESITA e empregada na construção do núcleo, juntamente com os entreferros de junção.

O FLUX3D possui uma biblioteca própria de materiais; entretanto, caso o material de utilização no projeto não existir nesta, é possível adicioná-lo. Dentre as várias opções para tal, optou-se pela qual se insere, como dados de entrada, os pontos de densidade de fluxo magnético ($B[T]$), e do campo magnético ($H [A/m]$), retirados da Figura 2.4.

Para a inserção dos entreferros na composição do núcleo é necessária a determinação das espessuras dos mesmos. De posse dos valores das relutâncias calculadas para o modelo do transformador no ATP, e utilizando a Equação 2.2, obtêm-se facilmente tais valores.

2.4.2 - REPRESENTAÇÃO DO TANQUE DO TRANSFORMADOR DE 15 KVA

As dimensões do tanque não foram fornecidas pelo fabricante, sendo, desta forma, obtidas por medições. Este componente é representado por uma região não condutora magneticamente, com espessura de 0,005 m, com uma condição de contorno que considera o fluxo magnético tangente ao mesmo. Todo o espaço do tanque é preenchido com material que representa o óleo.

2.4.3 - REPRESENTAÇÃO DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR DE 15 KVA

Existem duas maneiras de se representar os enrolamentos: na primeira, estes são considerados do tipo não malhados, ao passo que, na segunda, do tipo malhado.

Na primeira opção, existem alguns tipos base do formato do condutor, como por exemplo, circular ou retangular. Além disto, o tempo de

processamento é reduzido pelo fato dos mesmos não serem malhados, ou seja, o *software* terá menos elementos para se realizar os cálculos. Entretanto, esta comodidade acarreta algumas desvantagens, que para esta tese são de extrema importância, como por exemplo, a possibilidade de verificar possíveis forças eletromagnéticas nos enrolamentos, bem como a imposição de determinada deformação. Desta forma, optou-se por trabalhar com os enrolamentos em sua forma malhada, mesmo que esta resulte em um tempo maior de processamento.

Antes de iniciar a representação dos enrolamentos, deve-se conhecê-los de forma bem detalhada. De acordo com a Figura 2.1 os enrolamentos do transformador possuem uma espessura de 9,5 mm, e segundo a Figura 2.3 uma altura total de 191 mm, sendo 24 mm de isolante e 167 mm de condutor propriamente dito. Já a Tabela 2.1 indica que o condutor possui área de seção transversal retangular de 3,5 x 4,5 mm.

Analisando tais dimensões, nota-se, que tanto para o enrolamento externo quanto o interno, que:

- A espessura dos enrolamentos (9,5 mm), indica que os mesmos são construídos em duas camadas;
- Sabe-se que as bobinas possuem 66 espiras, desta forma, cada camada possui 33 espiras;
- Se for considerado que o condutor seja enrolado em sua menor dimensão, ou seja, a altura do condutor de 3,5 mm, tem-se uma espessura na bobina de $4,5+4,5 = 9$ mm, o que indicaria apenas 0,5 mm de isolante; e uma altura de $33*3,5 = 115,5$ mm. Ou seja, pela altura faltaria $167-115,5 = 51,5$ mm, se considerado que esta diferença fosse preenchida por material isolante, dever-se-ia ter 1,56 mm deste tipo de material entre espiras, o que por experiência, faz-se acreditar que esta consideração está equivocada;
- Fazendo uma nova consideração, no qual o condutor seja enrolado em sua maior dimensão, ou seja, a altura do condutor igual a 4,5 mm, tem-se uma espessura na bobina de $3,5+3,5 = 7$ mm, o que indicaria 2,5 mm de isolante; já

neste caso, a altura do enrolamento seria de $33 \times 4,5 = 148,5$ mm, ou seja, 18,5 mm seria de isolante. Este caso é considerado mais real que o anterior, e por isto adotado neste trabalho.

Esta consideração teve que ser adotada pelo fato do fabricante não indicar a espessura real dos isolantes empregados nos enrolamentos em questão.

Assim, para se especificar a quantidade de isolante e condutor existentes nos enrolamentos serão feitas algumas ponderações, as quais podem ser acompanhadas com o auxílio na Figura 2.11. É importante mencionar que tal cuidado, em separar condutor de isolante, é fundamental para se obter um estudo bem detalhado sobre as consequências de deformações nos enrolamentos, no desempenho do equipamento.

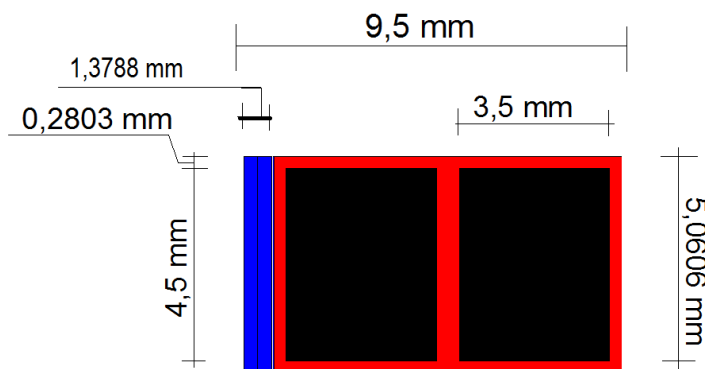


Figura 2.11: Disposição dos condutores e isolante no enrolamento.

Sabendo-se que a altura dos enrolamentos, interno e externo, é igual 167 mm, constituído de duas camadas, cada uma delas possuindo 33 espiras, sendo que cada espira possui uma altura de 5,0606 mm. Deste total, 4,5 mm pertence ao condutor, destacado em preto, na Figura 2.11. Desta forma, tem-se uma diferença na altura de cada espira no valor de 0,560606 mm, este é considerado como sendo de isolante (verniz). Dividindo este valor por dois, ou seja, partes superior e inferior da espira, tem-se um isolante de 0,2803 mm (vermelho). Obviamente este verniz também é considerado nos lados esquerdo e direito de cada espira.

Com apenas este isolante a bobina teria uma espessura de 8,1212 mm, faltando assim, 1,3788 mm para o total de 9,5 mm. Isto pode ser resolvido

considerando outro isolante na parte interna do enrolamento (azul), do tipo papelão.

De qualquer forma, tais ponderações não foram confirmadas pelo fabricante, mas, representam a maneira mais apropriada para a representação dos enrolamentos no FLUX3D.

Levando-se em consideração tais valores, os enrolamentos são inseridos, espira por espira, e camada por camada para se realizar os estudos necessários. Para a especificação de cada enrolamento, cria-se regiões de volumes onde indica-se o número de espiras, e o material condutor, ou seja, o cobre.

A Figura 2.12 apresenta o transformador já inserido no *software* onde é possível observar o núcleo (verde), o tanque (amarelo), os enrolamentos de alta representados pela cor azul e os de baixa pela branca.

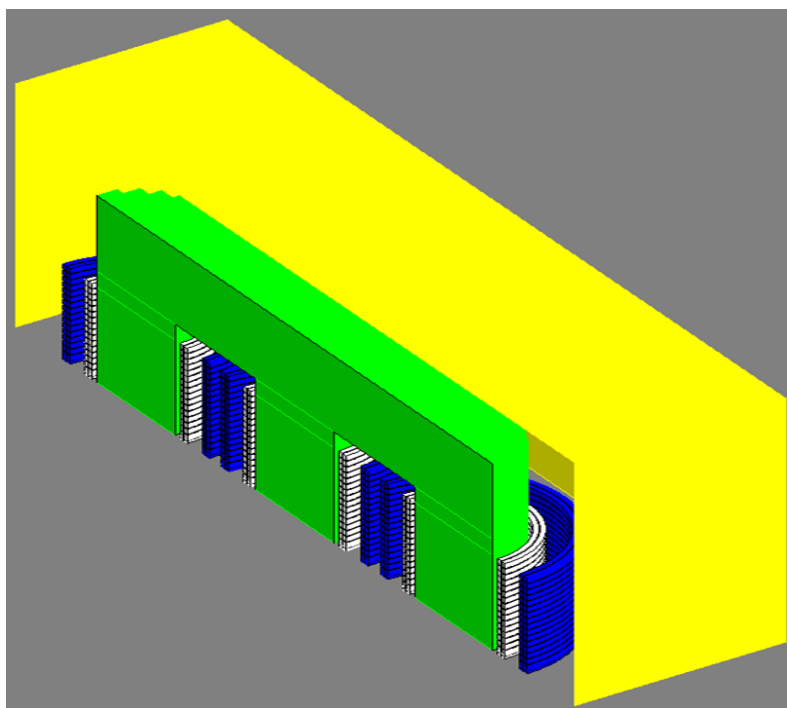


Figura 2.12: Representação dos enrolamentos, núcleo e tanque do transformador de 15 kVA.

É importante mencionar que apenas $\frac{1}{4}$ do dispositivo foi representado. O programa computacional sob uso possibilita utilizar planos de simetria, em 3D, os quais acabam proporcionando uma diminuição no tempo de processamento, durante a simulação. Desta forma, o transformador de 15 kVA é representado contendo dois planos de simetria, um na transversal e outro no longitudinal.

Sendo o da transversal, definido pelo plano XY, é caracterizado como tendo o campo magnético normal e o campo elétrico tangencial; já o longitudinal, definido pelo plano ZX, é caracterizado com o campo magnético tangencial e o elétrico normal.

A Figura 2.13 mostra uma ampliação da Fase A do transformador, que é apresentada para que se possa observar a riqueza de detalhe inserida na representação do equipamento no FLUX3D. Nota-se de forma clara que os degraus apresentados na Figura 2.1, existentes na construção do núcleo foram levadas em consideração. Observa-se ainda que os enrolamentos foram representados espira por espira com camada dupla. Esta separação possibilita a inserção dos materiais isolantes apresentados na Figura 2.11.

É importante mencionar que, para os estudos magnéticos, os materiais isolantes (verniz, óleo e papelão) são considerados como sendo o ar. Entretanto, para estudos elétricos, cada um dos materiais acima mencionados terá as devidas propriedades dielétricas, as quais serão mencionadas em momento oportuno.

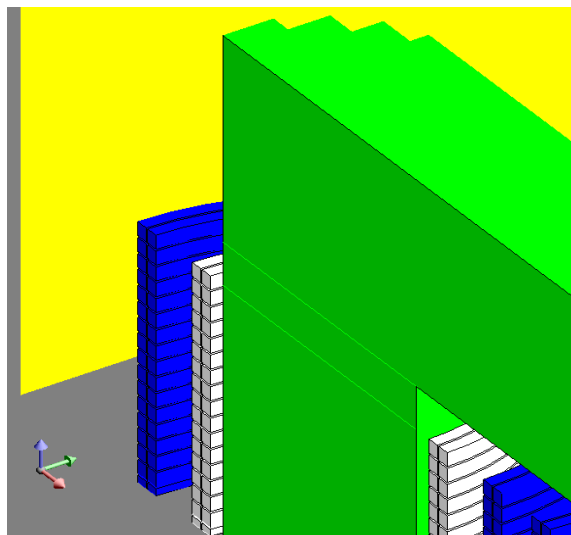


Figura 2.13: Detalhe da representação do transformador no FLUX3D.

2.4.4 - CRIAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MALHA

Após a inclusão do transformador no FLUX3D, foram criados os elementos de malha, que serão utilizados pelo *software* para a realização dos

cálculos. É interessante mencionar que o programa computacional em questão realiza a malha do projeto de forma automática, entretanto, para se obter um refinamento na mesma, com o intuito de aumentar a precisão dos resultados, é necessário criar elementos de malhas próprios. É importante mencionar que tais elementos não podem ser muito pequenos, pois aumenta-se muito o tempo de processamento. Quanto menor o elemento, maior a quantidade, e maior o número de cálculos para se obter a convergência do problema.

Após tais considerações, gera-se a malha, e o *software*, além de apresentar todos os elementos criados, faz uma avaliação sobre a qualidade do mesmo, conforme mostrado na Figura 2.14.

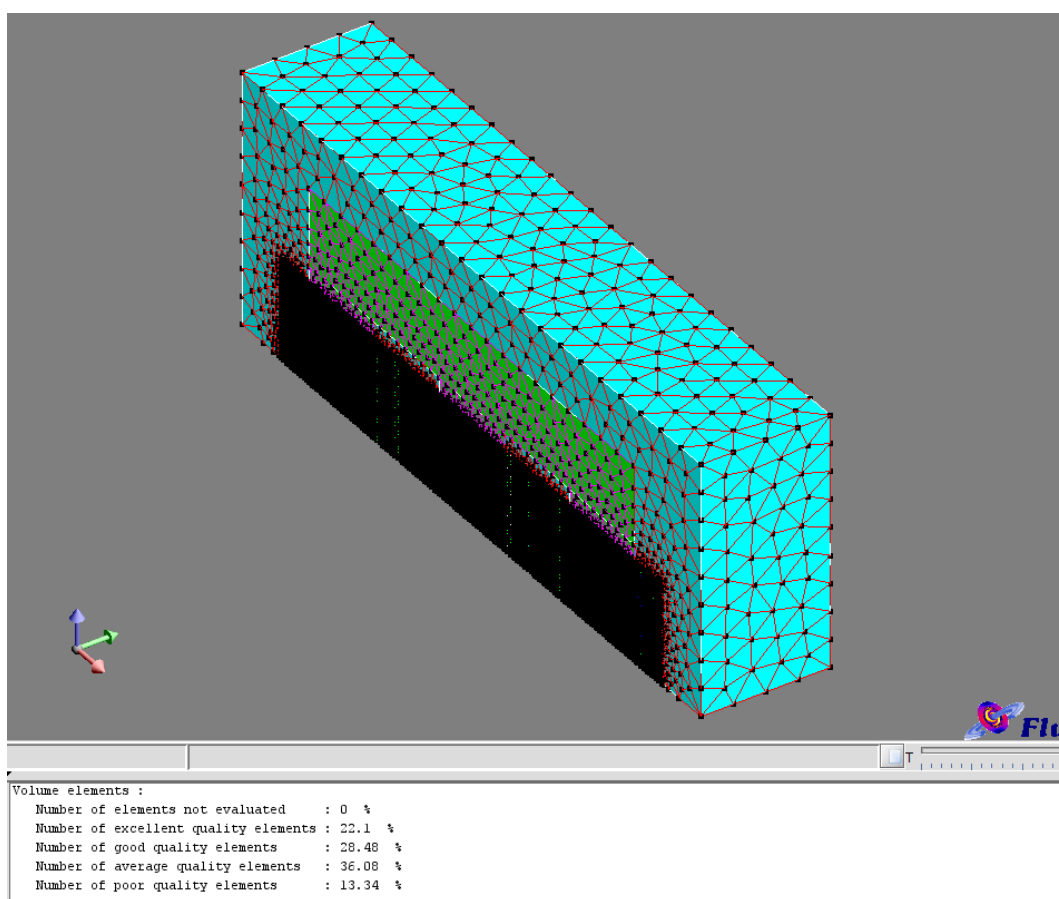


Figura 2.14: Malha criada pelo FLUX3D.

2.4.5 - CRIAÇÃO DO CIRCUITO EXTERNO

Para estudos do tipo AC e transitório, o *software* disponibiliza a possibilidade de conectar os enrolamentos a um circuito externo. Este circuito

facilita a imposição, por exemplo, da forma de onda de tensão a ser aplicada ao enrolamento, e o tempo de chaveamento, para o caso de estudos transitórios.

Como qualquer outro tipo de editor de circuito elétrico, este dispõe de dispositivos, como por exemplo, resistência, capacitâncias, indutâncias, etc. para a implementação do circuito em questão.

No Capítulo 4, que será utilizado para apresentar resultados de simulação, cada circuito utilizado será devidamente detalhado.

2.5 - REPRESENTAÇÃO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM TRÊS COLUNAS NO PROGRAMA FLUX3D PARA ESTUDOS ELETROSTÁTICOS

A representação do transformador para estudos eletrostáticos no FLUX3D procede da mesma forma que a apresentada no item anterior, salvo quanto à caracterização de cada um dos componentes do mesmo. Ou seja, o desenho é o mesmo, só que a caracterização dos materiais, que representam cada um dos itens do transformador, é voltada para os estudos eletrostáticos.

O núcleo não é mais representado pelo material magnético da ACESITA, e sim considerado como sendo um condutor perfeito no qual pode-se impor um determinado potencial elétrico. O tanque continua sendo uma condição de contorno; entretanto, neste caso pode-se impor o potencial elétrico que se desejar. Esta imposição de potencial elétrico tanto para o núcleo quanto para o tanque é muito interessante, pois na prática estes encontram-se aterrados, ou seja, com potencial “zero”.

Os enrolamentos são considerados como sendo condutores perfeitos e a imposição do potencial elétrico também fica a critério do tipo de estudo que se deseja realizar.

A maior diferença está na caracterização dos materiais isolantes: óleo, verniz e papelão. O papelão anteriormente não representado, agora é inserido no modelo com as dimensões já devidamente apresentadas na seção 2.5.3. Estes componentes agora são considerados como materiais dielétricos, com suas permissividades relativas e tangente delta sendo consideradas [42], conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Características dos materiais dielétricos.

Material	Permissividade Relativa (ϵ_r)	Fator de dissipação dielétrica ($\text{tg}\delta$)
Óleo	2,2	$0,01 \times 10^{-2}$
Papelão	3,4	1×10^{-2}
Verniz	2,5	1×10^{-2}

2.6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram descritas duas modelagens para transformadores. Inicialmente apresentou-se as características construtivas do transformador que será utilizado nesta tese, com todos os dados fornecidos pelo fabricante, bem como ensaios de rotina empregados nas modelagens.

Na sequência foi apresentada a metodologia utilizada para a modelagem do transformador no ATP, a qual tem como principal característica o acoplamento magnético entre fases, muitas das vezes negligenciado em outros modelos. Além disto, os vários fluxos existentes no transformador também são representados. Inicia-se tal modelo com a construção do circuito magnético equivalente do transformador e aplicando o princípio da dualidade chega-se a um circuito elétrico equivalente que é então inserido no ATP. Foi explanada a metodologia de cálculo utilizada para determinar cada um dos parâmetros empregados neste modelo, incluindo os resultados obtidos para a modelagem do transformador de 15 kVA.

Ao final do referente item apresentou-se também a metodologia de cálculo implementada no modelo do transformador, para análise de densidades de fluxos de dispersão axiais, forças e estresses radiais e forças axiais nos enrolamentos. Esta inserção foi feita através da rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), própria do *software* ATP e será extremamente útil para verificar os parâmetros mencionados, principalmente quando o transformador estiver sendo submetido a altas correntes de curto-circuito “passantes”, bem como as de energização. É importante mencionar neste momento que, as formulações utilizadas são as mesmas empregadas em cálculos analíticos e considerando o enrolamento sem qualquer deformação. Um estudo para o qual o enrolamento esteja deformado pode acarretar em valores errôneos, pois cálculos analíticos para forças e estresses com esta consideração são extremamente complexas. Desta forma, optou-se nesta tese por utilizar outro *software* que possibilite cálculos mais precisos nestas condições operacionais.

Dando continuidade ao capítulo foram apresentadas algumas características do *software* FLUX que emprega o método de elementos finitos em seus cálculos, juntamente com algumas vantagens e desvantagem, sendo esta última destacada pelo tempo de simulação desprendido para análises no domínio do tempo.

No FLUX3D a representação do transformador foi descrito de forma que, ficasse bem claro, que para esta é muito importante o conhecimento de detalhes construtivos bem específicos. Estes, por sua vez, de difícil obtenção, e até mesmo não informados pelo fabricante, como por exemplo, os enrolamentos e seus isolantes. Duas representações foram apresentadas, uma para estudos magnéticos e outra para estudos eletrostáticos.

CAPÍTULO III

ENSAIOS LABORATORIAIS E CÁLCULOS ANALÍTICOS

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os ensaios laboratoriais apresentados neste capítulo serão utilizados, na sequência desta tese, para a validação dos modelos do transformador de 15 kVA, implementados anteriormente no ATP e no FLUX3D.

Assim, nesta etapa serão apresentados resultados de ensaios realizados no transformador em questão, quais sejam: ensaio a vazio, ensaio de curto-circuito com aplicação de tensão reduzida, ensaio de energização e medição das capacitâncias parasitas.

Alguns parâmetros, que serão utilizados como forma de verificar a eficácia dos modelos, serão provenientes de cálculos analíticos, quais sejam: corrente nominal, corrente de curto-circuito trifásico, forças e estresses radiais nos enrolamentos interno e externo, bem como forças axiais, densidade de fluxo em colunas, culatras e dispersão, sendo esta última determinada pelo fluxo entre enrolamentos de uma mesma fase.

É importante mencionar que estes parâmetros, exceto a corrente nominal, para serem obtidos por meios de medições, necessitam de equipamentos específicos, como por exemplo, o uso de “*straingauge*” para a medição de

esforços nos enrolamentos [22]. Outros, por outro lado, podem danificar o equipamento, como no caso do ensaio de curto-circuito trifásico a tensão plena.

As formulações analíticas utilizadas nesta etapa já foram apresentadas no capítulo anterior e se baseiam nas referências [17, 18, 22].

3.2 - ENSAIOS LABORATORIAIS

A Figura 3.1 apresenta, esquematicamente, o arranjo laboratorial básico, utilizado para os seguintes ensaios: a vazio, em curto-circuito com tensão reduzida e de energização.

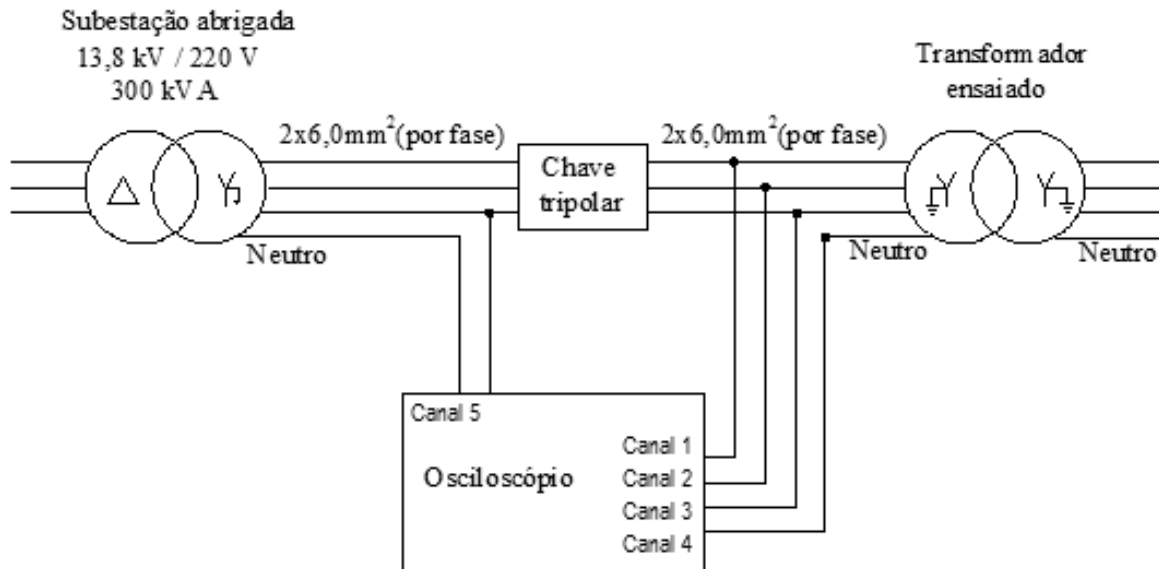


Figura 3.1: Arranjo laboratorial utilizado para a realização das medições.

Um dos principais equipamentos utilizados para realização destes ensaios foi um osciloscópio, o qual possui 16 canais analógicos, sendo 8 deles para tensão e 8 para aquisição das correntes. Ressalta-se que para a visualização das formas de ondas das grandezas medidas foi necessária a utilização de um microcomputador e o *software* gráfico SISREP (Sistema Digital de Registro e Análise de Perturbações), desenvolvido para este fim. Esse programa computacional tem a vantagem de disponibilizar as informações coletadas em

um arquivo do tipo (.TXT), que por sua vez pode ser utilizado pelo programa MATLAB, para também gerar as mesmas formas de onda.

3.2.1 - ENSAIO EM VAZIO

Tomando-se como base a estrutura laboratorial mencionada, o ensaio em vazio foi realizado energizando o enrolamento externo do transformador através de um sistema trifásico de tensão de 220 V (fase-fase), ou seja, a tensão nominal do equipamento, com o enrolamento interno em vazio. As conexões dos enrolamentos, interno e externo, são do tipo estrela com neutro aterrado. Desta forma, as correntes medidas (I_A , I_B e I_C) são mostradas na Figura 3.2. A Tabela 3.1 mostra os valores (pico e eficaz) das correntes e o valor da potência total medida durante o ensaio, ou seja, equivalente às perdas no núcleo.

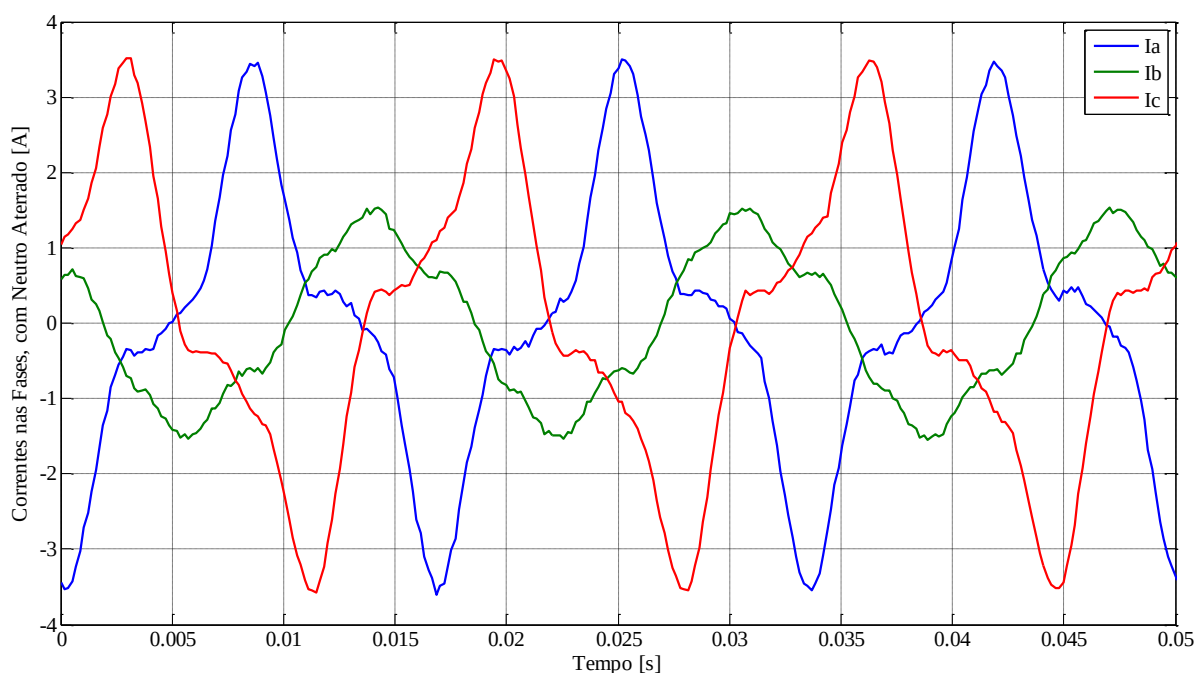


Figura 3.2: Correntes nas três fases do transformador sob ensaio a vazio com neutro aterrado.

Tabela 3.1: Valores (pico e eficaz) das correntes nas três fases do transformador, e perda total, sob ensaio a vazio com neutro aterrado.

I_A [A]		I_B [A]		I_C [A]		P_T [W]
Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	
3,50	1,7604	1,50	0,9611	3,60	1,8663	89,7139

Observando a Figura 3.2 nota-se que a corrente de magnetização que percorre o enrolamento da fase central (Fase B) é menor que as correntes nas fases laterais (Fases A e C). Este fato já era esperado, uma vez que a relutância magnética a ser vencida pelo fluxo gerado por esta corrente é menor na fase central que das demais fases. Observam-se também as distorções harmônicas presentes nas correntes, as quais são provenientes do ciclo de histerese característico do material ferromagnético que constitui o núcleo do transformador.

3.2.2 - ENSAIO DE ENERGIZAÇÃO

De forma análoga ao caso anterior, a energização do transformador foi realizada também pelo enrolamento externo, com a mesma conexão citada anteriormente. A tensão aplicada ao transformador também foi aquela do ensaio em vazio, ou seja, a tensão nominal trifásica de 220 V (fase-fase).

A energização foi feita através do fechamento de uma chave trifásica, que conecta a fonte ao transformador. As medições das tensões nos terminais do equipamento foram obtidas com o auxílio do oscilógrafo. Assim procedendo, pode-se também medir o ângulo de fase da tensão, no momento da energização do transformador. Estes ângulos serão necessários para a simulação computacional desta situação, pois irão proporcionar a simulação computacional no mesmo instante obtido quando da realização dos testes, uma vez que o valor da corrente no ensaio de energização depende do valor instantâneo da tensão no momento em que houve o fechamento da chave. Outro fator que influencia nos

valores das correntes de energização é o possível fluxo residual existente no núcleo do transformador. Para tentar garantir a não existência do mesmo, durante o ensaio aplicou-se tensão aos seus enrolamentos, a qual foi reduzida de forma gradativa e lenta até atingir o valor nulo, de tal maneira a não haver fluxo residual, ou no máximo um valor bem insignificante.

Dentro deste contexto, a Figura 3.3 mostra as formas de onda das tensões em cada fase antes e depois do fechamento da chave. Esta figura foi utilizada para obter os valores dos ângulos de fase no instante de fechamento. A Tabela 3.2 mostra os referidos valores dos ângulos de fase, tendo como base uma forma de onda senoidal. É interessante observar que a deformação na forma de onda da tensão é proveniente de outras cargas conectadas ao transformador supridor e não deverão influenciar significativamente os resultados.

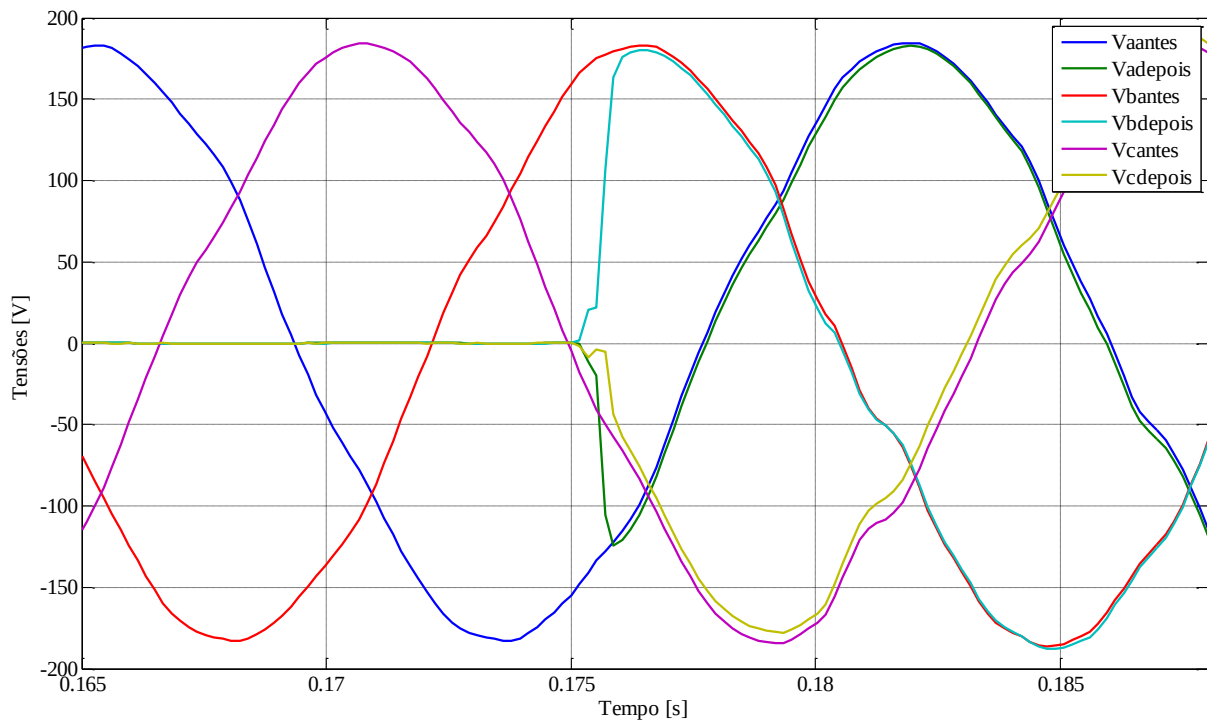


Figura 3.3: Tensões antes e depois do chaveamento nas fases A, B e C.

Tabela 3.2: Ângulos de fase de tensão obtidos na energização do transformador.

Fase	$\theta [^\circ]$
A	-147,4
B	-27,4
C	92,6

As formas de ondas das correntes (I_A , I_B e I_C) obtidas neste ensaio são mostradas na Figura 3.4, sendo os valores do primeiro pico, em cada fase, apresentados na Tabela 3.3. Nota-se que a corrente da Fase C chega a valores próximos de 1000 A, o que é facilmente explicado, pois no instante do chaveamento a tensão naquela fase estava com valor próximo de zero, conforme pode ser visto na Figura 3.3.

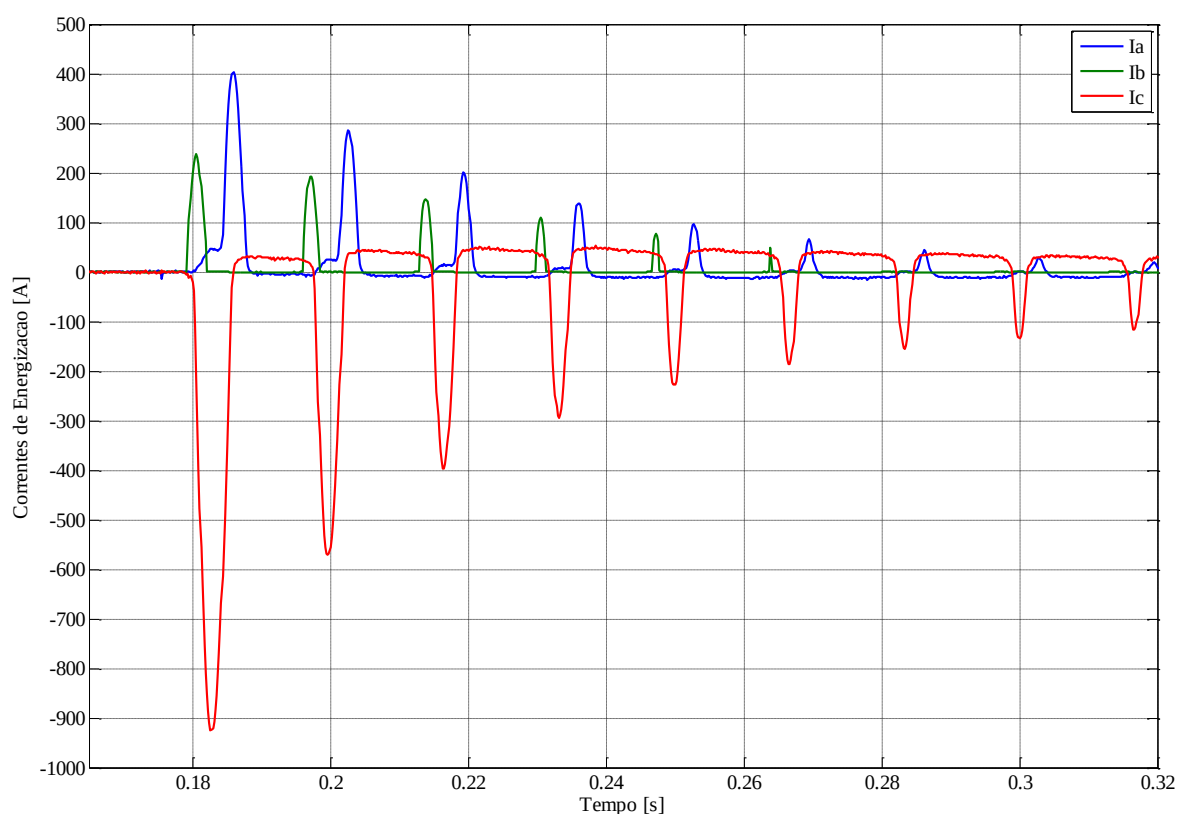
**Figura 3.4: Correntes nas três fases do transformador, sob ensaio de energização.**

Tabela 3.3: Valor do primeiro pico nas correntes das três fases do transformador, sob ensaio de energização.

I_A [A]	I_B [A]	I_C [A]
1º Pico	1º Pico	1º Pico
411,00	240,00	-948,00

3.2.3 - ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA

Tomando-se como base o arranjo experimental já mencionado, esta medição foi realizada energizando o enrolamento externo conectado em estrela com neutro isolado e curto-circuitando o enrolamento interno.

Neste ensaio foi inserido um variador de tensão trifásico entre o transformador e a cabine de força, uma vez que é necessário variar a tensão até que se encontre um valor de corrente igual à nominal. Esta tensão encontrada é a chamada tensão de curto-circuito nominal, que especifica a queda de tensão interna do transformador quando percorrido pela corrente nominal. No entanto, devido às limitações e dificuldades laboratoriais, aplicou-se uma tensão trifásica reduzida de valor aproximadamente igual a 2,5 V, a qual resultou em uma corrente de linha eficaz de aproximadamente igual a 22 A.

Neste tipo de ensaio, as perdas no ferro, por serem proporcionais ao quadrado da indução magnética, possuem valores muito pequenos, podendo portanto ser desprezados. A perda encontrada neste teste representa a dos enrolamentos quando por eles circularem a corrente originada neste ensaio. Dentro do exposto, os valores eficazes das correntes, tensões em cada fase e as perdas joule, obtidas neste ensaio de curto-circuito são mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Valores eficazes de tensão e corrente, nas três fases do transformador, sob ensaio de curto-circuito.

Fase A		Fase B		Fase C		P_T [W]
V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	
2,46	22,5	2,42	22,4	2,36	21,0	95,34

3.2.4 - MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS PARASITAS

As medições das capacitâncias foram realizadas diretamente no transformador, com o auxílio de um medidor de capacitâncias. O equipamento aqui utilizado é um capacímetro da marca Minipa, modelo MC-152.

Sabe-se que as capacitâncias parasitas existentes no transformador dependem da disposição geométrica do núcleo, dos enrolamentos e do tanque do transformador.

No transformador referenciado, considerando os enrolamentos internos como sendo de baixa tensão, e os enrolamentos externos de alta, as capacitâncias parasitas existentes serão assim denominadas: entre enrolamentos de baixa e alta de uma mesma fase (CHX), entre enrolamentos de baixa tensão e núcleo (CX), entre enrolamentos de alta tensão e tanque (CH). Além disso, como este transformador é trifásico, existem ainda as capacitâncias mútuas entre enrolamentos de alta tensão (CAB , CBC , CCA). A título de ilustração, a Figura 3.5 mostra fisicamente o posicionamento das capacitâncias mencionadas.

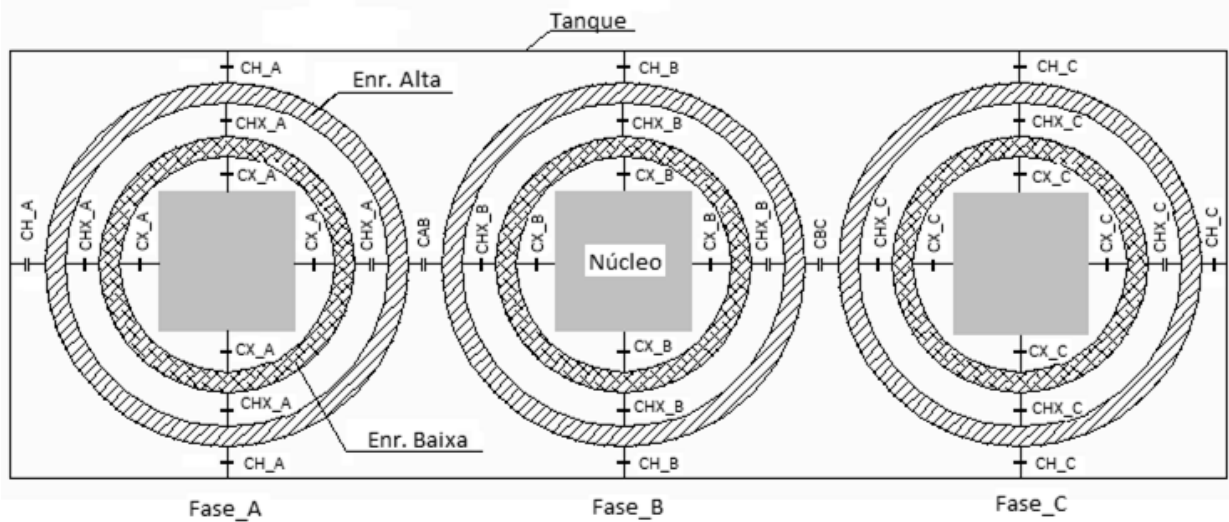


Figura 3.5: Capacitâncias existentes no transformador trifásico.

Tais capacitâncias podem ser obtidas através de cálculos analíticos que empregam a geometria física do transformador [42, 45], através de medições com equipamentos específicos [30], ou ainda por meio da medição de resposta em frequência (FRA) [14-16].

Neste trabalho, optou-se por determinar as capacitâncias parasitas através de medições e considerações matemáticas, analisando o circuito equivalente do transformador.

Ao analisar a Figura 3.5 é possível observar que, dependendo do tipo de conexão dos enrolamentos do transformador, as capacitâncias acima mencionadas podem estar em série ou em paralelo.

A Figura 3.6 mostra o arranjo de capacitâncias obtido da Figura 3.5, onde cada enrolamento é representado por uma indutância e uma resistência cujos valores não são relevantes no momento. As capacitâncias parasitas foram consideradas concentradas para que as análises subsequentes fossem desenvolvidas e compreendidas facilmente.

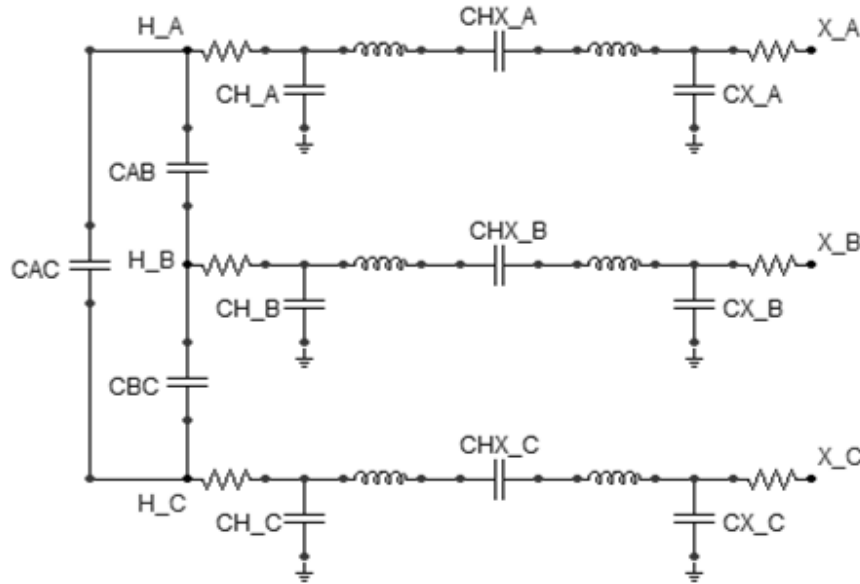


Figura 3.6: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador.

Por se tratar de um equipamento simétrico, é considerado que as capacitâncias entre enrolamentos de alta e tanque (CH), entre o enrolamento de baixa e núcleo (CX), e entre alta e baixa (CHX), são idênticas nas três fases, ou seja, de acordo com a Figura 3.6 tem-se:

$$\begin{aligned} CH_A &= CH_B = CH_C = CH \\ CX_A &= CX_B = CX_C = CX \\ CHX_A &= CHX_B = CHX_C = CHX \end{aligned}$$

Por outro lado, não se pode fazer a mesma consideração para as capacitâncias de acoplamento mútuo, entre os enrolamentos de alta das três fases (CAB, CBC, CAC). Isto é justificado em função da própria geometria do transformador.

Dentro do exposto, mostra-se a seguir o procedimento adotado para a realização das medições com vistas à obtenção das capacitâncias descritas anteriormente.

Medida 1:

Nesta situação, os enrolamentos de alta tensão estão conectados em estrela e aterrados ao tanque do transformador, enquanto que os enrolamentos de baixa tensão são deixados em aberto. A Figura 3.7 apresenta o arranjo capacitivo para esta situação operacional. Observa-se que, pelo fato dos enrolamentos de alta tensão estarem ligados em estrela e aterrado, faz com que as capacitâncias destes enrolamentos para a terra, neste caso, o tanque, sejam curto-circuitados.

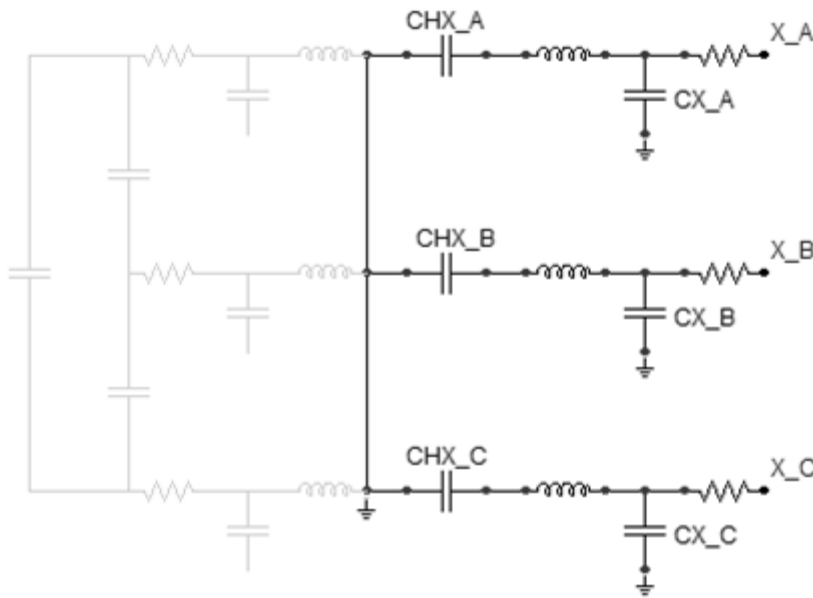


Figura 3.7: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a primeira situação.

Diante do exposto, a medição realizada ($Cm1$) entre o tanque do transformador e qualquer um dos terminais de baixa tensão, fornece a capacitância equivalente do paralelo das capacitâncias entre os enrolamentos de alta e baixa (CHX), e o enrolamento baixa e núcleo (CX). Esta associação de capacitâncias é apresentada na Equação 3.1.

$$Cm1 = CX + CHX \quad (3.1)$$

Medida 2:

A segunda medição é realizada conectando-se os enrolamentos de alta tensão em estrela, porém desconectado do tanque, enquanto que os enrolamentos da baixa tensão são deixados novamente em aberto. Nesta condição, as capacitâncias mútuas, ou seja, aquelas existentes entre enrolamentos de alta podem ser desconsideradas. Isto ocorre pelo fato de que caso seja aplicado uma tensão em apenas um dos enrolamentos de alta, o potencial elétrico nos três enrolamentos será o mesmo, não havendo desta forma uma diferença de potencial entre eles que justifique a existência das capacitâncias mútuas. A Figura 3.8 apresenta o novo arranjo capacitivo para esta situação.

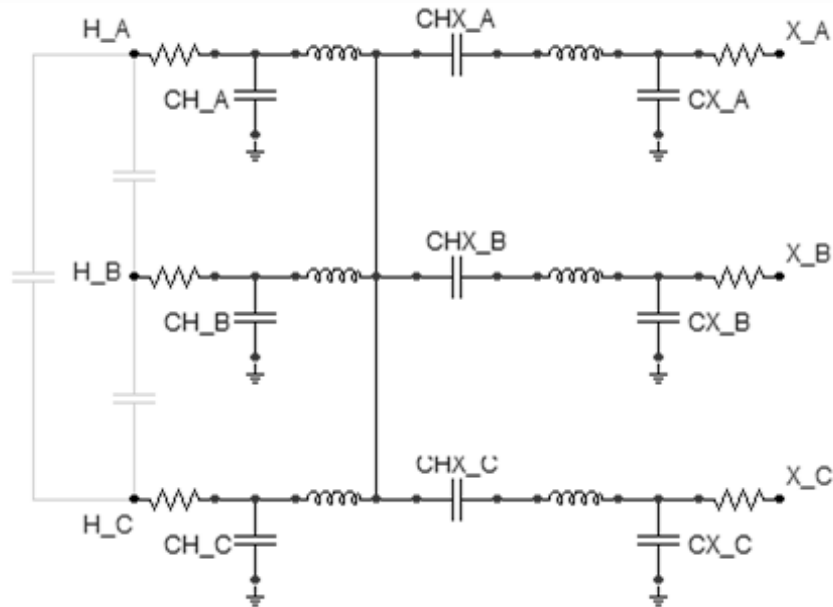


Figura 3.8: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a segunda situação.

Neste caso, a medição obtida refere-se à capacitância entre qualquer terminal de alta e o tanque do transformador (C_{m2}). No entanto, este valor está associado à capacitância equivalente entre a capacitância de alta (CH) em paralelo com as capacitâncias equivalentes entre os enrolamentos de alta e baixa tensão (CHX) e baixa tensão e núcleo (CX), as quais estão associadas em série. Entretanto, como os enrolamentos de alta tensão estão conectados em estrela, o

valor resultante deve ser multiplicado por três. Desta forma, a Equação 3.2 indica matematicamente a situação comentada anteriormente.

$$C_{m2} = 3 * \left[CH + \left(\frac{CHX * CX}{CHX + CX} \right) \right] \quad (3.2)$$

Medida 3:

Na terceira medição, o enrolamento de alta continua ligado em estrela isolado, enquanto que o enrolamento de baixa é conectado em estrela aterrado, ou seja, conectado ao tanque. A Figura 3.9 apresenta o arranjo capacitivo para a realização desta medição.

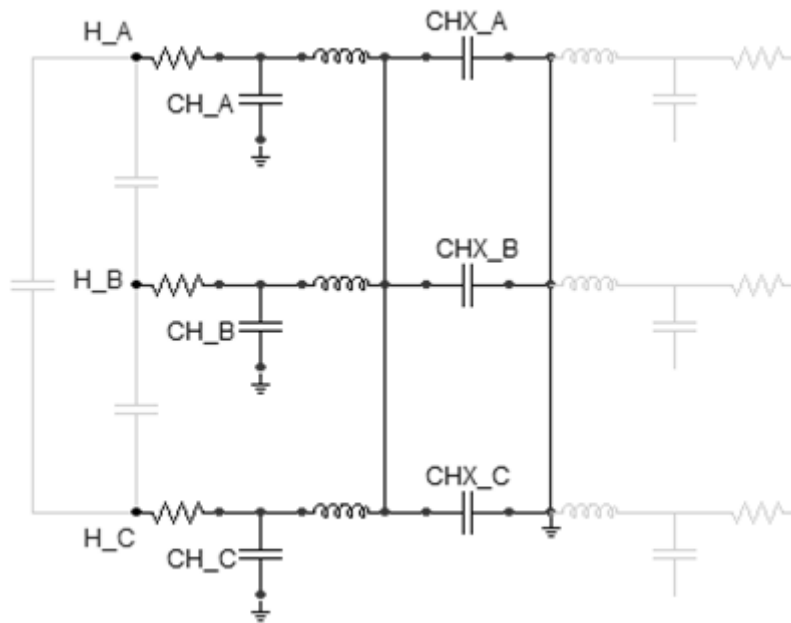


Figura 3.9: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a terceira situação.

Nestas condições, mede-se a capacitância entre qualquer terminal do enrolamento de alta e o tanque (C_{m3}). Assim, as medições efetuadas referem-se ao equivalente entre o paralelo da capacitância do enrolamento de alta e o tanque (CH) e aquela existente entre o enrolamento de alta e baixa (CHX). Novamente, pelo fato do enrolamento de alta tensão estar conectado em estrela

isolado, esta relação deve ser multiplicada por três. A Equação 3.3 mostra a relação obtida referente à medição 3.

$$Cm3 = 3 * (CH + CHX) \quad (3.3)$$

Desta forma, o sistema formado pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3 é rearranjado aplicando alguns conhecimentos algébricos. Após tal adaptação, é possível se obter o valor da capacitância entre o enrolamento de alta e baixa do transformador, conforme apresentado na Equação 3.4.

$$CHX = \sqrt{Cm1 * \left(\frac{Cm3 - Cm2}{3} \right)} \quad (3.4)$$

Retornando às Equações 3.1 e 3.3, e substituindo o valor de CHX , encontram-se os valores de CX e CH , ou seja, os valores das capacitâncias entre o enrolamento de baixa e o núcleo, e o enrolamento de alta e o tanque, respectivamente.

Com base no que foi apresentado até agora, realizou-se as medições especificadas no transformador sob teste para determinar tais capacitâncias. A Tabela 3.5 apresenta os valores encontrados nas três medições, e a Tabela 3.6 os parâmetros calculados através das equações descritas anteriormente.

Tabela 3.5: Parâmetros obtidos através de medições

Medição	Parâmetro Medido	Valor Obtido [pF]
1	$Cm1$	466,67
2	$Cm2$	590,00
3	$Cm3$	727,00

Tabela 3.6: Parâmetros calculados através da metodologia analítica

Capacitância	Valor Obtido [pF]
CHX	145,984
CX	320,686
CH	96,35

No entanto, as capacitâncias de acoplamento mútuo entre fases do lado de alta não foram consideradas, ou seja: as capacitâncias existentes entre os enrolamentos de alta tensão das fases A e B (C_{AB}), das fases B e C (C_{BC}), e finalmente entre as fases A e C (C_{AC}). Desta forma, apresenta-se a seguir uma série de outras medições necessárias e suficientes para a obtenção dos valores dos parâmetros mencionados.

Medição 4:

Para este conjunto de medições, o lado de alta tensão, da Fase A, é deixado em aberto, sendo que as Fases B e C são aterradas junto ao tanque. O lado de baixa tensão é ligado em estrela aterrado. A Figura 3.10 mostra o circuito equivalente do transformador para esta situação.

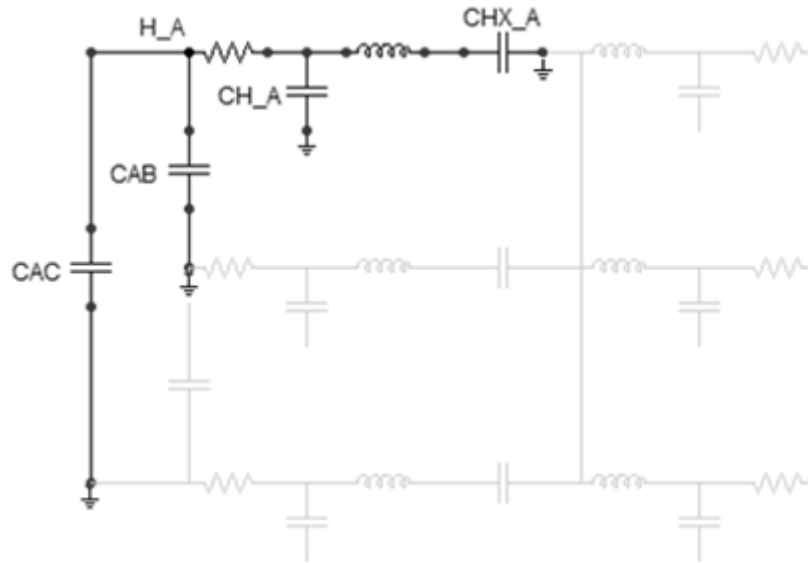


Figura 3.10: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a primeira medição das capacitâncias de acoplamento.

Assim, mede-se a capacitância (C_{mm1}) entre o terminal de alta da Fase A (H_A) e o tanque do transformador. O valor encontrado refere-se à capacitância equivalente entre as capacitâncias C_{AB} , C_{AC} , C_H e C_{HX} , as quais encontram-se em paralelo. Esta situação é esclarecida pela Equação 3.5.

$$C_{mm1} = CH + CHX + CAB + CAC \quad (3.5)$$

Medição 5:

Esta medição segue o mesmo procedimento adotado na medição anterior; porém, nesta situação a Fase B do enrolamento do lado de alta tensão é deixada em aberto. A Figura 3.11 mostra o circuito equivalente do equipamento para essa medição.

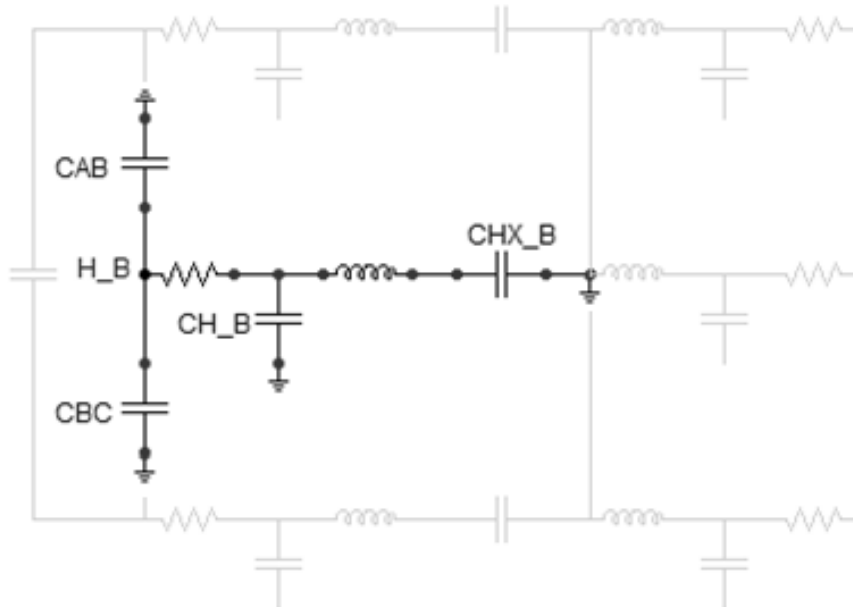


Figura 3.11: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a segunda medição das capacitâncias de acoplamento.

De forma análoga à medição 4, a capacitância equivalente medida (C_{mm2}) entre o terminal de alta da Fase B (H_B) e o tanque é a associação paralela das capacitâncias CAB , CBC , CH e CHX , conforme mostra a Equação 3.6.

$$C_{mm2} = CH + CHX + CAB + CBC \quad (3.6)$$

Medição 6:

Finalmente, a fase C da bobina de alta tensão é deixada em aberto, enquanto que, as fases A e B do mesmo enrolamento são conectadas ao tanque. Nesta situação, a medição entre o terminal (H_C) e o tanque, fornece uma capacitância resultante (C_{mm3}) do paralelo entre as capacitâncias CAC , CBC , CH e CHX . A Figura 3.12 mostra o circuito equivalente para a referida situação.

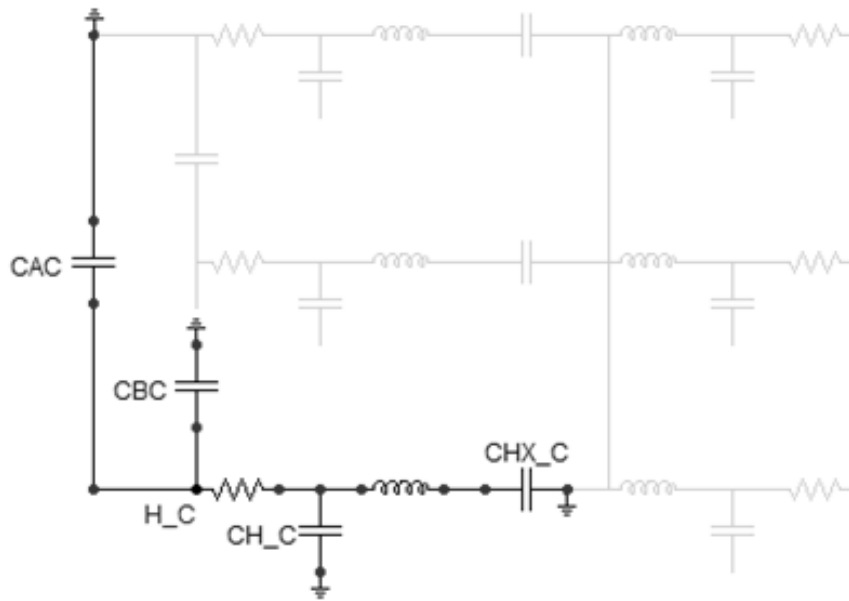


Figura 3.12: Arranjo das capacitâncias parasitas no transformador para a terceira medição das capacitâncias de acoplamento.

A Equação 3.7 apresenta a capacitância resultante para esta medição.

$$C_{mm3} = CH + CHX + CAC + CBC \quad (3.7)$$

Rearranjando o sistema baseado nas Equações 3.15, 3.16 e 3.17, pode-se determinar os valores de cada uma das capacitâncias de acoplamento mútuo entre as fases do lado de alta tensão do transformador através das Equações 3.8, 3.9 e 3.10.

$$C_{AB} = \frac{C_{mm1} + C_{mm2} - C_{mm3} - CH - CHX}{2} \quad (3.8)$$

$$C_{BC} = \frac{C_{mm2} + C_{mm3} - C_{mm1} - CH - CHX}{2} \quad (3.9)$$

$$C_{AC} = \frac{C_{mm1} + C_{mm3} - C_{mm2} - CH - CHX}{2} \quad (3.10)$$

Após a realização das medições citadas, a título de ilustração, mostram-se na Tabela 3.7 os valores obtidos para as referidas capacitâncias equivalentes.

Tabela 3.7: Parâmetros obtidos através de medições

Medida	Parâmetro Medido	Valor Obtido [pF]
4	C_{mm1}	266
5	C_{mm2}	288
6	C_{mm3}	268

A Tabela 3.8 apresenta os valores obtidos para as capacitâncias mútuas através da metodologia analítica, baseada nas medições experimentais.

Observa-se que o valor da capacitância entre as Fases A e C do enrolamento da alta tensão é bem menor que aqueles calculados para as Fases AB e BC. Além disso, tem-se que as capacitâncias para as Fases AB e BC são praticamente iguais. Este fato é explicado pela geometria do transformador, ou seja, as distâncias entre as Fases AB e BC são praticamente iguais, e a distância entre as Fases A e C é muito maior.

Tabela 3.8: Parâmetros calculados através da metodologia analítica

Capacitância	Valor Obtido [pF]
C_{AB}	21,833
C_{BC}	23,833
C_{AC}	1,833

3.3 - CÁLCULOS ANALÍTICOS

Dentre os parâmetros que serão utilizados para verificar a eficiência dos modelos do transformador de 15 kVA, estão aqueles provenientes da condição nominal, ou seja: corrente, densidades de fluxos nas colunas, culatras e dispersão. Pelo fato de tais parâmetros serem obtidos de forma clássica e conhecida [10, 17, 18], optou-se apenas por indicá-los na Tabela 3.9, onde vale ressaltar que a densidade de fluxo de dispersão é obtida com o auxílio da Equação 2.6.

Tabela 3.9: Corrente e densidades de fluxo nominais.

Corrente nominal	Pico	55,7 A
	Eficaz	39,39 A
Densidade de fluxo	Coluna	1,52 T
	Culatra	1,44 T
	Dispersão	27,66 mT

A outra condição de operação, cujos parâmetros são calculados analiticamente, é a de curto-circuito trifásico a tensão plena. Neste caso, será utilizada a metodologia empregada nas referências [17, 18] e apresentada de forma resumida na seção 2.4.4 do capítulo anterior.

A Tabela 3.10 mostra os valores da corrente de curto-circuito trifásico, bem como a densidade de fluxo de dispersão.

Tabela 3.10: Corrente e densidade de fluxo durante curto-circuito trifásico.

Corrente de curto-circuito trifásico	Pico	1755 A
Densidade de fluxo	Dispersão	871,6 mT

As Tabelas 3.11 e 3.12 apresentam os resultados obtidos para as forças e estresses radiais, respectivamente, em cada um dos enrolamentos para a corrente acima calculada. Tais parâmetros são obtidos através das Equações 2.7 a 2.9.

Tabela 3.11: Resultados obtidos para força radial – Transformador 15 kVA.

Enrolamento	Força Radial Total (F_r) [N]	Força Radial Média (F_{rmed}) [N]
Interno	15.521,6	4.940,8
Externo	22.658,2	7.212,33

Tabela 3.12: Estresses causados pela força radial – Transformador 15 kVA.

Estresse Radial Calculado	Valor [N/m^2]
Estresse radial no enrolamento interno ($\sigma_{r-medio}$)	0,24 x 10 ⁷
Estresse radial no enrolamento externo ($\sigma_{r-medio}$)	0,35 x 10 ⁷

A Tabela 3.13 apresenta os resultados referentes às forças axiais obtidas pelas Equações 2.10 a 2.12.

Tabela 3.13: Resultados obtidos para força axial – Transformador 15 kVA.

Força Axial Calculada	Valor [N]
Força Compressiva Total (F_{cTotal})	2.788
Força Compressiva Enrolamento Interno (F_{c-i})	1.859
Força Compressiva Enrolamento Externo (F_{c-e})	929

3.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi utilizado para apresentar os resultados de medições laboratoriais realizadas no transformador de 15 kVA, bem como cálculos analíticos de alguns parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos. Estes serão comparados, na etapa seguinte desta tese, com os obtidos através de simulações computacionais dos modelos implementados no ATP e no FLUX3D. Tais comparações irão propiciar a validação das referidas modelagens.

As medições realizadas no transformador foram: ensaio em vazio, energização, curto-circuito com tensão reduzida e medições das capacitâncias intrínsecas.

Os cálculos analíticos foram utilizados para determinar os parâmetros que não puderam ser obtidos via medições, ou seja: correntes para condição de carga nominal, correntes para curto-circuito trifásico assimétrico, forças radiais, radiais médias e axiais, além do estresse radial, nos enrolamentos interno e externo. Densidades de fluxos de dispersão também foram calculadas para os casos onde o transformador opera com carga nominal e em curto-circuito trifásico com tensão plena.

CAPÍTULO IV

VALIDAÇÃO DAS MODELAGENS DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA NO ATP E NO FLUX3D

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dando continuidade aos estudos propostos nesta tese, no presente capítulo será apresentada a validação das modelagens do transformador de 15 kVA descritas no Capítulo II.

Tendo em vista tal propósito, os modelos foram simulados nas mesmas condições operacionais dos ensaios laboratoriais e cálculos analíticos, explanados no capítulo anterior, ou seja: em vazio, curto-circuito com tensão reduzida e tensão plena, energização, com carga nominal e eletrostático. Vale ressaltar que este último foi realizado apenas no FLUX3D, para a aquisição das capacitâncias parasitas.

Na sequência, os resultados obtidos computacionalmente, no ATP e no FLUX3D, são confrontados com aqueles adquiridos via medições laboratoriais e analiticamente.

4.2 - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Apresentam-se nesta seção, as descrições das simulações computacionais efetuadas nos *softwares* ATP e FLUX3D, conforme pode ser visto na Tabela 4.1. Em todos os casos foram respeitadas as mesmas condições de fonte e conexão de enrolamento, impostas nas medições, as quais já foram devidamente explanadas no capítulo anterior.

Tabela 4.1: Descrição dos casos simulados

CASOS SIMULADOS	ENROLAMENTO EXTERNO	ENROLAMENTO INTERNO
Operação a vazio	Estrela aterrada, conectado a fonte	Estrela aterrada, em vazio
Operação nominal	Estrela aterrada, conectado a fonte	Estrela aterrada, conectado a uma carga trifásica equilibrada, com fator de potência de 0,95 indutivo.
Operação em curto-circuito com tensão reduzida	Estrela não aterrada, conectado a fonte	Estrela aterrada, em curto-circuito
Operação em curto-circuito trifásico “passante”	Estrela aterrada, conectado a fonte	Estrela aterrada, em curto-circuito
Energização do transformador	Estrela aterrada, em vazio	Estrela aterrada, conectado a fonte
Eletrostático	Tensão imposta de 0V e/ou de 1V	Tensão imposta de 0V e/ou de 1V

Em cada caso mencionado na Tabela acima são analisados alguns parâmetros nos modelos que se julgam importantes, conforme indicado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Descrição dos parâmetros analisados nos casos simulados

CASOS SIMULADOS	PARÂMETROS ANALISADOS
Operação em vazio	- Valores de correntes nos enrolamentos internos em cada uma das fases; - Perdas no núcleo; - Densidade de fluxo magnético nas colunas e culatras no núcleo do transformador.
Operação nominal	- Valores de correntes nos enrolamentos internos e externos em cada uma das fases; - Densidade de fluxo magnético nas colunas e culatras no núcleo do transformador, bem como a de dispersão; - Potência consumida pela carga.
Operação em curto-circuito com tensão reduzida	- Valores de eficazes das correntes nos enrolamentos externos em cada uma das fases; - Perdas nos enrolamentos; - Densidade de fluxo magnético nas colunas e culatras no núcleo do transformador, bem como a de dispersão.
Operação em curto-circuito trifásico “passante”	- Valores de correntes nos enrolamentos internos e externos em cada uma das fases; - Densidade de fluxo magnético nas colunas e culatras no núcleo do transformador, bem como a de dispersão; - Forças e estresses radiais eletromecânico nos enrolamentos internos e externos; - Forças axiais nos enrolamentos internos e externos.
Energização do transformador	- Valor do pior caso de corrente no enrolamento interno; - Densidade de fluxo magnético na coluna, bem como a de dispersão para a fase com maior corrente; - Forças e estresses radiais eletromecânico, no enrolamento interno, da referida fase; - Forças axiais no enrolamento interno da referida fase.
Eletrostático	- Valores das capacitâncias intrínsecas entre coluna e enrolamento interno, enrolamento interno e externo, enrolamento externo e tanque.

Algumas ponderações, comuns às simulações realizadas, serão aqui explicitadas uma única vez para que o texto não se torne repetitivo. Os circuitos básicos inseridos nos *softwares* ATP e FLUX3D podem ser vistos na Figura 4.1 (a) e (b), respectivamente. Entretanto, caso exista alguma alteração na referida figura, esta será imediatamente indicada no decorrer do texto.

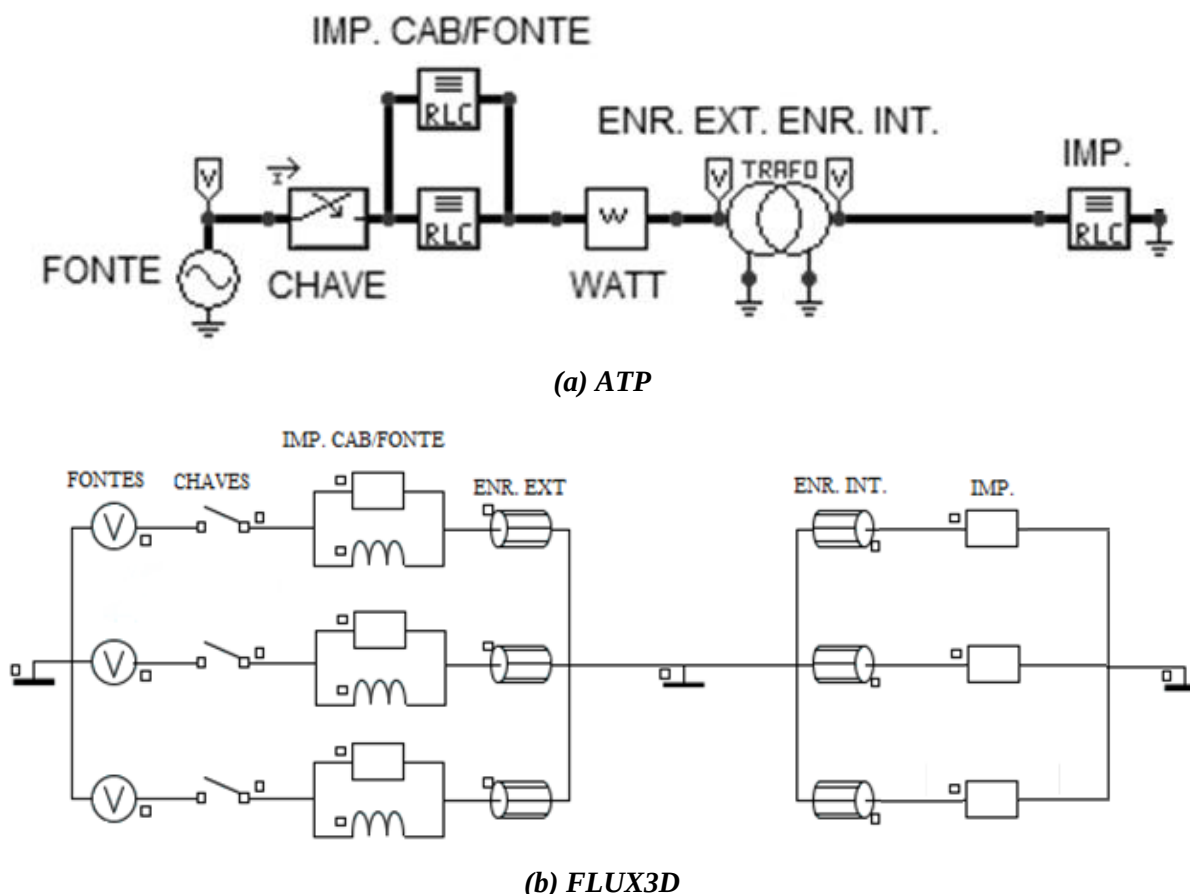


Figura 4.1: Circuitos utilizados durante as simulações.

Nesta figura deve-se observar que:

- A fonte de tensão será sempre trifásica, equilibrada e com valor de 220 V (Fase-Fase). Pelo fato do FLUX3D não possuir uma fonte trifásica, esta será representada por três fontes monofásicas defasadas entre si, de 120°;
- As impedâncias do transformador de 300 kVA, bem como as dos cabos utilizados nas medições também serão representadas em ambos os *softwares* e em todas as condições operacionais. Tais impedâncias são inseridas após as chaves e representadas através de uma resistência e uma indutância em paralelo. Este procedimento é adotado como uma forma de se evitar possíveis instabilidades numéricas durante chaveamentos.
- Em todas as simulações será inserida uma chave que no caso do ATP é trifásica, e novamente no FLUX3D monofásica. Tais chaves são

importantes para a realização dos casos em que se deseja observar o transitório, ou seja, curto-circuito trifásico e energização (*inrush*);

- Nos casos do transformador operando em vazio, nominal e em curto-circuito com tensão reduzida, no ATP é inserido um Wattímetro para a aquisição das respectivas potências. No caso do FLUX3D estas são obtidas através de ferramentas internas ao *software*;
- Uma impedância é sempre conectada ao enrolamento que não esteja sendo energizado. Tal impedância será de $1E-8\Omega$ para o caso do enrolamento ser considerado curto-circuitado e de $1E8\Omega$ quando estiver operando em vazio.
- Nos casos considerados em regime permanente, ou seja: vazio, curto-circuito com tensão reduzida e nominal, as formas de ondas não serão apresentadas por não possuírem diferenças das já esperadas. Nestes casos serão ponderados apenas os valores que se julgam importantes para a validação dos modelos;
- Para cada caso simulado serão indicados os resultados obtidos simultaneamente no ATP e no FLUX3D, para que as comparações fiquem mais fáceis de serem visualizadas.

4.3 - RESULTADOS OBTIDOS COMPUTACIONALMENTE

A) SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO A VAZIO

Neste caso, a simulação é realizada com as mesmas condições impostas durante a referida medição, ou seja, o transformador foi alimentado pelo enrolamento externo, e o enrolamento interno teve suas três fases deixadas em vazio através da impedância indicada anteriormente.

A.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de pico e eficazes das correntes nos enrolamentos externos e a perda no núcleo, obtidas nos *softwares* ATP e FLUX3D.

Tabela 4.3: Síntese de alguns resultados da simulação do ensaio a vazio.

Software	I _A [A]		I _B [A]		I _C [A]		P _T [W]
	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	
ATP	3,51	2,48	1,49	1,05	3,62	2,56	88,96
FLUX3D	3,48	2,46	1,54	1,09	3,57	2,52	86,89

A.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As densidades de fluxos magnéticos para colunas e culatras são mostradas na Tabela 4.4. É importante mencionar que, para este caso, a densidade referente à dispersão não é analisada por possuir valores desprezíveis.

Tabela 4.4: Síntese dos valores de densidades de fluxos magnéticos no núcleo para o ensaio a vazio.

Software	B _{COL} [T]	B _{CUL} [T]
ATP	1,44	1,37
FLUX3D	1,45	1,39

B) SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL

Para a realização desta simulação foi conectada uma carga trifásica equilibrada, com 0,95 de fator de potência indutivo e uma potência de 15 kVA no enrolamento interno.

B.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Tabela 4.5 indica os valores obtidos (pico e eficaz) para as correntes nos enrolamentos externos e internos, em cada uma das fases, bem como a potência consumida pela carga.

Tabela 4.5: Valores de correntes (pico e eficaz) para os enrolamentos externos e internos, e potência consumida para simulação na condição nominal.

Software	Enrolamento	I _A [A]		I _B [A]		I _C [A]		Potência Consumida [W]
		Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	
ATP	Externo	54,83	38,77	54,00	38,18	55,15	38,99	13.256,00
	Interno	53,40	37,76	53,45	37,79	53,40	37,76	
FLUX3D	Externo	54,45	38,50	54,18	38,31	54,90	38,82	13.350,46
	Interno	53,47	37,81	53,49	37,82	53,50	37,83	

B.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As densidades de fluxo para coluna, culatra e de dispersão são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Densidade de fluxo para colunas, culatras e dispersão no transformador, na condição nominal.

Software	B _{COL} [T]	B _{CUL} [T]	B _{DISP_A} [mT]	B _{DISP_C} [mT]	B _{DISP_C} [mT]
ATP	1,41	1,35	27,23	26,82	27,93
FLUX3D	1,42	1,38	26,65	26,33	26,62

C) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA

Para esta simulação foi necessário realizar uma adaptação ao circuito do ATP, apresentado na Figura 4.1. A fonte trifásica é substituída por três monofásicas. Este procedimento foi adotado, pois conforme delineado na Tabela 3.4, as tensões aplicadas em cada uma das fases são diferentes entre si nesta condição operacional. Obviamente, para verificar a eficácia dos modelos aplicaram-se os respectivos valores de tensão, em cada uma das fases.

C.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Tabela 4.7 detalha as correntes (eficazes), obtidas em cada uma das fases do enrolamento externo, além da perda obtida no referido ensaio e as tensões aplicadas no enrolamento mencionado, em cada um dos *softwares*.

Tabela 4.7: Valores de corrente eficaz e tensão aplicada aos enrolamentos externos, e perda no transformador, para a simulação de curto-circuito com tensão reduzida.

Software	Fase A		Fase B		Fase C		P _T [W]
	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	
ATP	2,46	22,11	2,42	21,55	2,36	20,92	96,22
FLUX3D	2,46	22,07	2,42	21,71	2,36	21,6	100,24

C.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Dando continuidade a análise desta simulação, segue na Tabela 4.8 um resumo dos valores das densidades de fluxos nas colunas, culatras e de dispersão.

Tabela 4.8: Densidade de fluxo para colunas, culatras e dispersão no transformador, na condição de curto-circuito com tensão reduzida.

Densidade de Fluxo	ATP	FLUX3D
B _{COL_A} [mT]	7,23	6,76
B _{COL_B} [mT]	7,09	7,88
B _{COL_C} [mT]	6,96	8,16
B _{CUL_AB} [mT]	21,73	20,00
B _{CUL_BC} [mT]	21,28	19,88
B _{DISP_A} [mT]	15,53	15,40
B _{DISP_B} [mT]	15,15	15,43
B _{DISP_C} [mT]	14,69	15,04

D) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”

Nesta simulação o transformador foi alimentado pelo enrolamento externo e o enrolamento interno teve suas três fases curtos-circuitadas no instante ($t = 0s$).

D.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Figura 4.2 (a) apresenta as correntes nos enrolamentos externos e interno, em cada uma das fases do transformador obtidas através da simulação no ATP. A Figura 4.2 (b) mostra as mesmas variáveis só que provenientes da simulação realizada no FLUX3D.

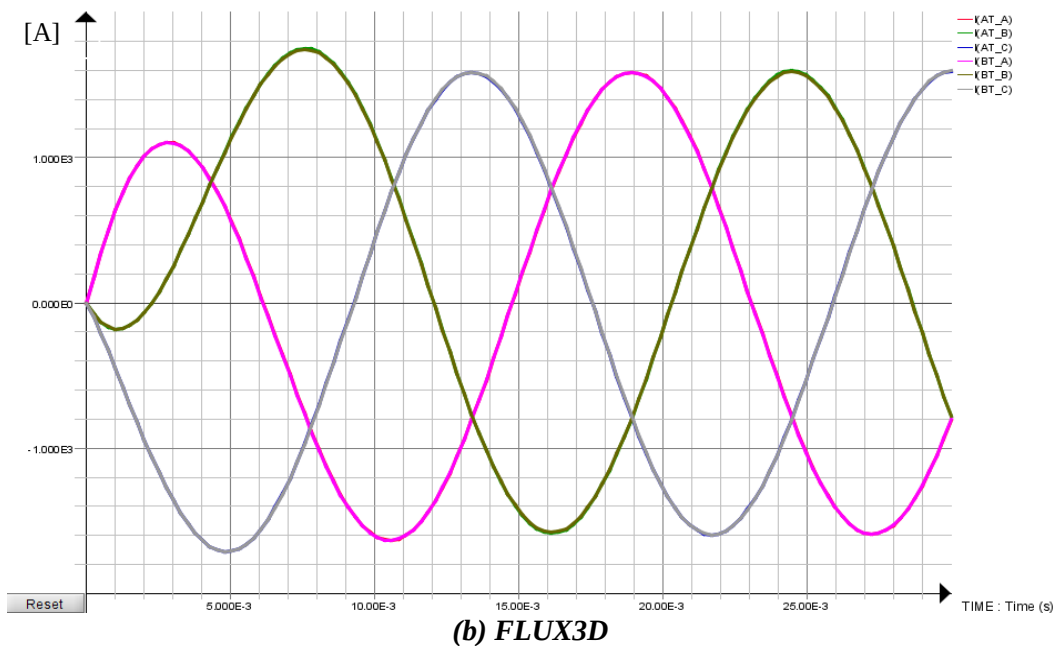
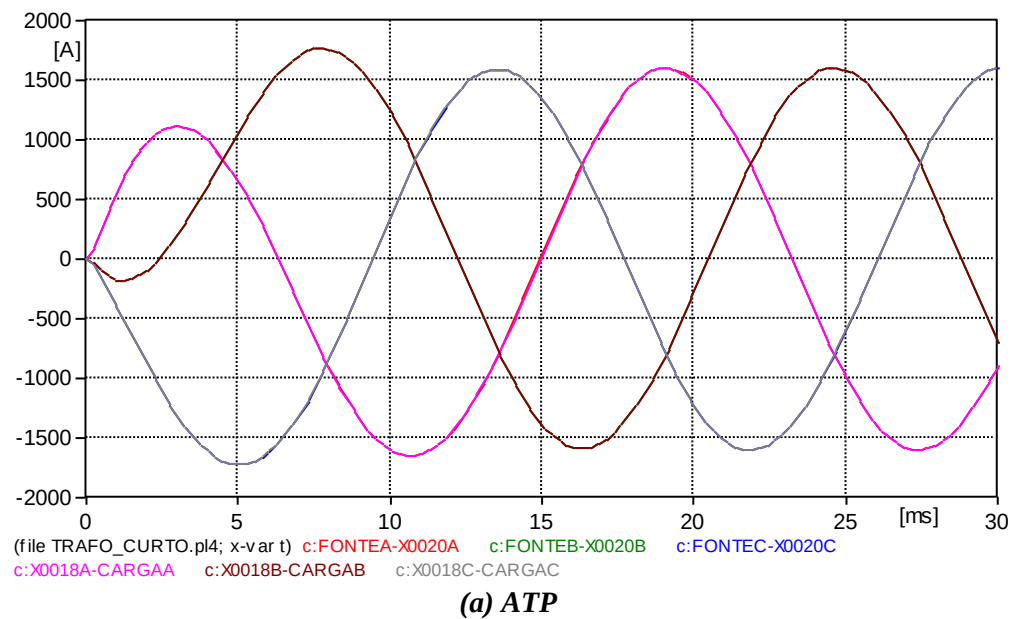


Figura 4.2: Correntes nas três fases dos enrolamentos externos e internos durante um curto-circuito trifásico "passante".

A Tabela 4.9 indica os valores máximos obtidos em cada uma das correntes visualizadas nas Figuras 4.2 (a) e (b).

Tabela 4.9: Síntese dos valores do primeiro pico para as correntes do ensaio em curto-circuito "passante".

Software	Enrolamento Externo			Enrolamento Interno		
	I _a [A]	I _b [A]	I _c [A]	I _a [A]	I _b [A]	I _c [A]
ATP	1644,7	1762,6	1724,1	1646,7	1762,0	1722,8
FLUX3D	1630,59	1747,94	1699,38	1632,73	1735,9	1702,07

D.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Continuando as análises para o estudo computacional do curto-circuito “passante”, a Tabela 4.10 mostra o valor máximo das densidades de fluxo, nas colunas e culatras do transformador, em ambos os *softwares*.

Tabela 4.10: Densidades de fluxos para colunas e culatras, do transformador, na condição de curto-circuito trifásico “passante”.

Software	Coluna			Culatra	
	B _{COL_A} [T]	B _{COL_B} [T]	B _{COL_C} [T]	B _{CUL_AB} [T]	B _{CUL_BC} [T]
ATP	0,39	0,90	0,87	1,17	1,64
FLUX3D	0,39	0,89	0,87	1,24	1,49

A Tabela 4.11 detalha os valores máximos, obtidos em cada um das fases, para as densidades de fluxo de dispersão.

Tabela 4.11: Densidades de fluxos de dispersão, do transformador, na condição de curto-circuito trifásico “passante”.

Software	Dispersão		
	B _{DISP_A} [T]	B _{DISP_B} [T]	B _{DISP_C} [T]
ATP	0,818	0,875	0,856
FLUX3D	0,807	0,845	0,830

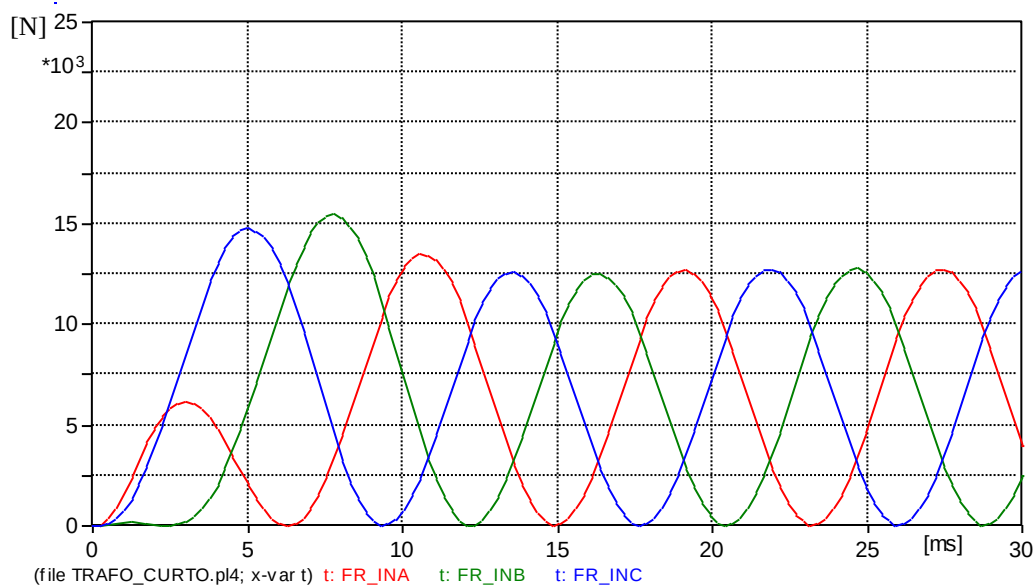
Conforme observado nas Tabelas 4.9 e 4.11 as correntes que circulam pelos enrolamentos, bem como as densidades de fluxo de dispersão possuem valores bem elevados, quando comparados com os respectivos valores nominais. Este fato leva a ocorrência de forças elevadas nos enrolamentos, as quais podem causar deformações nos mesmos, bem como sua destruição.

Desta forma, as próximas variáveis a serem avaliadas são as forças e estresses radiais, bem como as forças axiais.

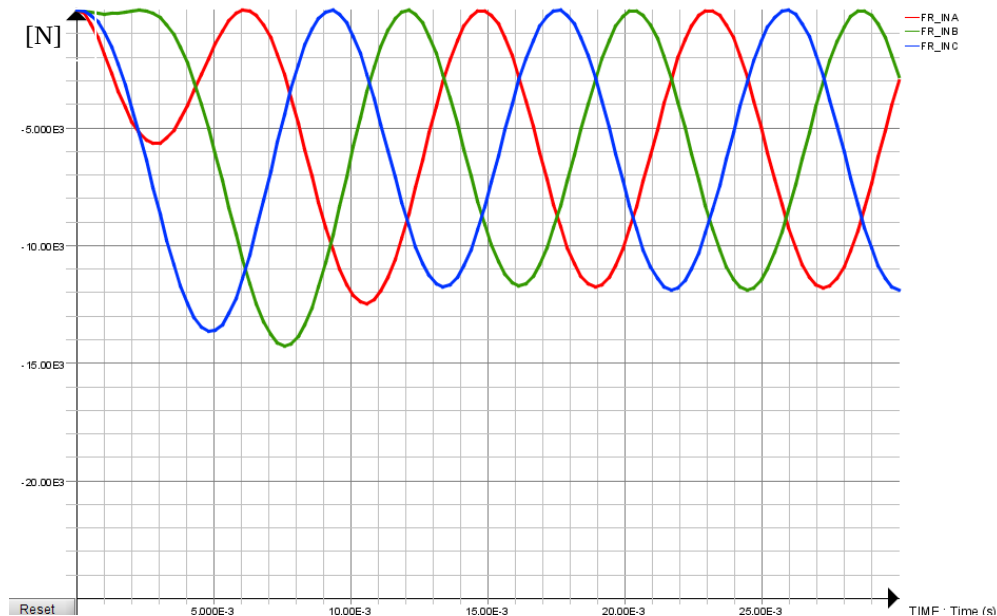
D.3) GRANDEZAS MECÂNICAS

Pelo fato das forças radiais médias e estresse radial médio serem função da força radial total no enrolamento sob estudo, como pode ser observado nas Equações de 2.7 a 2.9, optou-se por apresentar na sequência apenas as formas de ondas das forças radiais totais no enrolamento interno no ATP e no FLUX3D, sendo os demais parâmetros apresentados apenas em tabela. A Figura 4.3 (a) e (b) mostram os resultados supracitados.

Nota-se em tais figuras que as forças obtidas no ATP são positivas, fato este explicado facilmente pela formulação inserida no modelo, ou seja, como tal força depende da corrente elevada ao quadrado, o valor adquirido será sempre positivo. Este fato não ocorre no FLUX3D, pois neste *software* a metodologia de cálculo, para a determinação da força eletromagnética, leva em consideração o produto vetorial entre a densidade de corrente que circula pelo enrolamento e a densidade de fluxo de dispersão ao qual este enrolamento encontra-se submetido.



(a) ATP



(b) FLUX3D

Figura 4.3: Forças radiais totais nos enrolamentos internos, sob condição de curto-circuito trifásico “passante”.

O valor negativo desta força, obtido no FLUX3D, indica o sentido da mesma, ou seja, para o enrolamento interno a força radial está no sentido oposto aos eixos “x” e “y”, submetendo o referido enrolamento a um estresse de compressão, conforme já previsto em [18]. Esta mesma análise é válida para as forças radiais médias e estresses radiais.

Para o caso dos enrolamentos externos, estas forças são positivas também no FLUX3D. Isto indica que as mesmas estão no sentido positivo dos eixos “x” e “y”. Tal condição impõe aos enrolamentos externos forças e estresses radiais de tração, conforme esperado [18].

Neste contexto, aponta-se aqui um detalhe importante sobre a análise da força total e média radial, bem como o estresse radial nos enrolamentos quando se emprega a metodologia analítica no ATP. Esta apresentará resultados sempre positivos não indicando o sentido da mesma, ou seja, compressão ou tração. Diferente do que ocorre quando se utiliza o *software* FLUX3D.

As forças axiais compressivas totais obtidas pelo ATP, tanto para o enrolamento interno quanto para o externo, também são positivas, conforme explicado anteriormente. No FLUX3D os valores são negativos, indicando que as mesmas ocorrem em sentido oposto ao positivo do eixo “z”.

A Tabela 4.12 apresenta os módulos dos valores máximos obtidos através desta simulação para as forças radiais totais (FR), radiais médias (FRM) e estresses radiais médios (ERM), em cada um dos enrolamentos, em ambos os *softwares*. Além dos valores das forças axiais compressivas totais (FACTO) e em cada um dos enrolamentos (FACTI e FACTE).

Tabela 4.12: Módulo das forças e estresses para a condição de curto-circuito trifásico “passante”.

Parâmetro	ATP			FLUX3D		
	A	B	C	A	B	C
FR_IN [N]	13665	15646	14957	12422,67	14167,39	13504,01
FRMIN [N]	4349,70	4980,28	4760,96	3954,26	4509,62	4298,46
ERMIN [N/m²]	2,09E6	2,40E6	2,30E6	1,9E6	2,17E6	2,07E6
FR_EX [N]	17173	19614	18765	16678,24	19234,34	18121,02
FRMEX [N]	5466,34	6243,33	5973,09	5308,85	6122,48	5768,10
ERMEX [N/m²]	2,63E6	3,00E6	2,87E6	2,55E6	2,94E6	2,77E6
FACTO [N]	2454,4	2810,2	2686,5	1813,06	1978,57	1968,68
FACTI [N]	1636,3	1873,5	1791	1260,41	1188,84	1373,71
FACTE[N]	818,14	936,74	895,49	552,65	789,73	594,97

E) SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (INRUSH)

Nesta simulação, o transformador foi energizado pelo sistema de tensão apresentado a seguir. Este foi imposto de acordo com o obtido durante a medição, apresentado no Capítulo III, na seção 3.2.2. Em ambos os *softwares* as chaves tem seus três pólos fechados no mesmo instante ($t=0s$).

$$V_A = V_m \times \cos(\omega t - 147,4^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t - 147,4^\circ)$$

$$V_B = V_m \times \cos(\omega t - 27,4^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t - 27,4^\circ)$$

$$V_C = V_m \times \cos(\omega t + 92,6^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t + 92,6^\circ)$$

E.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

Apresentam-se na Tabela 4.13 as correntes de energização que percorrem os enrolamentos durante a simulação, no ATP (a) e no FLUX3D (b), na Fase C. Optou-se por indicar apenas o primeiro pico da referida corrente, pois é nela que haverá o maior valor de estresses eletromecânico.

Tabela 4.13: Síntese dos resultados da simulação da energização do transformador.

Software	I_C [A] (1º pico)
ATP	-1093,00
FLUX3D	-1102,07

E.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As densidades de fluxo obtidas nas colunas e dispersão, na Fase C, são apresentadas na Tabela 4.14. Todos estes valores foram adquiridos no instante de tempo onde a corrente de energização é máxima.

Tabela 4.14: Densidades de fluxos para colunas e culatras, do transformador, na condição de energização.

Software	Coluna	Dispersão
	B_{COL_C} [T]	B_C [T]
ATP	2,55	0,54
FLUX3D	2,52	0,51

Assim como ocorre para o caso do curto-circuito trifásico, o enrolamento energizado é submetido a elevados valores de forças eletromecânicas quando percorridos pelas correntes de “inrush”. No caso em questão, o único enrolamento que é percorrido por tais correntes é o interno, de forma que as forças serão analisadas somente nesta bobina, e somente na Fase C pelo motivo exposto anteriormente.

E.3) GRANDEZAS MECÂNICAS

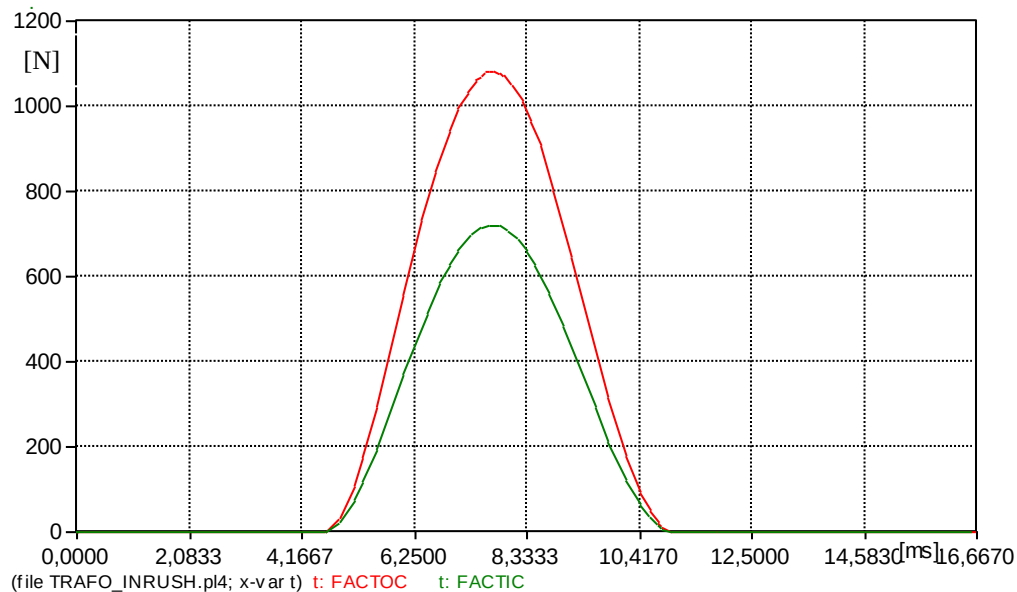
As forças radiais totais obtidas, para o enrolamento acima mencionado, mostram que a bobina em questão é submetida a um estresse de tração, ou seja, em ambos os *softwares* estas variáveis são obtidas com valores positivos.

As forças axiais compressivas totais e axiais compressivas totais no enrolamento interno são apresentadas nas Figuras 4.4 (a) para o ATP e (b) para o FLUX3D, neste último *software*, ambas as forças estão sobrepostas.

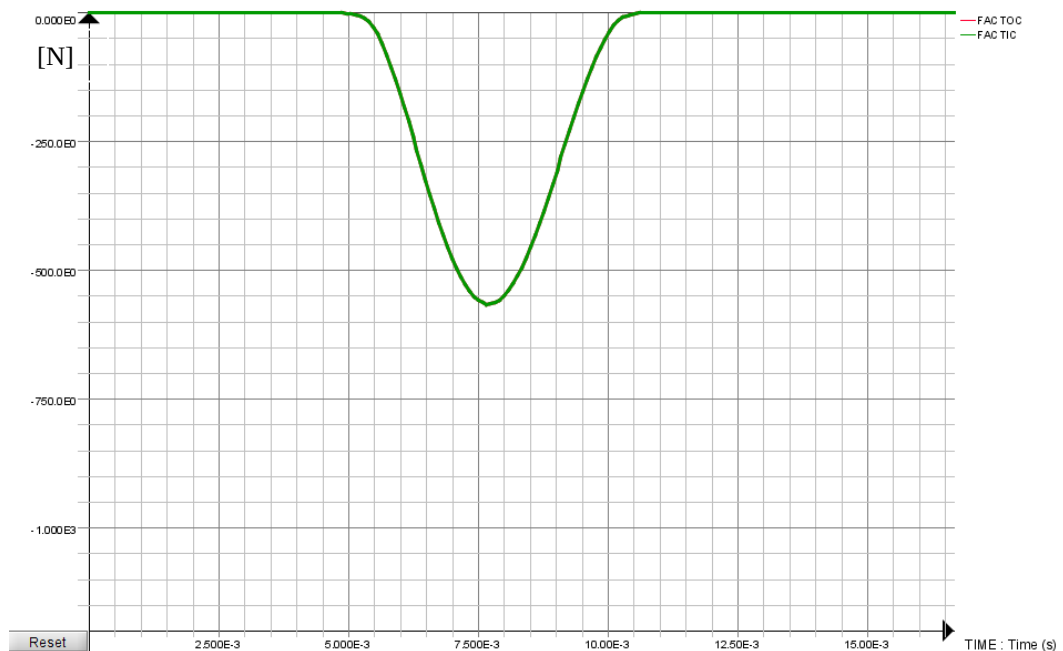
Neste caso, pelo fato de não existir corrente no enrolamento externo, não faz sentido apresentar a força axial compressiva total, uma vez que esta já é a própria força axial compressiva imposta ao enrolamento interno, conforme pode ser visualizado no FLUX3D. Entretanto, pelo fato de no ATP as formulações, considerarem que a força axial compressiva no enrolamento interno ser igual a 2/3 da total, automaticamente este cálculo é realizado no mesmo.

Neste contexto, destaca-se aqui outra observação a ser feita sobre as formulações utilizadas no ATP. Pelo fato do referido equacionamento ser

proveniente do estudo de forças nos enrolamentos para a condição de curto-circuito, a utilização do mesmo para a condição operacional de energização, leva a resultados equivocados. Desta forma, devem-se levar em consideração os resultados obtidos apenas para o *software* que utiliza o método de elementos finitos, uma vez que este realiza os cálculos mediante a situação real ao qual o enrolamento foi submetido.



(a) ATP



(b) FLUX3D

Figura 4.4: Formas de onda das forças radiais totais nos enrolamentos internos, para a simulação de energização.

A Tabela 4.15 apresenta os módulos dos valores máximos obtidos através desta simulação para as forças totais (FR), médias (FRM) e estresses médios radiais (ERM), no enrolamento interno, em ambos os *softwares*, além dos valores das forças axiais compressivas totais (FACTO) e no enrolamento interno (FACTI), para a fase C.

Tabela 4.15: Módulos das forças e estresses para a condição de energização.

Parâmetro	ATP	FLUX3D
	C	C
FR_IN [N]	6020,5	4680,87
FRMIN [N]	1916,4	1.489,97
ERMIN [N/m ²]	0,92E6	0,71E6
FACTO [N]	1081,4	565,32
FACTI [N]	720,92	565,32

F) MEDIÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS

As capacitâncias intrínsecas existentes entre o enrolamento interno e coluna, entre enrolamentos, e enrolamento externo e tanque, são passíveis de sofrerem alterações quando o enrolamento do transformador possuir alguma deformação. Desta forma, conforme apresentado no Capítulo II, foi criado, no FLUX3D, uma representação do transformador para que tais parâmetros pudessem ser analisados.

Para a obtenção das capacitâncias, deve-se extrair do *software* o valor da energia eletrostática (W) armazenada em volume específico (os quais serão explicitados em cada caso) e, através da Equação 4.1, chega-se ao valor da capacitância sob investigação.

$$C = \frac{2 * W}{V^2} \quad (4.1)$$

Onde V é igual a 1 V.

Para a determinação da capacitância existente entre o enrolamento interno e coluna (CX), foi imposto o potencial de 1 V no enrolamento interno em uma das fases, sendo os demais enrolamentos, núcleo e tanque deixados em 0 V. Este procedimento foi adotado, uma vez que, as demais fases são idênticas e o valor de capacitância obtido para esta fase será o mesmo para as demais.

Para este caso, a energia eletrostática a ser obtida no FLUX3D é aquela localizada exatamente entre o enrolamento interno e a coluna do transformador.

Com esta mesma configuração, pode-se também obter a capacitância entre enrolamentos (CHX), bastando para isto adquirir o valor da energia armazenada entre os mesmos.

Já para a obtenção da última capacitância, ou seja, entre o enrolamento e o tanque (CH), é necessário aplicar o potencial de 1 V nos enrolamentos externos, de todas as fases, deixando os enrolamentos internos, núcleo e tanque com potencial de 0 V. A energia armazenada para este caso é do volume de óleo existente entre estes enrolamentos e o tanque, com a ressalva de que o valor de capacitância calculada pela Equação 4.1 deve ser dividido por três. A Tabela 4.16 apresenta uma síntese dos valores obtidos para as capacitâncias intrínsecas.

Tabela 4.16: Capacitâncias obtidas através de simulação no FLUX3D

Capacitância	Valor Obtido [pF]
CHX	144,908
CX	321,078
CH	94,529

4.4 - VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para a validação do modelo do transformador de 15 kVA desenvolvido no ATP, bem como sua representação no FLUX3D, serão realizadas comparações dos parâmetros obtidos nas simulações acima apresentadas aos adquiridos via medições ou cálculos analíticos.

As comparações são feitas através das diferenças percentuais existentes entre: medição ou analítico e ATP (Dif%Med_ATP ou Dif%An_ATP); medição ou analítico e FLUX3D (Dif%Med_FLUX3D ou Dif%An_FLUX3D); ATP e FLUX3D (Dif%ATP_FLUX3D).

A) OPERAÇÃO A VAZIO

Para a condição operacional do transformador em vazio, as diferenças percentuais obtidas para as correntes de magnetização (pico), perdas no núcleo, e induções magnéticas para colunas e culatras, não ultrapassaram os 5%, o que indica uma boa aproximação entre os modelos e o transformador real.

Pelo fato do ensaio em vazio depender praticamente do núcleo do transformador, ou seja, da curva de magnetização, entreferros e dimensões, e pelos resultados obtidos nas comparações acima, pode-se concluir que o núcleo foi devidamente representado nos dois modelos.

B) OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL

As avaliações realizadas, para a condição operacional do transformador com carga nominal, indicam novamente uma boa aproximação entre os modelos e os cálculos analíticos confrontados. Esta conclusão foi obtida pelo fato de que as diferenças percentuais encontradas para as correntes de pico nos enrolamentos internos e externos, potências consumidas pela carga, induções magnéticas de colunas, culatras e de dispersão tiveram como maior valor 7%, sendo a maior parte das diferenças percentuais obtidas inferiores a este.

C) CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA

Na condição de curto-circuito com tensão reduzida, a maior diferença percentual para as correntes eficazes é de 3,5%, sendo de 5% para as perdas.

As análises das densidades de fluxo magnético para colunas, culatras e de dispersão não foram realizadas, uma vez que não existem medições e nem foram efetuados cálculos analíticos para tais valores na referida condição operacional.

D) CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”

Os resultados obtidos nas referidas simulações são confrontados com os analíticos apresentados na seção 3.3. Quando se avalia o primeiro pico das correntes em cada uma das fases do transformador, tanto no enrolamento externo quanto interno, existe apenas um valor analítico como referência. Entretanto, durante o curto, o primeiro pico de corrente nas três fases diferenciam-se entre si, conforme pode ser visto na Figura 4.2. Neste contexto, as menores diferenças percentuais são encontradas na Fase B, que não ultrapassam 1,5%. Desta forma, as demais análises serão realizadas tomando como base a referida fase.

As diferenças percentuais para as densidades de fluxos de dispersão, na fase supracitada, ficaram próximas de 3,5%.

A título de ilustração, a Figura 4.5 indica as confrontações dos resultados obtidos para as forças radiais totais nos enrolamentos externo em cada uma das fases. Na Figura 4.5 (a) são mostrados os valores absolutos, para o primeiro pico da força, obtidos no caso analítico (considerado novamente igual nas três fases), no ATP e no FLUX3D, em cada uma das fases. Na Figura 4.5 (b) são apresentadas as diferenças percentuais analisadas.

Observando apenas a Fase B, nota-se que praticamente não existe diferença entre o valor analítico e o obtido na simulação do ATP, o que é facilmente explicado, pois as formulações inseridas no referido modelo é a mesma utilizada na analítica, assim como os dados geométricos. As diferenças obtidas entre: analítico-FLUX3D e ATP-FLUX3D, ficaram próximas de 15% para o enrolamento externo e 8% para o interno. Tal fato provavelmente esta

ligado diretamente ao método de cálculo empregado no *software* FLUX3D, onde nenhuma simplificação é feita, como no caso analítico, ou seja, no programa há um mapeamento de todo o volume sob estudo, enquanto que nas formulações analíticas os parâmetros são considerados concentrados.

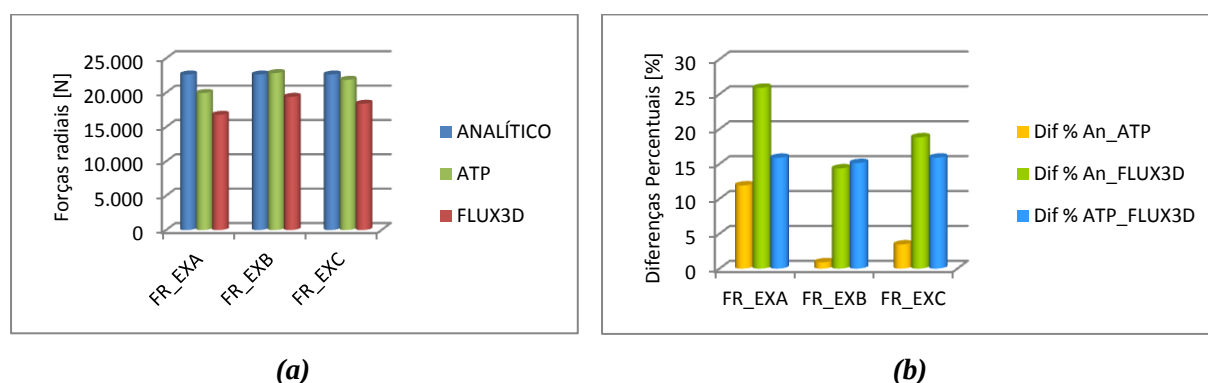


Figura 4.5: Comparação dos valores das forças radiais [N], nos enrolamentos externos, na condição de curto-circuito trifásico.

Para investigar de forma mais detalhada as diferenças percentuais obtidas nas forças radiais, apresenta-se a Figura 4.6, que mostra a distribuição da densidade de fluxo magnético nos enrolamentos interno e externo, bem como entre eles, no instante onde a corrente é máxima na Fase B. Nota-se que o valor máximo da densidade de fluxo disperso está localizado entre os enrolamentos.

Pelas formulações empregadas no ATP e nos cálculos analíticos, as forças são calculadas tendo como base: o diâmetro médio do enrolamento sob análise e sendo submetido à metade da densidade de fluxo em toda a sua extensão. Na Figura 4.6 fica bem definido que esta simplificação não é real, uma vez que esta densidade é distinta tanto na altura do enrolamento quanto nas camadas dos mesmos. Neste caso, tanto a camada externa do enrolamento interno, quanto a camada interna do externo, estão mergulhadas em uma densidade de fluxo maior que as outras duas camadas.

Pelo fato das forças radiais médias, bem como estresse médio serem função da radial total, as diferenças obtidas em cada um dos enrolamentos se

assemelham às já mostradas nas Figuras 4.5; por este motivo, não serão apresentadas novamente.

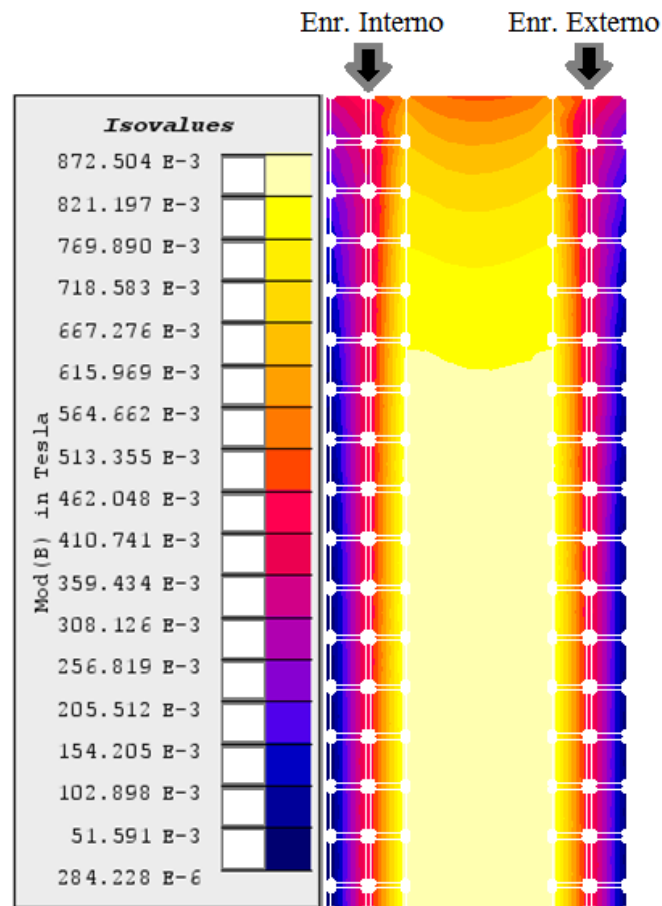


Figura 4.6: Distribuição da densidade de fluxo nos enrolamentos e entre eles, na Fase B, durante o pico da corrente.

As comparações para as forças axiais compressivas totais são delineadas na Figura 4.7. Assim como para as forças radiais o valor analítico é considerado o mesmo para as três fases, e novamente somente a Fase B será analisada. Nota-se que praticamente não existe diferença entre o analítico e o ATP, por motivos explicados anteriormente. Entretanto, as diferenças percentuais obtidas entre analítico-FLUX3D e ATP-FLUX3D chegam a valores próximos de 30%.

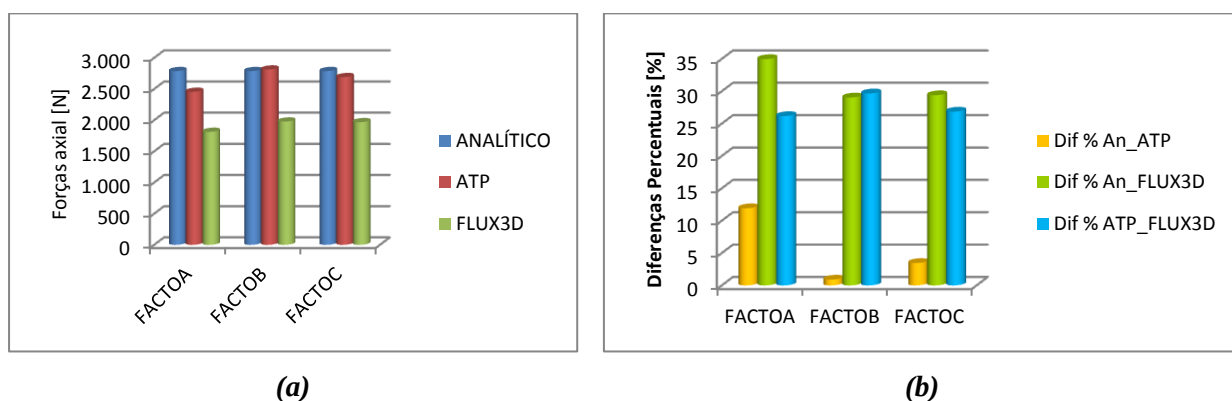


Figura 4.7: Comparação dos valores das forças axiais compressivas totais [N], na condição de curto-circuito trifásico.

As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam as comparações realizadas para as forças axiais compressivas nos enrolamentos internos e externos, respectivamente.

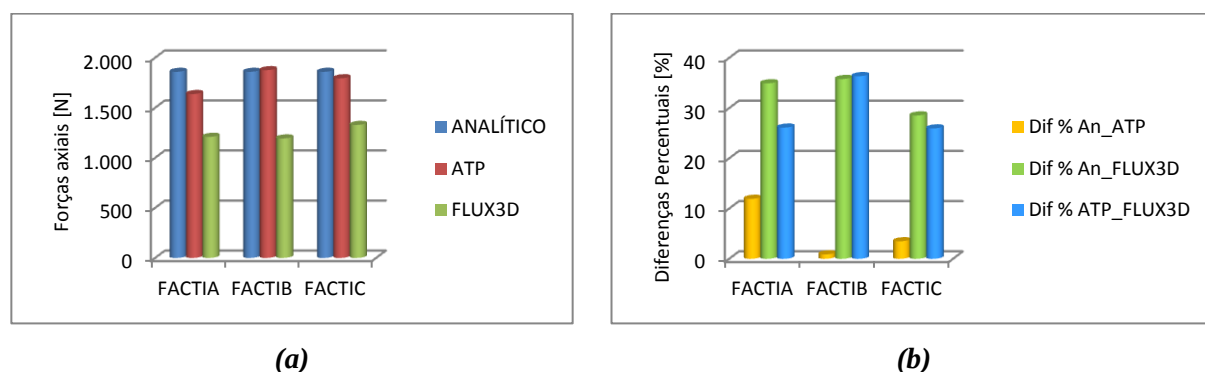


Figura 4.8: Comparação dos valores das forças axiais compressivas [N] nos enrolamentos internos, na condição de curto-circuito trifásico.

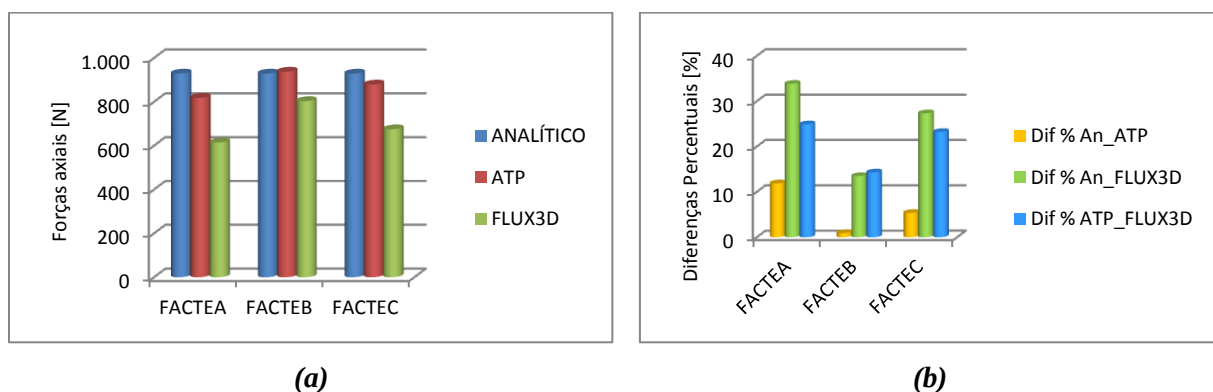


Figura 4.9: Comparação dos valores das forças axiais compressivas [N] nos enrolamentos externos, na condição de curto-circuito trifásico.

Vale ressaltar que a força compressiva total é distribuída, entre os enrolamentos internos e externos nas proporções de 2/3 e 1/3, respectivamente.

Esta distribuição acaba ocorrendo também no FLUX3D de forma aproximada, entretanto as diferenças percentuais ainda continuam altas. Tais diferenças são explicadas também de forma semelhante à realizada para as forças radiais, e neste caso existe um detalhe mais importante: nos cálculos do FLUX3D as forças axiais são obtidas através do produto vetorial entre a densidade de corrente no enrolamento e a densidade de fluxo radial. Ressalva-se que esta última grandeza é bem acentuada nas extremidades dos enrolamentos, e não em toda sua extensão, conforme considerado nos cálculos analíticos e ATP.

E) ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (*INRUSH*)

Para o referido caso, a diferença percentual obtida para a corrente na Fase C, é de aproximadamente 15%, obtidas entre medição-ATP e medição-FLUX3D. Essa diferença justifica-se pela necessidade de uma extrapolação para a obtenção dos últimos pontos da curva de magnetização nos modelos. Esta condição foi considerada, visto que é usual o fabricante não informar grande quantidade dos dados necessários para os estudos associados à região de saturação.

As comparações realizadas para as densidades de fluxos nas colunas e dispersão, forças e estresses radiais, bem como forças axiais, serão feitas somente entre *softwares*, uma vez que, tais parâmetros não foram obtidos durante a medição em questão, e nem através de cálculos analíticos.

As densidades de fluxos obtidas para a coluna da Fase C apresentam uma diferença percentual de 1,3%. Para as densidades de fluxo de dispersão a diferença percentual fica próxima de 6%.

As diferenças percentuais obtidas para a força radial total, média e estresse ficaram próximas de 20%. Para as forças axiais compressivas, optou-se por analisar a total, pois, conforme visto na Figura 4.4, este valor é igual àquele atribuído somente no enrolamento interno no FLUX3D, mas diferencia-se no

ATP pela proporcionalidade imposta pelas formulações. A diferença percentual foi de 47%.

As diferenças percentuais obtidas nas forças radiais e axiais e estresse radial são consideradas altas. Este fato pode ser explicado pelas formulações inseridas no modelo do ATP terem sido deduzidas para quando o transformador é submetido a um curto-circuito, além das simplificações das mesmas. Isto indica certa deficiência em tais formulações para o caso de “*inrush*”, necessitando até mesmo investigações mais detalhas.

Por esta razão indica-se nesta tese a utilização do *software* FLUX3D, ou outro que utilize o método de elementos finitos, para análises de forças e estresses nos enrolamentos de transformadores.

F) CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS

A comparação entre as capacitâncias adquiridas durante as medições e as obtidas através de simulações, mostra resultados satisfatórios, uma vez que a maior diferença percentual fica próxima de 2%. Isto indica que os valores de permissividades aplicadas ao problema, juntamente com a própria representação do transformador no FLUX3D, estão próximas do transformador real.

4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo foi utilizado para realizar as comparações entre resultados obtidos computacionalmente, através dos modelos do transformador de 15 kVA no ATP e no FLUX3D, com as medições e cálculos analíticos. Tais comparações foram utilizadas para a validação das modelagens.

O presente capítulo inicia-se com a apresentação os resultados obtidos nas simulações realizadas no ATP, onde todos os ensaios laboratoriais, salvo exceção, as medições das capacitâncias intrínsecas foram devidamente reproduzidas. Os resultados para as simulações computacionais realizadas no FLUX3D também são mostrados simultaneamente no Capítulo, e além dos demais ensaios laboratoriais, neste caso, as capacitâncias intrínsecas também foram obtidas.

Os resultados das simulações foram apresentados em sua grande maioria em formato de tabela, uma vez que as formas de ondas são bem conhecidas e nas simulações não ocorreu nenhuma diferença. Por ser um dos focos principais desta tese, algumas formas de ondas para o caso do transformador operando sob a condição de curto-circuito trifásico e energização, foram apresentadas.

As comparações dos parâmetros retirados de medições ou cálculos analíticos, com os resultados de simulações no ATP e no FLUX3D são baseadas em três tipos de diferenças percentuais, quais sejam: entre medição ou analítico e ATP ($Dif\%Med_ATP$ ou $Dif\%An_ATP$); medição ou analítico e FLUX3D ($Dif\%Med_FLUX3D$ ou $Dif\%An_FLUX3D$); ATP e FLUX3D ($Dif\%ATP_FLUX3D$). Os parâmetros que não foram possíveis ser comparados com metodologias analíticas ou medições houve confrontação apenas entre *softwares*.

As diferenças percentuais obtidas nos ensaios em vazio, carga nominal e curto-circuito com tensão reduzida, em sua grande maioria ficaram abaixo de 5%, o que para o entendimento da autora não necessita de qualquer comentário.

Ao iniciar as análises das comparações referentes ao curto-circuito trifásico “passante”, observou-se uma excelente proximidade entre valores obtidos analiticamente e através das simulações, uma vez que as diferenças percentuais ficaram abaixo de 5% em sua grande maioria. Pelo fato da corrente e densidade de dispersão, da Fase B, tanto no ATP quanto no FLUX3D se aproximarem dos valores obtidos através dos cálculos analíticos, e as forças

serem dependentes diretamente destes parâmetros, estas foram analisadas tendo por base a referida fase.

Para as forças radiais e axiais observou-se que as diferenças entre ATP e analítico não chegaram a 1%, fato este explicado pela utilização da mesma formulação em ambos os casos. Entretanto, observam-se diferenças percentuais próximas de 15% para as forças radiais, e de até 30% para as axiais, para as comparações com o *software* FLUX3D. Tais diferenças ocorrem pelas formulações mais precisas no referido *software*, que aquelas utilizadas no ATP e no cálculo analítico, uma vez que esta última considera uma série de simplificações para facilitar os cálculos.

Para o caso de energização do transformador, as diferenças obtidas, entre *softwares*, para a corrente e a densidade de fluxo de dispersão na Fase C, ficaram abaixo de 6%. Entretanto, para as forças radiais tal diferença ficou próxima de 20%, e para as axiais 50%. Conforme explicado no Capítulo II, a formulação para o cálculo das forças nos enrolamentos, inseridas no modelo do ATP, são específicas para quando o transformador está sendo submetido às correntes de curto-circuito. Este fato, aliado a uma série de simplificações em tais formulações acarretam estas diferenças percentuais, aqui consideradas elevadas.

Finalizando as comparações, utilizou-se o estudo eletrostático no FLUX3D para a determinação das capacitâncias intrínsecas. Neste estudo pôde-se notar que os valores obtidos foram bem próximos do esperado, o que de certa forma, indica que tanto os valores de permissividades aplicadas ao problema, quanto a própria representação do transformador no FLUX3D estão próximas do transformador real.

De uma maneira em geral, a modelagem do transformador de 15 kVA no ATP, bem como sua representação no FLUX3D se mostraram satisfatórias para dar prosseguimento o desenvolvimento desta tese. É importante mencionar que a

maioria das diferenças percentuais ficou próxima de 5%, o que são consideradas excelentes, em se tratando de modelagens.

As diferenças acima de 15%, como no caso das forças e estresse radiais e forças axiais, para o caso do transformador operando em curto-circuito e energização, são obtidas pelas simplificações e considerações que são empregadas no processo de formulação de tais parâmetros. Para estudos onde a investigação de tais forças e estresses é fundamental, o indicado será estudá-los com o *software* que empregue o método de elementos finitos em virtude da precisão apresentada.

CAPÍTULO V

ESTUDOS COMPUTACIONAIS IMPONDO DEFORMAÇÃO TÍPICA AOS ENROLAMENTOS

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao final do capítulo anterior verificou-se que o modelo do transformador de 15 kVA no ATP e sua representação no FLUX3D responderam bem às comparações realizadas com medições ou cálculos analíticos. Considerando os modelos satisfatórios, a próxima etapa desta tese é a realização de estudos computacionais aplicando deformações típicas aos enrolamentos do transformador, para análise comportamental do mesmo perante a tal defeito mecânico. Este estudo tem como principal objetivo viabilizar uma metodologia para a detecção de tais falhas nos enrolamentos antes que as mesmas possam retirar o transformador de operação.

Pelo fato de no Capítulo anterior os enrolamentos do transformador não possuírem qualquer deformação, a variação de parâmetros, como: correntes, densidades de fluxos em colunas, culatras e de dispersão, perdas, forças e estresses radiais, forças axiais e capacitâncias intrínsecas, podem identificar possível deformação nos enrolamentos quando o mesmo existir.

Desta forma, o comparativo a ser realizado neste capítulo será entre os valores obtidos no Capítulo anterior e os adquiridos no presente capítulo. As medições não serão mais utilizadas pelo fato do transformador sob estudo não possuir nenhuma deformação no enrolamento. Os cálculos analíticos, conforme já mencionado, são utilizados quando o enrolamento não possuir deformação, desta forma, quando o mesmo possuir tal alteração, os resultados obtidos com tais formulações podem não condizer com a realidade.

Neste contexto, antes de iniciar os estudos, deve-se ter em mente o tipo de deformação a ser aplicada nos enrolamentos para se proceder as análises aqui propostas.

5.2 - FALHAS ELETROMECAÑICAS EM TRANSFORMADORES

Os tipos de falhas que ocorrem nos enrolamentos de um transformador causados pelas forças eletromecânicas impostas ao mesmo, pelas elevadas correntes de curto-circuito ou energização, dependem de alguns fatores. Estes estão relacionados, por exemplo, com o tipo de núcleo (envolvente ou envolvido), o tipo enrolamento (disco, helicoidal), dentre outros [18].

Desta forma, pelo fato do transformador sob análise possuir o núcleo do tipo envolvido, sendo os enrolamentos interno e externo tipo helicoidal com duas camadas, não contendo espaçadores radiais e nem axiais entre a coluna e o enrolamento interno, o defeito que pode ocorrer no mesmo é do tipo “*curvatura livre*” ou “*freebuckling*”.

Para este caso, a projeção do condutor pode se dar tanto para dentro quanto para fora, em um ou mais pontos da circunferência, conforme ilustra a Figura 5.1 [17, 18]. Este efeito pode ser produzido tanto pela corrente de energização como pela corrente de curto-circuito.

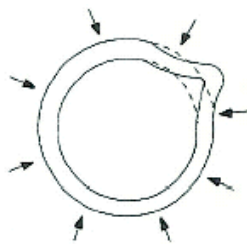


Figura 5.1: Curvatura “livre” no enrolamento interno: “freebuckling”.

A Figura 5.2 [18] também ilustra tal defeito em transformadores reais.



Figura 5.2: Defeito em enrolamentos devido à uma alta compressão radial causando uma saliência nos mesmos – “freebuckling”.

É importante mencionar que, pelo fato do enrolamento utilizado no transformador sob estudo não possuir os espaçadores radiais, estes não sofrem as chamadas deformações devido as forças axiais, como por exemplo, curvatura entre espaçadores radiais (*bending*) e a inclinação dos condutores (*tilting*) [18]. Entretanto, mesmo não sofrendo tais tipos de deformações, é importante deixar claro que o enrolamento sofre com os impactos causados pelas forças acima mencionadas, podendo até mesmo sofrer algum tipo de dano pela própria vibração imposta pela mesma.

Tendo em mente a deformação do tipo “curvatura livre”, optou-se por iniciar os estudos subsequentes aplicando-a ao enrolamento interno na fase

central do transformador, ou seja, Fase B. Esta fase foi escolhida, pois conforme constatado durante a simulação do curto-circuito trifásico com tensão plena, nos dois *softwares* é a fase submetida ao maior estresse, conforme também relatado em [17, 22].

É importante salientar que serão realizados alguns estudos utilizando a mesma deformação. O primeiro deles será efetivado tendo como base uma deformação sutil. Após análises preliminares com tal deformação, esta passará por aumentos, de tal forma que seja possível detectar as alterações em parâmetros elétricos, magnéticos e eletromecânicos que identifiquem uma provável retirada do transformador de operação, em sua forma preventiva.

5.3 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO INTERNO - FLUX3D

Definido o tipo de deformação a ser imposto ao enrolamento interno, o primeiro passo é modificá-lo em sua representação no FLUX3D. Neste ponto, um esclarecimento é fundamental para o entendimento desta tese, ou seja, somente o enrolamento interno da Fase B teve suas dimensões alteradas com a inserção de pequenas saliências, para a representação da deformação do tipo “curvatura livre”. Com este procedimento, todos os outros parâmetros geométricos e material foram mantidos os mesmos, tanto para a simulação magnética, quanto para a eletrostática, com o intuito de se verificar possíveis alterações no modelo, somente pela deformação em questão.

5.3.1 - CASO 1

A Figura 5.3 apresenta uma vista inferior do transformador, retirada do FLUX3D onde nota-se a alteração no enrolamento interno da fase central. Esta

deformação é aplicada em toda a extensão do enrolamento. É importante mencionar que apenas metade da saliência é inserida na representação devido a utilização dos planos de simetria.

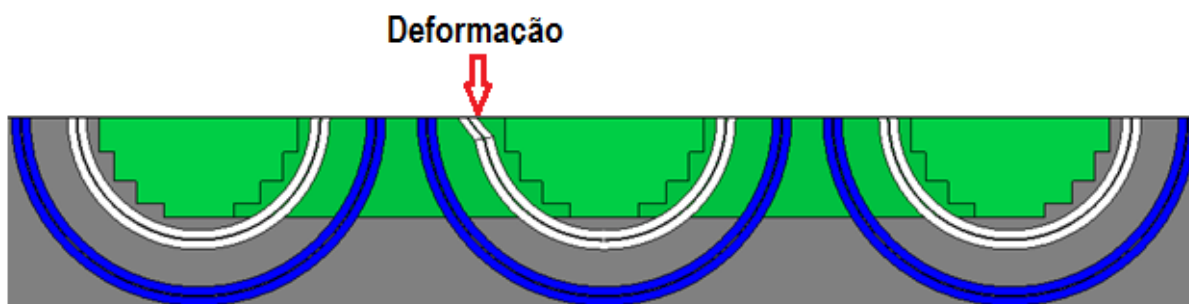


Figura 5.3: Defeito aplicado ao enrolamento interno da fase B - vista inferior (Caso 1).

5.3.2 - CASO 2

A segunda deformação utilizada nos estudos subsequentes é apresentada na Figura 5.4. Nota-se que aplicou-se a mesma deformação do caso anterior, só que em dois lados do enrolamento anteriormente deformado.

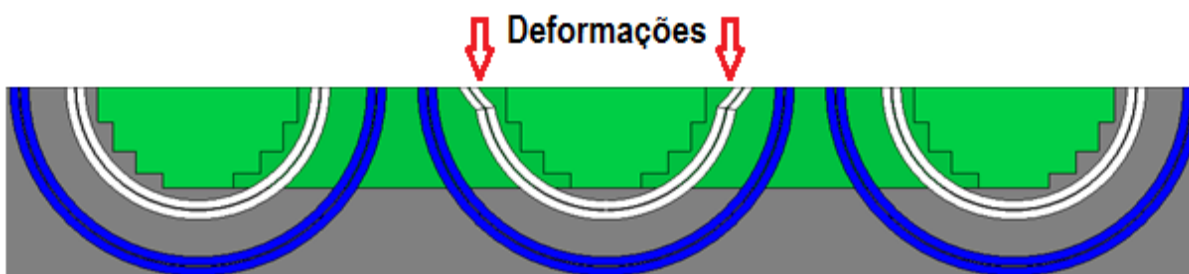


Figura 5.4: Defeito aplicado ao enrolamento interno da fase B - vista inferior (Caso 2).

Estes modelos são novamente submetidos às mesmas simulações utilizadas no processo de validação antes das deformações impostas. Os valores obtidos em cada uma das simulações serão comparados com aqueles mostrados no capítulo anterior para a verificação de possíveis alterações em parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos.

5.4 - IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA DEFORMAÇÃO NO ENROLAMENTO INTERNO - ATP

Conforme mencionado no Capítulo II, a inserção de uma possível deformação no enrolamento do transformador, para o modelo do ATP, só será possível com a alteração de alguns parâmetros utilizados no mesmo. Os parâmetros passíveis de alterações, com a deformação do tipo “curvatura livre” aplicada ao enrolamento interno, são: a indutância linear entre coluna e enrolamento interno (L_{ic}) e entre enrolamentos interno e externo (L_{ie}), e a resistência do enrolamento.

Determinar tais indutâncias quando os enrolamentos não possuem nenhuma deformação é relativamente simples, conforme apresentado no Capítulo II. Entretanto, quando o mesmo possui qualquer modificação em sua característica construtiva, tal cálculo pode se tornar de grande complexidade. Desta forma, nesta tese, optou-se por determinar tais variáveis somente com o auxílio do *software* FLUX3D.

De acordo com o item 2.3.1, apresentado no Capítulo II, as indutâncias supracitadas podem ser calculadas com o auxílio das Equações 2.1 e 2.2, onde a única variável desconhecida, quando o enrolamento possuir determinada deformação, é a área entre a coluna e enrolamento interno (A_{ic}) para o cálculo de L_{ic} , e entre enrolamentos (A_{ie}) para L_{ie} . Os demais parâmetros são constantes, ou seja, a permeabilidade do ar (μ_0), número de espiras (N) e altura da coluna (l).

Neste contexto, e de posse da representação do transformador no FLUX3D, é possível obter as áreas acima mencionadas. Com o conhecimento de tais variáveis, calcula-se as novas indutâncias, implementando-as na sequência no modelo do transformador no ATP.

Para as deformações do tipo “curvatura livre”, representadas nas Figuras 5.3 e 5.4, os novos valores das indutâncias entre coluna e enrolamento interno, e entre enrolamentos, são apresentadas na Tabela 5.1, sendo seus valores determinados de acordo com o descrito acima. Além de tais parâmetros, o valor da resistência do enrolamento deformado também é apresentado na Tabela mencionada. Para facilitar a verificação da alteração de tais parâmetros, optou-se por apresentar nesta tabela os valores dos mesmos quando não havia nenhuma deformação no enrolamento.

É importante mencionar que tais variações são válidas apenas para a Fase B, uma vez que o enrolamento deformado pertence a mesma, ou seja, no modelo do ATP os referidos parâmetros são mantidos os mesmos já utilizados para as Fases A e C nos estudos subsequentes.

Tabela 5.1: Novos parâmetros de indutâncias e resistência para utilização no modelo do ATP.

Fase	Parâmetros	SEM DEF.	CASO 1	CASO 2
B	L_{ie} [mH]	145,0598	144,1151	143,1704
	L_{ic} [mH]	24,5265	25,4012	26,2409
	R_i / Ω	0,02897	0,02908	0,02918

Quando se realiza uma breve comparação entre os valores de tais indutâncias, tendo como base o caso sem deformação, nota-se que para a primeira situação a indutância entre enrolamentos diminui cerca de 0,65%, e entre enrolamento interno e coluna aumenta 3,5%. Já para o CASO 2, a primeira tem uma diminuição de 1,3% e a segunda um aumento de 6,99%.

Nota-se ainda que a resistência do enrolamento deformado sofre um aumento a cada deformação imposta, sendo este de 0,38% para o primeiro caso e 0,72% para o segundo. É importante salientar que tal resistência poderia ter tido um aumento ainda maior, pois ao se deformar o enrolamento no FLUX3D apenas o comprimento do mesmo teve suas dimensões alteradas, sendo a área da seção transversal mantida constante, entretanto em uma deformação real, este último iria diminuir. Lembrando que a resistência do enrolamento depende

diretamente do comprimento e inversamente da área da seção transversal, fica evidenciado que a resistência em questão poderia ter aumentado um pouco mais.

Neste sentido, estes parâmetros são agora inseridos no modelo do ATP e verificado as possíveis alterações que ocorrem nos mesmos.

5.5 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Conforme mencionado anteriormente, tanto os modelos do FLUX3D, quanto os do ATP serão submetidos às seguintes condições: a vazio, carga nominal, curto-circuito com tensão reduzida, curto-circuito trifásico “passante” e energização. Na sequência serão apresentados os resultados obtidos para cada uma destas condições, sendo analisados os parâmetros que sofreram algum tipo de alteração, sejam estas grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas.

As considerações utilizadas para a realização de todas as simulações nesta etapa do trabalho, exceto energização, são as mesmas já mencionadas no Capítulo 4; desta forma, não serão novamente aqui citadas. Para a condição operacional de energização as diferenças existentes entre a simulação anteriormente apresentada e a atual serão devidamente explicitadas em momento oportuno.

Pelo fato dos modelos já terem sido devidamente validados no capítulo anterior, as comparações a serem ponderadas ocorrerão entre modelos do mesmo *software*, ou seja, serão analisados o comportamento do transformador através dos modelos implementados sem e com deformações, seja no FLUX3D ou no ATP. Os resultados de ambos os programas computacionais serão apresentados simultaneamente, entretanto, as comparações de variações percentuais de parâmetros serão realizadas conforme explicitado anteriormente.

A - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO A VAZIO

A.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Tabela 5.2 sintetiza alguns resultados computacionais obtidos para a condição operacional a vazio, dos modelos do transformador, para ambos os *softwares*, em três situações distintas: sem deformação (SEM DEF.) no enrolamento interno da fase central, com a primeira (CASO 1) e a segunda (CASO 2) deformação.

Observando os resultados obtidos no ATP, nota-se que não houve nenhuma alteração nas correntes de magnetização (pico e eficaz) e perdas no núcleo, quando a deformação no enrolamento foi inserida no modelo. Vale ressaltar que este fato já era esperado, uma vez que a corrente acima mencionada depende, principalmente, do núcleo magnético, o qual não sofreu nenhuma alteração nos modelos estudados.

Tabela 5.2: Síntese de resultados da operação a vazio.

Software	I _A [A]		I _B [A]		I _C [A]		P _T [W]
	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	
ATP - SEM DEF.	3,51	2,48	1,49	1,05	3,62	2,56	88,96
ATP - CASO 1	3,51	2,48	1,49	1,05	3,62	2,56	88,96
ATP - CASO 2	3,51	2,48	1,49	1,05	3,62	2,56	88,96
FLUX3D - SEM DEF.	3,48	2,46	1,54	1,09	3,57	2,52	86,89
FLUX3D - CASO 1	3,48	2,46	1,52	1,07	3,63	2,56	86,72
FLUX3D - CASO 2	3,50	2,47	1,51	1,07	3,62	2,56	86,81

Os resultados do FLUX3D tiveram o mesmo comportamento, pois a pequena variação existente nas correntes, bem como na perda do núcleo, estão relacionadas às malhas existentes nos três modelos. Pelo fato da malha ser realizada pelo *software*, mesmo que o usuário tenha certo domínio sobre mesma, nos três modelos estudados o programa criou um número de elementos de malhas diferentes entre os mesmos, acarretando assim as pequenas diferenças

observadas na Tabela 5.2. Além disto, o próprio método numérico utilizado pelo *software* pode levar a estas pequenas diferenças.

A.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Analisando agora as grandezas magnéticas obtidas nas simulações em vazio, através da Tabela 5.3, nota-se que tanto no ATP quando no FLUX3D, as densidades de fluxos magnéticos nas colunas (B_{col}) e culatras (B_{cul}) não tiveram seus valores modificados perante a deformação imposta ao enrolamento.

Tabela 5.3: Síntese dos valores de densidades de fluxos magnéticos no núcleo para as simulações a vazio.

<i>Software</i>	B_{COL} [T]	B_{CUL} [T]
ATP - SEM DEF.	1,44	1,37
ATP - CASO 1	1,44	1,37
ATP - CASO 2	1,44	1,37
FLUX3D - SEM DEF.	1,45	1,39
FLUX3D - CASO 1	1,45	1,39
FLUX3D - CASO 2	1,45	1,40

B - SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO COM CARGA NOMINAL

B.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos para as correntes (pico e eficaz) em cada um dos enrolamentos pertencentes ao transformador, bem como a potência consumida pela carga. Nota-se novamente que no ATP nenhuma variação é observada nos parâmetros acima mencionados. Já no FLUX3D existe uma pequena variação nestas grandezas; entretanto, assim como no caso anterior, estas se devem ao fato das malhas serem diferentes em cada um dos modelos estudados.

Tabela 5.4: Valores de correntes (pico e eficaz) para os enrolamentos externos e internos, e potência consumida para as simulações na condição nominal.

Software	Enrolamento	I _A [A]		I _B [A]		I _C [A]		Potência Consumida [W]
		Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	Pico	Eficaz	
ATP - SEM DEF.	Externo	54,83	38,77	54,00	38,18	55,15	38,99	13.256,00
	Interno	53,40	37,76	53,45	37,79	53,40	37,76	
ATP - CASO 1	Externo	54,83	38,77	54,00	38,18	55,15	38,99	13.256,00
	Interno	53,40	37,76	53,45	37,79	53,40	37,76	
ATP - CASO 2	Externo	54,83	38,77	54,00	38,18	55,15	38,99	13.257,00
	Interno	53,40	37,76	53,45	37,79	53,40	37,76	
FLUX3D - SEM DEF.	Externo	54,45	38,50	54,18	38,31	54,90	38,82	13.350,46
	Interno	53,47	37,81	53,49	37,82	53,50	37,83	
FLUX3D - CASO 1	Externo	54,40	38,47	54,20	38,33	54,79	38,74	13.348,70
	Interno	53,45	37,79	53,50	37,83	53,45	37,79	
FLUX3D - CASO 2	Externo	54,35	38,43	54,17	38,30	54,81	38,76	13.349,00
	Interno	53,42	37,77	53,50	37,83	53,45	37,79	

B.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As grandezas magnéticas avaliadas neste caso são as densidades de fluxos para coluna, culatra e dispersão. A Tabela 5.5 mostra um resumo dos valores obtidos em cada um dos casos, sendo que as variações apresentadas no FLUX3D não devem ser levadas em consideração pelos motivos anteriormente explicitados. No ATP não se observou nenhuma variação destes parâmetros.

Tabela 5.5: Densidade de fluxo para colunas, culatras e dispersão no transformador, na condição nominal.

Software	B _{COL} [T]	B _{CUL} [T]	B _{DISP_A} [mT]	B _{DISP_B} [mT]	B _{DISP_C} [mT]
ATP - SEM DEF.	1,41	1,35	26,52	26,55	26,52
ATP - CASO 1	1,41	1,35	26,52	26,55	26,52
ATP - CASO 2	1,41	1,35	26,52	26,55	26,52
FLUX3D - SEM DEF.	1,42	1,38	26,71	26,34	26,59
FLUX3D - CASO 1	1,42	1,38	26,73	26,32	26,57
FLUX3D - CASO 2	1,42	1,38	26,72	26,29	26,57

C) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO COM TENSÃO REDUZIDA

C.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

Durante as simulações de curto-circuito com tensão reduzida, notou-se uma variação significativa, tanto no ATP quando no FLUX3D, para os valores de correntes obtidas na Fase B, ou seja, na fase onde o enrolamento foi deformado, conforme apresentado na Tabela 5.6. Nas demais fases as mudanças, por serem mínimas, podem ser desconsideradas.

Nota-se que para o mesmo valor de tensão (2,42 V), em relação ao ATP, existe um acréscimo de 0,37% para a referida corrente, do caso sem deformação para a primeira deformação imposta, e um acréscimo de 0,74% em relação ao segundo caso de deformação. Quando se compara tal corrente no FLUX3D, nota-se também um acréscimo na mesma, de 0,27% e 0,54% respectivamente. Ou seja, a mesma tendência é observada em ambos os modelos, a de um acréscimo na corrente durante o curto, na fase onde existe um enrolamento deformado.

Outra variação observada nesta simulação foi em relação à perda nos enrolamentos. Esta, no ATP, aumentou 0,27% do caso sem deformação para o primeiro caso com o enrolamento deformado e 0,55% para o segundo caso. No FLUX3D, tais variações ficaram em torno de 0,21% e 0,43%, respectivamente.

Tabela 5.6: Valores de corrente eficaz e tensão aplicada aos enrolamentos externos, e perda no transformador, para a simulação de curto-circuito com tensão reduzida.

Software	Fase A		Fase B		Fase C		P _T [W]
	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	V [V]	I [A]	
ATP - SEM DEF.	2,46	22,11	2,42	21,55	2,36	20,92	96,22
ATP - CASO 1	2,46	22,12	2,42	21,63	2,36	20,92	96,48
ATP - CASO 2	2,46	22,13	2,42	21,71	2,36	20,92	96,75
FLUX3D - SEM DEF.	2,46	22,05	2,42	22,13	2,36	21,60	98,09
FLUX3D - CASO 1	2,46	22,06	2,42	22,19	2,36	21,60	98,30
FLUX3D - CASO 2	2,46	22,06	2,42	22,25	2,36	21,61	98,51

O ensaio de curto-circuito com tensão reduzida tem como intuito, além de medir a perda nos enrolamentos, obter o valor da impedância percentual. Ao calcular tais parâmetros, nota-se novamente que no ATP a variação encontrada foi de 0,14%, quando comparados os valores obtidos nas simulações sem deformação e o primeiro caso, e 0,29% quando a comparação é realizada com o segundo caso com enrolamento deformado. No FLUX3D estas variações foram de 0,12% e 0,21%, respectivamente.

C.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As variações mais significativas obtidas nas grandezas magnéticas para a condição operacional de curto-circuito com tensão reduzida são observadas tanto no ATP quando no FLUX3D em dois parâmetros: na densidade de fluxo de coluna e de dispersão na Fase B, conforme apresentado na Tabela 5.7.

Para a coluna, a variação foi de 0,42% (SEM DEF. e CASO 1) e 0,85% (SEM DEF. e CASO 2) no ATP, e 0,76% (SEM DEF. e CASO 1) e 1,27% (SEM DEF. e CASO 2) para o FLUX3D.

Quanto à dispersão, esta variou de 0,46% e 0,86% no ATP, e 0,26% e 0,45% no FLUX3D.

Tabela 5.7: Densidade de fluxo para colunas, culatras e dispersão no transformador, na condição de curto-circuito com tensão reduzida.

Densidade de Fluxo	ATP SEM DEF.	ATP CASO 1	ATP CASO 2	FLUX3D SEM DEF.	FLUX3D CASO 1	FLUX3D CASO 2
B_{COL_A} [mT]	7,23	7,23	7,23	6,76	6,77	6,78
B_{COL_B} [mT]	7,09	7,12	7,15	7,88	7,94	7,98
B_{COL_C} [mT]	6,96	6,96	6,96	8,16	8,14	8,17
B_{CUL_AB} [mT]	21,73	21,71	21,70	20,00	19,80	19,88
B_{CUL_BC} [mT]	21,28	21,28	21,28	19,88	19,88	20,00
B_{DISP_A} [mT]	15,41	15,41	15,41	15,40	15,42	15,40
B_{DISP_B} [mT]	15,11	15,18	15,24	15,43	15,47	15,50
B_{DISP_C} [mT]	14,83	14,83	14,83	15,04	15,05	15,05

D) OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO “PASSANTE”

D.1) GRANDEZAS ELÉTRICAS

Durante a simulação de curto-circuito trifásico, os valores de correntes em todos os enrolamentos, apresentados na Tabela 5.8, se mostraram praticamente constantes nas Fases A e C. Já as correntes na Fase B possuem certa elevação tanto no enrolamento externo quando no interno, sendo que tais alterações foram de 0,24% e 0,48% no ATP, e 0,21% e 1,22% no FLUX3D, para comparações entre o caso sem e primeira deformação, e sem e segunda, respectivamente.

A variação no FLUX3D para o caso sem deformação e o segundo caso ficou bem maior que no ATP, o que pode estar relacionado com a malha no modelo que contempla a segunda deformação, uma vez que neste caso o *software* em questão criou um número maior de elementos de malha, no enrolamento deformado, que nos demais casos.

Tabela 5.8: Síntese dos valores do primeiro pico para as correntes nas simulações em curto-circuito “passante”.

Software	Enrolamento Externo			Enrolamento Interno		
	I _a [A]	I _b [A]	I _c [A]	I _a [A]	I _b [A]	I _c [A]
ATP - SEM DEF.	1.644,70	1.762,60	1.724,10	1.646,70	1.762,00	1.722,80
ATP - CASO 1	1.645,20	1.766,80	1.724,40	1.646,20	1.767,10	1.722,70
ATP - CASO 2	1.645,60	1.771,10	1.724,70	1.645,80	1.772,30	1.722,70
FLUX3D - SEM DEF.	1.630,59	1.747,94	1.699,38	1.632,73	1.735,90	1.702,07
FLUX3D - CASO 1	1.631,20	1.751,67	1.699,27	1.633,70	1.740,05	1.702,26
FLUX3D - CASO 2	1.631,26	1.762,25	1.700,05	1.633,74	1.751,83	1.703,36

D.2) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Assim como vem ocorrendo nas simulações anteriores, as alterações que ocorrem nas grandezas magnéticas, referentes às colunas e culatras, podem ser consideradas desprezíveis como pode ser visualizado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Densidades de fluxos para colunas e culatras, do transformador, nas simulações de curto-circuito trifásico “passante”.

Software	Coluna			Culatra	
	B_{COL_A} [T]	B_{COL_B} [T]	B_{COL_C} [T]	B_{CUL_AB} [T]	B_{CUL_BC} [T]
ATP - SEM DEF.	0,39	0,90	0,87	1,17	1,64
ATP - CASO 1	0,39	0,90	0,87	1,17	1,64
ATP - CASO 2	0,39	0,90	0,87	1,17	1,64
FLUX3D - SEM DEF.	0,39	0,89	0,87	1,24	1,49
FLUX3D - CASO 1	0,39	0,90	0,88	1,24	1,49
FLUX3D - CASO 2	0,40	0,91	0,89	1,26	1,51

Entretanto, quando se analisa as densidades de fluxos magnéticos de dispersão, nota-se que existem variações significativas somente na Fase B, conforme apresentado na Tabela 5.10. Estas são de 0,34% (SEM DEF. e CASO 1) e 0,57% (SEM DEF. e CASO 2), no ATP. Já no FLUX3D estas alterações são de 0,95% e 2,84%, respectivamente. As variações foram muito mais significativas no FLUX3D que no ATP, as quais podem ser justificadas também pela própria malha, ou até mesmo pelos métodos numéricos aplicados nos *softwares*.

Tabela 5.10: Densidades de fluxos de dispersão, do transformador, nas simulações de curto-circuito trifásico “passante”.

Software	Dispersão		
	B_{DISP_A} [T]	B_{DISP_B} [T]	B_{DISP_C} [T]
ATP - SEM DEF.	0,818	0,875	0,856
ATP - CASO 1	0,818	0,878	0,856
ATP - CASO 2	0,818	0,880	0,856
FLUX3D - SEM DEF.	0,810	0,845	0,830
FLUX3D - CASO 1	0,811	0,853	0,831
FLUX3D - CASO 2	0,811	0,869	0,832

D.3) GRANDEZAS MECÂNICAS

As análises das grandezas mecânicas apresentadas nas Tabelas 5.11 e 5.12 para o FLUX3D e o ATP, respectivamente, serão realizadas com o auxílio de gráficos para torná-las mais didáticas.

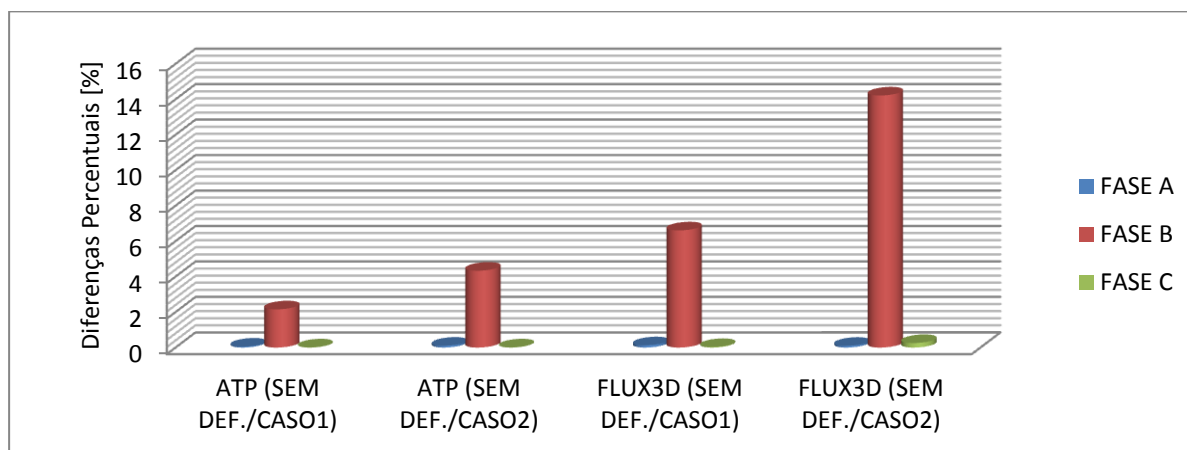
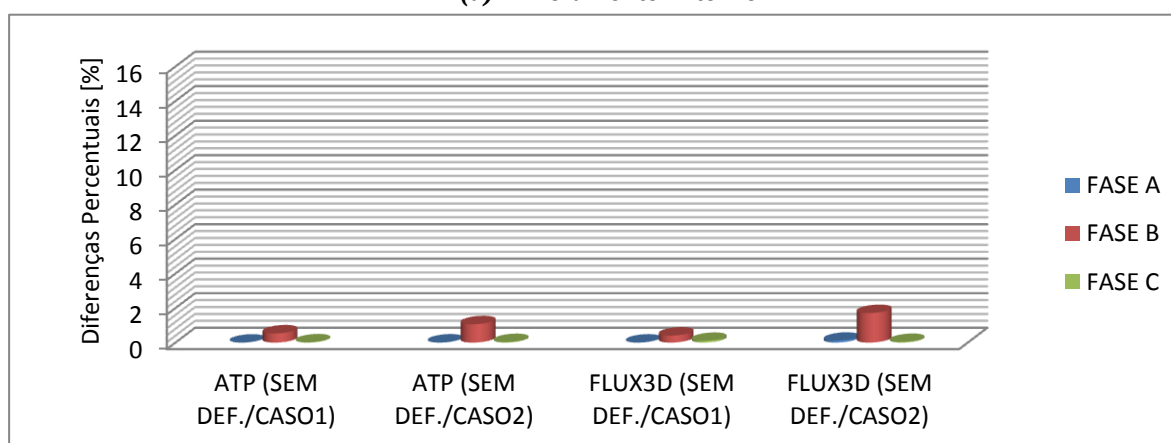
Tabela 5.11: Módulo das forças e estresses para as simulações no FLUX3D de curto-circuito trifásico “passante”.

Parâmetro	FLUX3D - SEM DEF.			FLUX3D - CASO 1			FLUX3D - CASO 2		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
FR_IN [N]	12.422,67	14.167,39	13.504,01	12.438,32	15.103,49	13.500,08	12.434,87	16.181,39	13.538,30
FRMIN [N]	3.954,26	4.509,62	4.298,46	3.959,24	4.807,59	4.297,21	3.958,14	5.150,70	4.309,38
ERMIN [N/m ²]	1,90E6	2,17E6	2,07E6	1,90E6	2,31E6	2,07E6	1,90E6	2,48E6	2,07E6
FR_EX [N]	16.678,24	19.234,34	18.121,02	16.677,80	19.313,16	18.102,67	16.696,57	19.564,44	18.113,88
FRMEX [N]	5.308,85	6.122,48	5.768,10	5.308,71	6.147,57	5.762,26	5.314,68	6.227,56	5.765,83
ERMEX [N/m ²]	2,55E6	2,94E6	2,77E6	2,55E6	2,96E6	2,77E6	2,56E6	2,99E6	2,77E6
FACTO [N]	1.819,06	1.968,57	1.968,68	1.821,64	1.976,67	1.966,22	1.820,23	1.997,57	1.964,87
FACTI [N]	1.267,41	1.178,84	1.373,71	1.269,51	1.190,35	1.372,22	1.268,99	1.215,76	1.368,80
FACTE [N]	551,65	789,73	594,97	552,13	786,32	594	551,24	781,805	596,069

Tabela 5.12: Módulo das forças e estresses para as simulações no ATP de curto-circuito trifásico “passante”.

Parâmetro	ATP - SEM DEF.			ATP – CASO 1			ATP – CASO 2		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
FR_IN [N]	13.665,00	15.646,00	14.957,00	13.658,00	15.983,00	14.956,00	13.651,00	16.324,00	14.956,00
FRMIN [N]	4.349,70	4.980,28	4.760,96	4.347,48	5.087,55	4.760,64	4.345,25	5.196,09	4.760,64
ERMIN [N/m ²]	2,09E6	2,40E6	2,30E6	2,09E6	2,45E6	2,29E6	2,09E6	2,50E6	2,29E6
FR_EX [N]	17.173,00	19.614,00	18.765,00	17.173,00	19.719,00	18.768,00	17.174,00	19.823,00	18.771,00
FRMEX [N]	5.466,34	6.243,33	5.973,09	5.466,34	6.276,75	5.974,04	5.466,65	6.309,86	5.974,99
ERMEX [N/m ²]	2,63E6	3,00E6	2,87E6	2,63E6	3,02E6	2,87E6	2,63E6	3,04E6	2,87E6
FACTO [N]	2.454,40	2.810,20	2.686,50	2.453,20	2.826,60	2.686,40	2.452,90	2.843,10	2.686,30
FACTI [N]	1.636,30	1.873,50	1.791,00	1.636,30	1.884,40	1.790,90	1.634,60	1.895,40	1.790,90
FACTE [N]	818,14	936,74	895,49	817,72	942,21	895,46	817,30	947,71	895,43

O primeiro parâmetro sob investigação será a força radial, tanto no enrolamento interno quando no externo. As Figuras 5.5 (a) e (b) apresentam, respectivamente, as alterações obtidas para a referida variável entre o caso cujo enrolamento não possui nenhuma deformação (SEM DEF.) e o primeiro caso onde o enrolamento interno da Fase B encontra-se deformado (CASO 1) e o caso sem deformação (SEM DEF.) e a segunda deformação (CASO 2), em ambos os *softwares*.

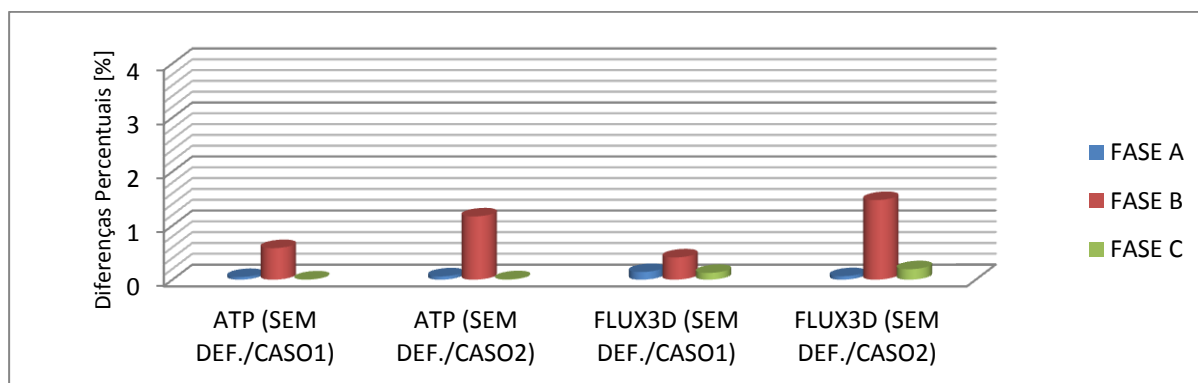
**(a) Enrolamento Interno****(b) Enrolamento Externo****Figura 5.5: Variações percentuais das forças radiais.**

Observando a Figura 5.5 (a), nota-se que as forças radiais aumentam aproximadamente 2%, no enrolamento interno da Fase B a cada deformação imposta no ATP. Já para o FLUX3D a primeira variação fica próxima de 6% e, a segunda, cerca de 14%. Este fato indica que uma deformação no enrolamento tem a tendência de aumentar o estresse sob o mesmo, podendo aumentar ainda mais a deformação existente ou deformar o enrolamento em outro ponto. Isto indica ainda uma possível ocorrência de ruptura de dielétricos que envolvem o enrolamento ou até mesmo o próprio cobre, caso o estresse crítico do mesmo seja ultrapassado.

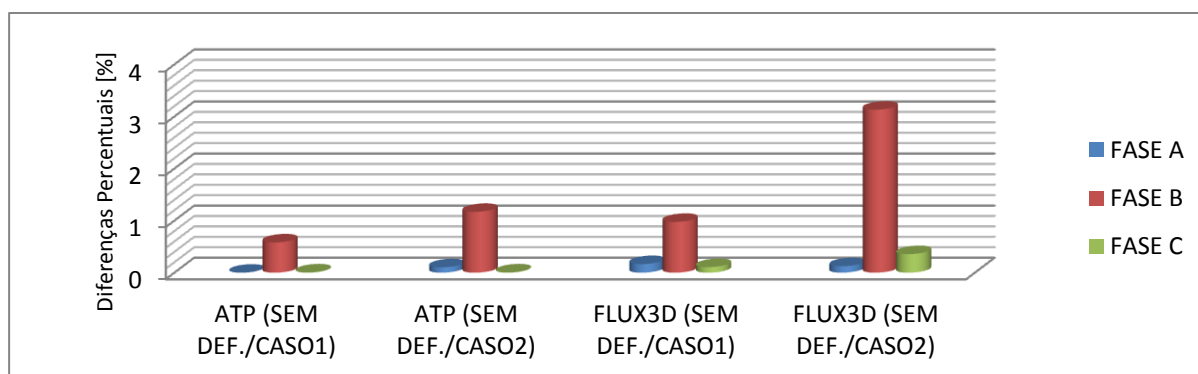
Na Figura 5.5 (b) observa-se que há pequenos aumentos nas forças radiais no enrolamento externo da Fase B, os quais não ultrapassam 1,5% no ATP e 2% no FLUX3D; entretanto, este fato pode indicar que, dependendo da deformação

no enrolamento interno, esta pode induzir a um aumento no estresse do enrolamento externo, podendo levá-lo a uma deformação e suas consequências.

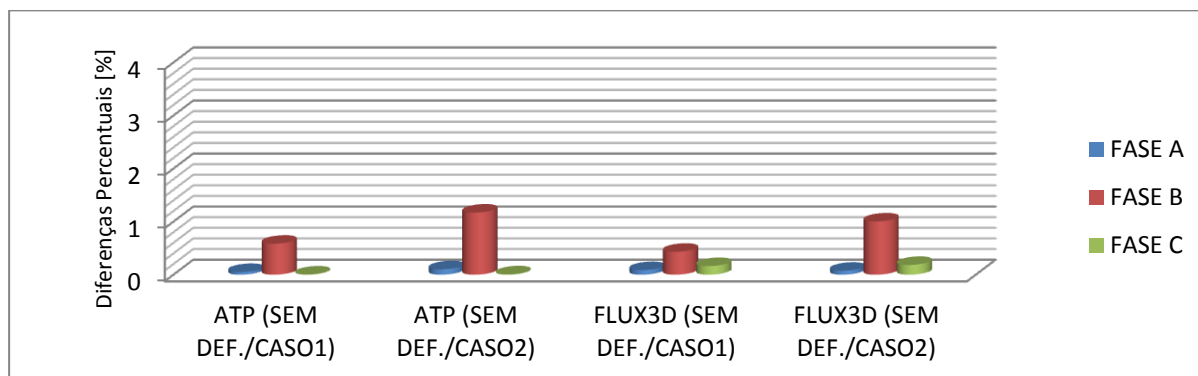
As análises referentes às forças axiais compressivas seguirão o mesmo padrão utilizado anteriormente; desta forma, nas Figuras 5.6 (a-c) podem ser observadas, respectivamente, a força axial compressiva total, no enrolamento interno e externo.



(a) *Compressiva total*



(b) *Compressiva Enrolamento Interno*



(c) *Compressiva Enrolamento Externo*

Figura 5.6: Variações percentuais das forças axiais.

Quanto às forças axiais compressivas totais (Figura 5.6 (a)), tem-se que estas variam de 0,5% a 1% no ATP e de 0,4% a 1,5% no FLUX3D, para a Fase B. Já as alterações das forças axiais compressivas no enrolamento interno (Figura 5.6 (b)) possuem variações de 0,6% e 1,17% no ATP, enquanto que no FLUX3D esta varia de 0,98% e 3,13%. Para o enrolamento externo tem-se alterações de 0,58% e 1,17% no ATP, e 0,43% e 1,00% no FLUX3D.

Observando tais estudos, pode-se notar que, no ATP, as variações tanto no enrolamento interno quando no externo foram iguais, fato este explicado facilmente pelas formulações analíticas aplicadas no referido *software* para os cálculos de tais parâmetros. Estas são baseadas em variáveis que permanecem constantes em todos os casos analisados, alterando apenas o valor da corrente.

No FLUX3D este fato não ocorre, pois a cada estudo realizado a geometria do transformador é alterada e analisada de acordo com esta modificação. Com isto, o parâmetro força axial compressiva no enrolamento interno e no externo acabam possuindo variações diferenciadas, de forma que no interno esta se demonstra mais acentuada que no externo.

As modificações nas forças axiais não se aproximam das obtidas para as radiais; entretanto, isto pode ser um indicativo que pelo menos o enrolamento interno, ou seja, o que possui uma deformação tipo radial, pode sofrer algum tipo de dano pela vibração imposta pela mesma.

E) SIMULAÇÃO DA ENERGIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR (*INRUSH*)

Antes de iniciar os estudos referentes à energização do transformador, com os modelos possuindo deformações no enrolamento interno da Fase B, é importante mencionar que foi realizado um estudo em paralelo para a verificação das formulações utilizadas no ATP, na determinação das forças radiais e axiais. Este estudo fez-se necessário, uma vez que, conforme

observado durante o processo de validação dos modelos, notou-se uma diferença percentual extremamente elevada (aproximadamente de 20% para as forças radiais e 50% para as axiais) entre o referido parâmetro obtido no *software* FLUX3D e no ATP.

Outro detalhe importante que deve ser mencionado neste momento é que as formulações utilizadas no ATP foram baseadas em estudos realizados para a condição de curto-circuito, e não de energização. Desta forma, acredita-se que se faça necessário um ajuste nos equacionamentos para que se possa utilizá-lo na energização.

Tais formulações, principalmente em se tratando de forças axiais, foram baseadas em medições realizadas [22], ou seja, são formulações empíricas.

E.1) ESTUDOS DAS FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA CÁLCULOS DE FORÇAS RADIAIS E AXIAIS NOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES DURANTE A ENERGIZAÇÃO

O estudo aqui proposto é baseado em duas novas simulações e situações de energização, com o transformador não possuindo nenhuma deformação em seus enrolamentos. O transformador será energizado de tal forma que o enrolamento da fase central possua o maior pico de corrente. No primeiro caso, os enrolamentos energizados são os externos, sendo os internos deixados em aberto. No segundo, energizam-se os internos e os externos são deixados em aberto.

Para um comparativo e balizamento dos estudos aqui propostos, tais simulações foram inicialmente realizadas no FLUX3D. Na sequência, os mesmos estudos foram feitos no ATP com a formulação analítica já proposta anteriormente. Após algumas alterações nas formulações, realiza-se novamente os mesmos estudos para verificar as modificações obtidas nos resultados e se estas são coerentes com o esperado.

É válido mencionar que tais alterações serão somente empregadas para o caso do transformador estar sendo submetido ao ensaio de energização, uma vez que, para o caso do curto-circuito, tais formulações são bem conhecidas e consagradas.

E.1.1) ESTUDOS REALIZADOS NO FLUX3D

Conforme mencionado anteriormente, o transformador de 15 kVA foi submetido a dois tipos de energização, um pelo lado de alta e outro pelo lado de baixa, ou seja, pelos enrolamentos externos e internos, respectivamente. As fontes utilizadas nestes estudos se diferenciam das utilizadas anteriormente (durante o processo de validação) pelos ângulos de fase.

Assim, a Fase A possui um ângulo zero e as Fases B e C são defasadas da mesma de -120° e 120° , respectivamente, conforme apresentado pelas expressões subsequentes.

$$V_A = V_m \times \cos(\omega t + 0^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t + 0^\circ)$$

$$V_B = V_m \times \cos(\omega t - 120^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t - 120^\circ)$$

$$V_C = V_m \times \cos(\omega t + 120^\circ) = 179,605 \times \cos(2 \times \pi \times 60 \times t + 120^\circ)$$

O instante escolhido para o fechamento dos três polos das chaves é exatamente onde a tensão na Fase B passa por seu valor zero ($t = 1,43$ ms), de tal forma que as correntes obtidas nesta fase fossem a maior possível. Este instante é utilizado tanto na energização do enrolamento interno quanto do externo.

A) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO EXTERNO

As correntes obtidas nas três fases, ao energizar os enrolamentos externos no FLUX3D, podem ser observadas na Figura 5.7.

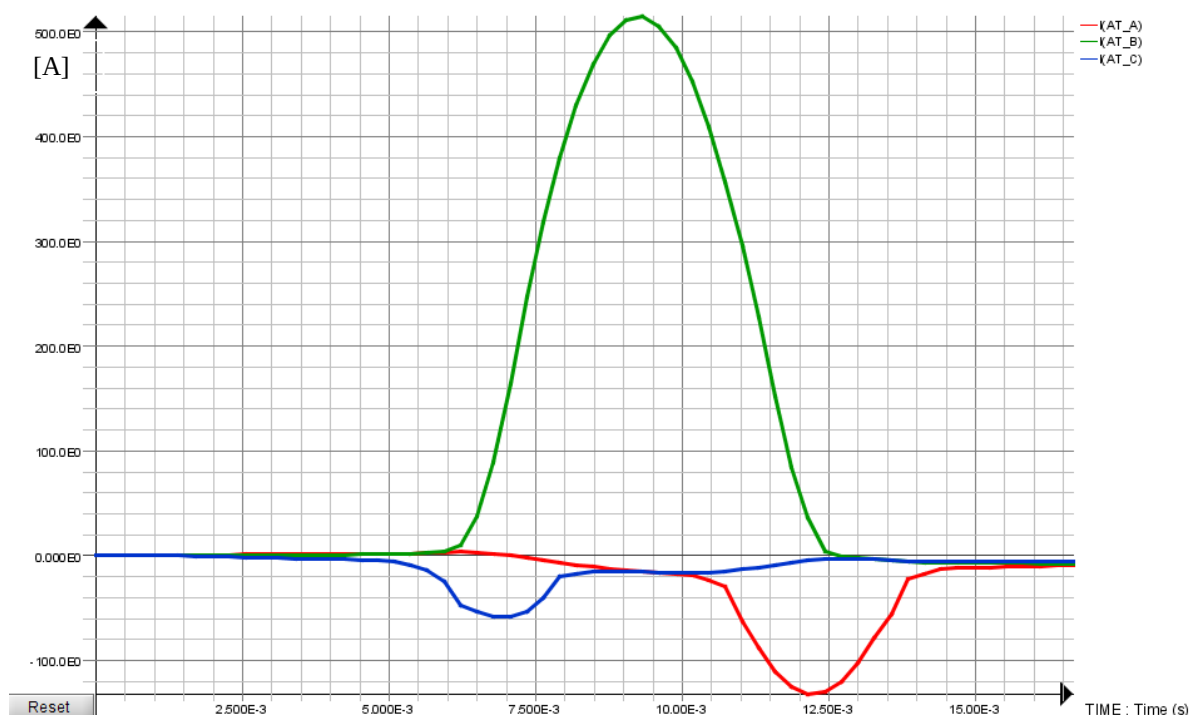


Figura 5.7: Correntes de energização nos enrolamentos externos.

Pelo fato do chaveamento ter ocorrido no instante de tempo onde a tensão passava por zero na Fase B, era de esperar que as correntes nas Fases A e C, pelo equilíbrio das mesmas, possuísem valores iguais. Entretanto, pelo passo de integração utilizado durante a simulação, acaba ocorrendo uma diferença entre as mesmas, conforme observado na Figura 5.7, uma vez que, o chaveamento não ocorre de forma instantânea e sim no próximo passo de integração. Porém tal fator não impede a continuidade do estudo aqui proposto.

Com tal energização o valor do primeiro pico da corrente no enrolamento externo da Fase B foi de 514,63 A, enquanto que, a distribuição da densidade de fluxo produzida pela mesma é apresentada na Figura 5.8. Nota-se que esta densidade se distribui desde o enrolamento externo, passando pelo enrolamento interno, até chegar ao núcleo do transformador. Sendo seu valor máximo próximo de 248 mT, ocorrendo entre os enrolamentos, no enrolamento interno e entre este último e a coluna.

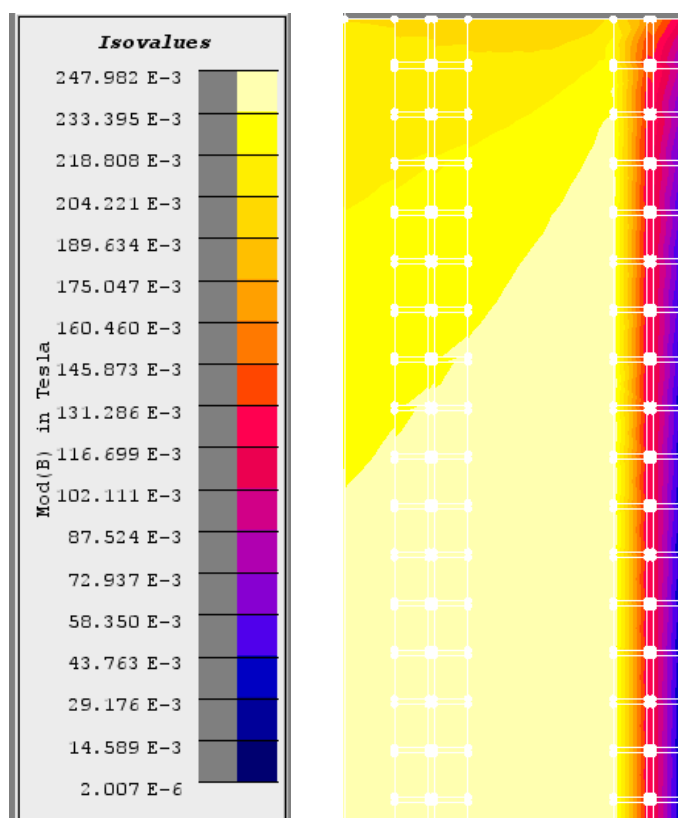


Figura 5.8: Distribuição da densidade de fluxo no instante de corrente máxima na fase B.

Retornando à teoria de forças eletromagnéticas, sabe-se que a força imposta ao enrolamento é igual ao produto vetorial entre a densidade de corrente que o percorre e a densidade de fluxo magnético ao qual é submetido. Neste sentido, como o enrolamento interno é deixado em aberto, não há corrente percorrendo o mesmo, não existindo consequentemente nenhuma força sobre ele.

Para o enrolamento externo, a força radial média, que depende da densidade do fluxo axial, foi de 523 N. A força compressiva total e a do enrolamento externo foram iguais a 155,56 N, conforme esperado, pelo motivo anteriormente exposto.

B) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO INTERNO

Realizada a energização do transformador pelo enrolamento interno, nas mesmas condições utilizadas no item anterior, tem-se na Figura 5.9 as correntes obtidas nos mesmos.

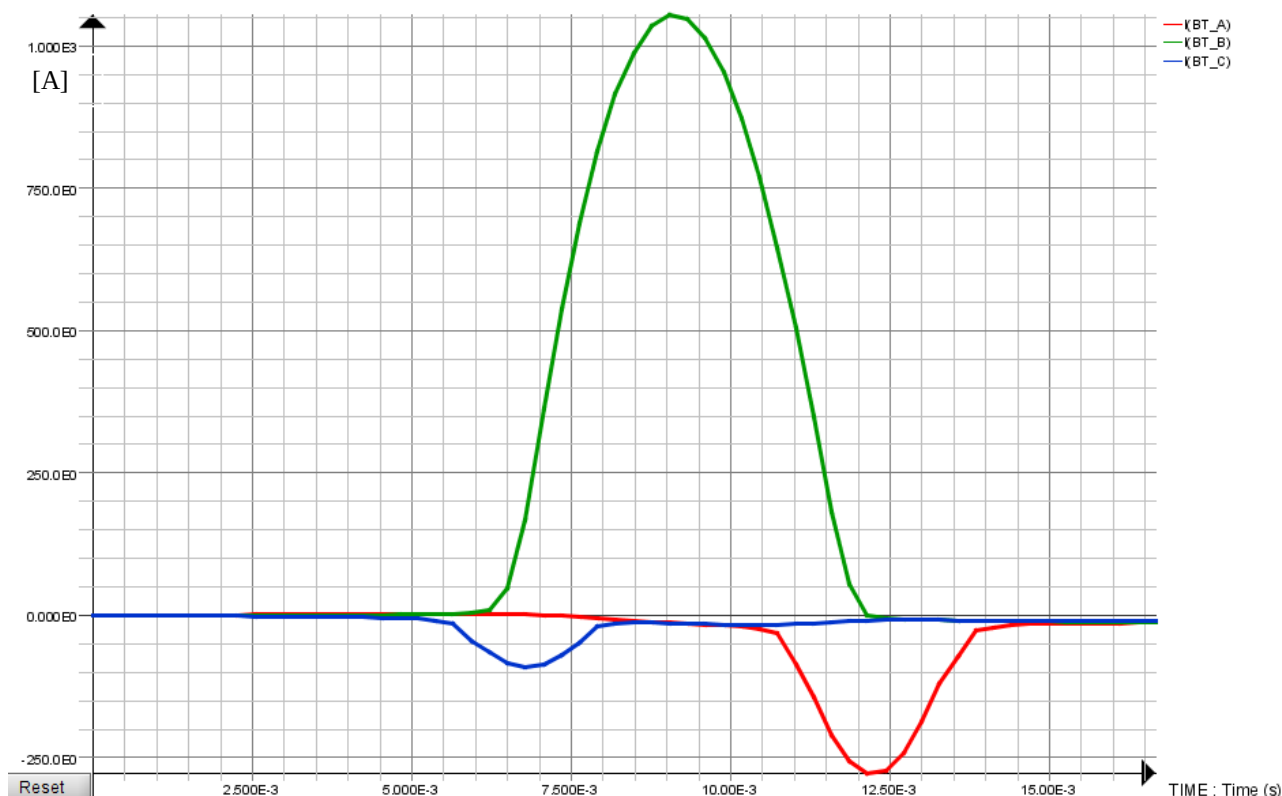


Figura 5.9: Correntes de energização nos enrolamentos internos.

O pico da corrente na Fase B foi de 1.054,15 A. Para este valor de corrente, a distribuição da densidade de fluxo na referida fase é apresentada na Figura 5.10. Nota-se agora que esta densidade tem como caminho o espaço de ar entre o enrolamento interno e o núcleo. O valor máximo para este parâmetro foi de aproximadamente 511 mT. Entre enrolamentos, a densidade do fluxo de dispersão fica praticamente nula.

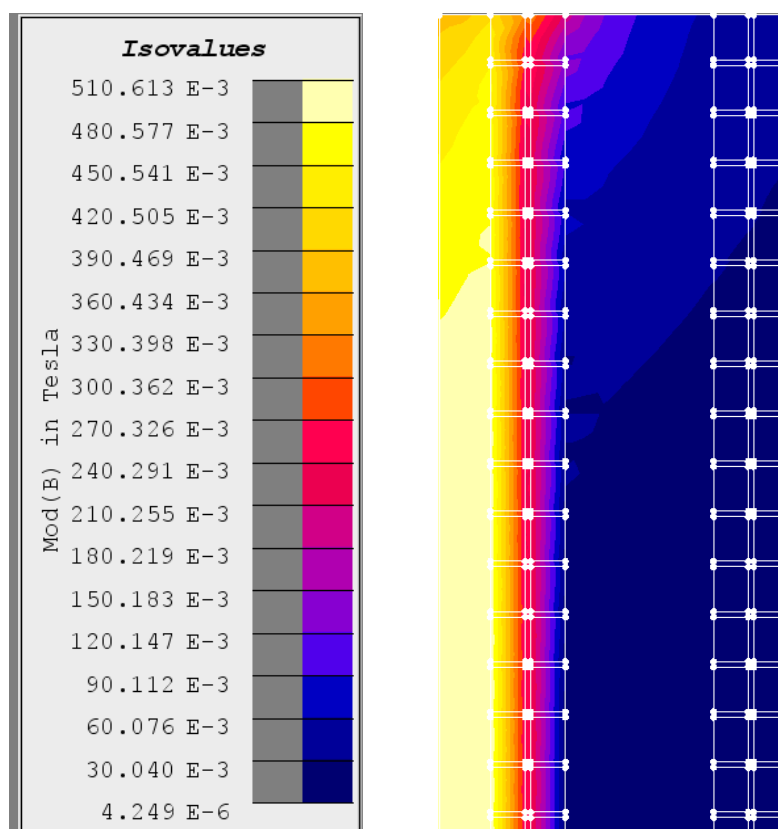


Figura 5.10: Distribuição da densidade de fluxo no instante de corrente máxima na fase B.

Com base na teoria de forças eletromagnéticas, a força radial média no enrolamento interno foi de 1.524,45 N, sendo que as forças axiais compressivas, total e no enrolamento interno foram iguais a 410 N.

E.1.2) ESTUDOS REALIZADOS NO ATP EMPREGANDO FORMULAÇÕES ANALÍTICAS CONVENCIONAIS

Com o intuito de verificar as formulações analíticas empregadas no ATP realizou-se as mesmas simulações anteriormente discutidas utilizando agora o referido *software*.

A) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO EXTERNO

As correntes nos enrolamentos externos são apresentadas na Figura 5.11, onde nota-se que o valor máximo foi obtido na Fase B, correspondente a aproximadamente 518 A.

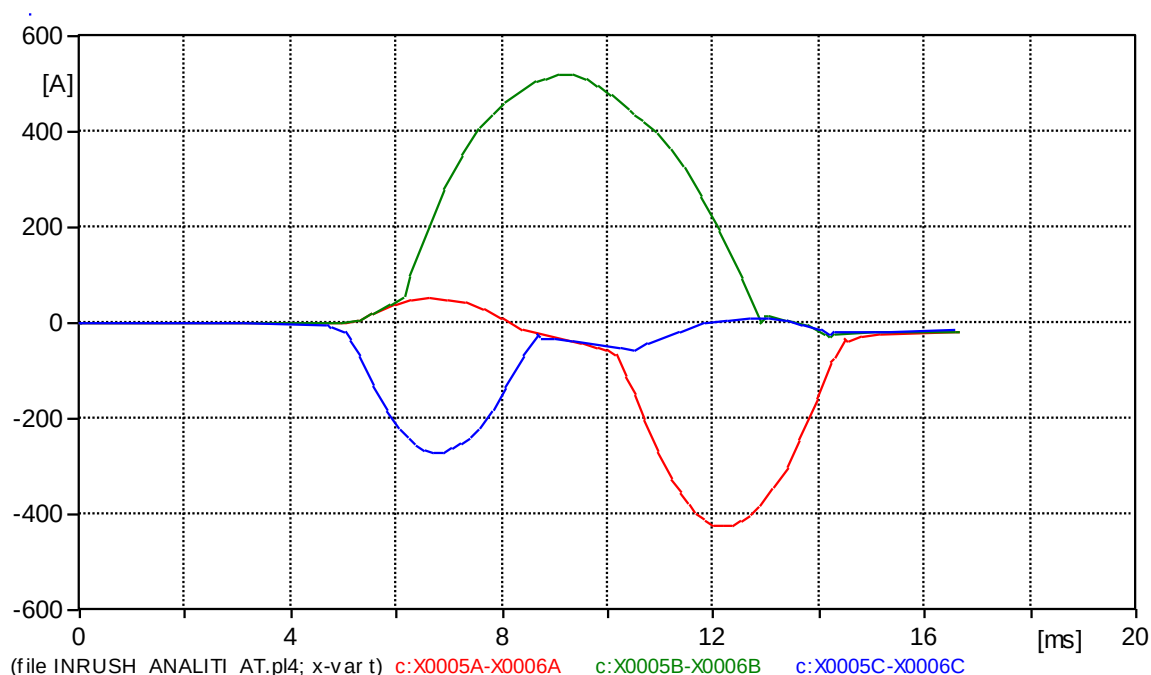


Figura 5.11: Correntes de energização nos enrolamentos externos.

A densidade do fluxo de dispersão entre o enrolamento externo e o interno obtidos neste caso foi de 255,43 mT, através do equacionamento apresentado no Capítulo II. Já a densidade existente entre o enrolamento interno e coluna, obtida no próprio modelo com o auxílio de um integrador, conforme exposto no Anexo II, tem um valor de 271 mT.

A força radial média no enrolamento externo foi de 620 N. As forças axiais compressivas, totais e do enrolamento externo foram 240 N e 80 N, respectivamente. Este fato, conforme já analisado anteriormente, não condiz com o esperado, pois ambos os parâmetros deveriam possuir o mesmo valor, uma vez que não existe corrente no enrolamento interno. Ou seja, as formulações utilizadas no ATP partem do princípio que os dois enrolamentos do

transformador estão sendo percorridos por correntes e inicia os cálculos para as forças axiais compressivas pela total, sendo que na sequência distribui a mesma em proporções de $2/3$ e $1/3$ para os enrolamentos interno e externo, respectivamente.

Para o caso de energização, existe corrente apenas em um dos enrolamentos, ou seja, a força axial compressiva total e a do enrolamento energizado possuem o mesmo valor. Este fato indica que, para o caso de energização, o cálculo da força axial compressiva deveria começar pelas individuais e na sequência somá-las para a obtenção da total, evitando assim a distribuição errônea como apresentada anteriormente.

B) ENERGIZAÇÃO DO ENROLAMENTO INTERNO

Energizando-se o enrolamento interno, o valor obtido para a corrente na Fase B foi de 953 A. A densidade de fluxo de dispersão foi de 473 mT, e entre coluna e enrolamento interno, de 488 mT. Novamente ressalta-se que a densidade do fluxo de dispersão é obtida tendo como base a formulação analítica, que, conforme verificado no FLUX3D, deveria ser zero neste caso. A força radial média no enrolamento interno foi de 1.457 N, ao passo que as axiais compressivas totais e no enrolamento sob energização foram 822 N e 548 N, respectivamente. Novamente, observa-se que as forças axiais compressivas, total e no enrolamento interno, possuem valores diferentes, o que não deveria ocorrer em virtude do que foi observado no FLUX3D e justificado no caso anterior.

E.1.3) COMPARATIVO ENTRE OS ESTUDOS APRESENTADOS

A Tabela 5.13 mostra um breve comparativo entre os estudos apresentados até o presente momento. Observando a referida tabela, é possível

ponderar alguns pontos, considerados mais importantes, para que se possam ajustar as formulações analíticas empregadas nos cálculos das forças eletromagnéticas nos enrolamentos do transformador, quando pelos mesmos percorrer correntes de energização, e não de curto-circuito.

Tabela 5.13: Comparativo entre FLUX3D e ATP com formulações analíticas originais (ATP1)

Parâmetro	Enrolamento Externo		Enrolamento Interno	
	FLUX3D	ATP1	FLUX3D	ATP1
Corrente [A]	514,63	518,00	1054,15	1.076,10
Densidade de fluxo dispersão [mT]	248,00	255,43	0,00	473,00
Densidade de fluxo entre coluna e enr. int. [mT]	248,00	271,00	511,00	487,00
Força radial média [N]	523,00	620,00	1524,45	1.457,00
Força axial comp. total [N]	155,56	240,00	410,00	822,00
Força axial enr. energizado [N]	155,56	80,00	410,00	548,00

Quando o transformador foi energizado pelo enrolamento externo, houve uma proximidade muito boa entre as correntes obtidas em ambos os *softwares*, assim como para as densidades dos fluxos de dispersão (entre enrolamentos) e entre coluna e enrolamento interno. As forças radiais médias ficaram com diferença percentual próxima de 18%, o que até o presente momento não necessitariam de nenhum ajuste nas formulações utilizadas. Entretanto, ao se comparar as forças axiais compressivas totais, tal diferença está próxima de 54%. Quando comparados os valores de tal força para o enrolamento energizado, ou seja, o externo, tal diferença fica próxima dos 50%, indicando que alguma alteração nas formulações deve ser realizada.

Ao analisar os resultados obtidos com a simulação de energização pelo enrolamento interno, nota-se que novamente as correntes também ficaram próximas, com uma diferença percentual próxima de 2%. Observando a densidade do fluxo de dispersão há uma diferença preocupante, pois, neste caso, no FLUX3D, praticamente não há densidade de fluxo entre os enrolamentos de uma mesma fase. Este fato não se repetiu no ATP, uma vez que a formulação

deste *software* leva em consideração parâmetros constantes, bem como a corrente que percorre o enrolamento energizado.

Neste ponto, ressalva-se a necessidade de se calcular a densidade do fluxo de dispersão de outra forma, para que os resultados obtidos no referido modelo possam ser mais confiáveis. Ainda nesta simulação nota-se que a densidade entre a coluna e o enrolamento interno ficaram próximas entre *softwares*, ou seja, a diferença percentual não ultrapassou 5%. As forças radiais médias também podem ser consideradas satisfatórias, pois, também não ultrapassaram o valor de 5% de diferença percentual. A última análise nesta simulação é relativa à força axial compressiva, total e no enrolamento interno, sendo que para a primeira a diferença chega a 100%, enquanto que para a segunda este valor se aproxima de 34%.

Levando-se em consideração tais análises, julga-se necessário algumas adequações nas formulações analíticas para o caso do transformador estar sendo submetido à condição de energização. Um dos principais motivos para tais alterações é o fato de existir corrente em apenas um dos enrolamentos, diferente do caso de curto-circuito onde há corrente nos dois enrolamentos simultaneamente; desta forma, para o caso do transformador estar sendo submetido a este último evento, tais formulações não serão alteradas.

E.1.4) ESTUDOS REALIZADOS NO ATP EMPREGANDO FORMULAÇÕES ANALÍTICAS MODIFICADAS

A proposta aqui apresentada consiste inicialmente em calcular a densidade do fluxo de dispersão da mesma maneira que a densidade entre coluna e enrolamento interno, ou seja, com o auxílio do integrador (Anexo II). Na sequência, algumas ponderações são necessárias para que se possa alterar as formulações analíticas.

Observando os resultados obtidos nas Figuras 5.8 e 5.10, nota-se que quando o enrolamento energizado é o externo, este fica submetido à, aproximadamente, metade da densidade do fluxo de dispersão. Entretanto, quando a energização é realizada pelo enrolamento interno, este fica submetido à metade da densidade de fluxo existente entre este enrolamento e a coluna do núcleo do transformador. Esta observação indica a necessidade de adequar as forças radiais a tais submissões, ou seja, para o cálculo de tais parâmetros, a indução magnética utilizada na formulação serão agora as acima mencionadas.

Outra alteração proposta é a de calcular as forças axiais tendo como base as formulações conhecidas, mas com pequenas modificações embasadas nas mesmas figuras anteriormente analisadas (Figuras 5.8 e 5.10).

Com base nas figuras mencionadas e nas formulações apresentadas no Capítulo II, optou-se por reduzir alguns parâmetros, pois em se tratando de energização, tais variáveis não contribuem com as forças analisadas.

Como exemplo tem-se que, (i) ao invés de utilizar o diâmetro médio do transformador (D_{mt}), será utilizado o diâmetro médio do enrolamento (D_{mi} ou D_{me}) sob estudo; (ii) a espessura do ducto será desconsiderado para ambos enrolamentos (d_0) e (iii) a espessura do enrolamento será utilizado somente daquele que se encontra energizado (d_i ou d_e). Novamente aqui, a densidade de fluxo utilizado tem como base a explicação anteriormente fornecida.

Assim, as Equações 5.1 e 5.2 apresentam as novas formulações empregadas para os cálculos das forças axiais individuais. A força compressiva axial total é fornecida pela soma direta das individuais.

$$F_{c-i} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 D_{mi} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[\frac{d_i}{3} \right] [N] \quad (5.1)$$

$$F_{c-e} = \frac{2\pi^2 \cdot (nI_s)^2 D_{me} \cdot 10^{-7}}{h^2} \left[\frac{d_e}{3} \right] [N] \quad (5.2)$$

Com tais considerações e simulando novamente os casos anteriormente apresentados, tem-se na Tabela 5.13 os valores obtidos nas novas simulações (ATP2) bem como os valores já apresentados anteriormente (FLUX3D e ATP1).

Tabela 5.13: Comparativo entre FLUX3D e ATP com formulações analíticas com e sem modificações

Parâmetro	Enrolamento Externo			Enrolamento Interno		
	FLUX3D	ATP1	ATP2	FLUX3D	ATP1	ATP2
Corrente [A]	514,63	518,00	518,00	1.053,57	1.076,10	1.076,10
Densidade de fluxo dispersão [mT]	248,00	255,21	235,00	0,00	473,00	0,00
Densidade de fluxo entre coluna e enr. int. [mT]	248,00	271,00	273,00	511,00	487,00	480,00
Força radial média [N]	523,00	618,00	572,00	1.524,45	1.457,00	1.639,90
Força axial comp. total [N]	155,56	240,00	162,24	409,95	822,00	465,59
Força axial enr. energizado [N]	155,56	80,00	162,24	409,95	548,00	465,59

Ao analisar a tabela acima, nota-se que houve uma aproximação significativa relacionadas às forças tanto radiais quanto axiais, em ambos os casos, bem como o desaparecimento da densidade de fluxo de dispersão para o caso do enrolamento energizado ser o interno, assim como ocorrido com no FLUX3D. Acredita-se que com tais alterações as formulações analíticas apresentam resultados satisfatórios e podem ser utilizadas para a condição de energização.

Para verificar a eficácia das formulações analíticas, optou-se por simular a condição de energização empregada na validação do modelo e comparar os resultados com aqueles obtidos na ocasião. A Tabela 5.14 apresenta tal análise, onde verifica-se que também existe uma melhora nos resultados.

As diferenças percentuais obtidas para a força radial total, radial média e estresse radial ficam próximas de 4%, sendo que as compressivas axiais totais e enrolamento interno próximas de 28%.

Tabela 5.14: Comparativo entre FLUX3D e ATP com formulações analíticas com e sem modificações

Parâmetro	FLUX3D	ATP1	ATP2
	C	C	C
FR_IN [N]	4680,87	6020,5	4493,0
FRMIN [N]	1489,97	1916,4	1430,4
ERMIN [N/m²]	0,71E6	0,92E6	0,68E6
FACTO [N]	565,32	1081,4	406,0
FACTI [N]	565,32	720,92	406,0

A partir das alterações apresentadas anteriormente, realizam-se as simulações nos modelos do transformador para verificar possíveis alterações de parâmetros quando as deformações incidem sobre o enrolamento interno da Fase B.

Pelo fato deste enrolamento interno possuir deformações, optou-se por energizá-lo com o valor máximo de corrente; desta forma, as simulações subsequentes seguiram o mesmo padrão apresentado no estudo anterior.

E.2) GRANDEZAS ELÉTRICAS

As primeiras análises realizadas são referentes ao primeiro pico na corrente da Fase B, as quais podem ser observadas na Tabela 5.15. Tanto no ATP, como no FLUX3D há uma diminuição em tal parâmetro à medida que a deformação é inserida e aumentada no enrolamento. As variações em ambos programas computacionais foram de 0,47% e 0,93%.

Tabela 5.15: Síntese dos resultados das simulações de energização do transformador.

Software	I_B [A] (1^o pico)
ATP - SEM DEF.	1.076,10
ATP - CASO 1	1.071,00
ATP - CASO 2	1.066,10
FLUX3D - SEM DEF.	1.053,57
FLUX3D - CASO 1	1.048,63
FLUX3D - CASO 2	1.043,71

E.3) GRANDEZAS MAGNÉTICAS

As densidades de fluxos para a coluna na Fase B não sofreram alterações, nem no ATP e nem no FLUX3D, conforme apresentado na Tabela 5.16. Já as dispersões sofreram um decaimento, sendo este de 0,42% e 0,85% para o ATP, e 0,58% e 1,17% no FLUX3D.

Tabela 5.16: Densidades de fluxos para coluna e dispersão na Fase B, do transformador, na condição de energização.

<i>Software</i>	Coluna	Dispersão
	B_{COL_B} [T]	B_{DISP_B} [T]
ATP - SEM DEF.	2,53	0,472
ATP - CASO 1	2,53	0,470
ATP - CASO 2	2,53	0,468
FLUX3D - SEM DEF.	2,52	0,514
FLUX3D - CASO 1	2,52	0,511
FLUX3D - CASO 2	2,52	0,508

E.4) GRANDEZAS MECÂNICAS

Finalmente, ao estudar a variação das forças eletromecânicas no enrolamento interno da Fase B, durante o processo de energização, nota-se que tanto no ATP quanto no FLUX3D, há um aumento nas forças radiais, conforme apresentado na Tabela 5.17. As variações no ATP foram de 0,58% e 1,19%; já para o outro *software*, esta foi de 4,77% e 7,53%. É interessante observar que no FLUX3D houve uma modificação mais acentuada, a qual inclusive deve ser considerada mais real, uma vez que no ATP as formulações ainda se baseiam em simplificações que acarretam tais diferenças.

Finalmente, comparando as forças axiais nota-se um decaimento das mesmas em ambos os programas, sendo este de 0,97% e 1,88% no ATP, e 0,91% e 1,78% no FLUX3D. Este fator pode indicar que no caso de energização não ocorreram problemas com as forças axiais.

Tabela 5.17: Módulos das forças e estresses para a condição de energização.

Parâmetro	ATP SEM DEF.	ATP CASO 1	ATP CASO 2	FLUX3D SEM DEF.	FLUX3D CASO 1	FLUX3D CASO 2
	B	B	B	B	B	B
FR_IN [N]	5.152,00	5.181,90	5.213,50	4.858,79	5.090,79	5.224,78
FRMIN [N]	1.639,90	1.649,40	1.659,50	1.546,60	1.620,45	1.663,10
ERMIN [N/m ²]	7,89E5	7,93E5	7,98E5	7,44E5	7,79E5	8,00E5
FACTO [N]	465,59	461,08	456,86	409,95	406,21	402,66
FACTI [N]	465,59	461,08	456,86	409,95	406,21	402,66

F) DETERMINAÇÃO DAS CAPACITÂNCIAS INTRÍNSECAS

Os últimos parâmetros analisados nesta etapa do trabalho são as capacitâncias intrínsecas existentes no transformador. Ressalta-se que este estudo é realizado apenas com o auxílio do *software* FLUX3D, uma vez que no ATP tais parâmetros não podem ser determinados.

As três capacitâncias monitoradas ocorrem entre o enrolamento interno e a coluna (C_{ic}), o enrolamento interno e o externo (C_{ie}) e entre o enrolamento externo e o tanque (C_{et}). A Tabela 5.18 mostra o valor obtido para cada uma destas capacitâncias nas três condições sob estudo.

A capacitância entre enrolamento externo e tanque praticamente não varia com as deformações impostas ao enrolamento interno da Fase B, conforme visualizado na Tabela 5.18. As capacitâncias existentes entre enrolamentos e bobina interna e núcleo das Fases A e C, não apresentadas na Tabela supramencionada, mas verificadas também não possuem nenhuma alteração.

As diferenças percentuais obtidas entre enrolamento interno e externo crescem de 2,5% e 5,32%, enquanto que a existente entre enrolamento interno e coluna diminui de 0,99% e 2,00%. Verificam-se que as deformações no enrolamento interno afetaram muito mais a capacitância entre enrolamentos que entre enrolamento interno e coluna.

Tabela 5.18: Capacitâncias obtidas através de simulações no FLUX3D

Capacitância	FLUX3D - SEM DEF.	FLUX3D - CASO 1	FLUX3D - CASO 2
C_{ie} [pF]	144,908	148,492	152,62
C_{ic} [pF]	321,078	317,9	314,62
C_{et} [pF]	94,729	94,815	94,995

5.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo foi iniciado com uma breve apresentação do tipo de deformação ao qual o enrolamento do transformador de 15 kVA será submetido nos estudos propostos. Devido ao tipo de enrolamento existente no equipamento em questão, a única deformação que o mesmo poderia sofrer é a do tipo “curvatura livre”, a qual foi aplicada no enrolamento interno da fase central (Fase B), visto que é a que mais sofre com a ocorrência do curto-circuito.

Na sequência, apresentaram-se as deformações representadas no *software* FLUX3D, as quais foram tratadas no decorrer do texto como sendo CASO 1 e CASO 2. No primeiro caso, apenas uma saliência foi imposta ao enrolamento interno da Fase B; já no segundo, a mesma saliência foi imposta nos dois lados do enrolamento. Com tais alterações, os elementos de malha criados pelo *software*, principalmente no enrolamento deformado, foram diferentes entre o modelo sem deformação, com a primeira e a segunda. Este fato pode gerar pequenas diferenças em alguns parâmetros dos modelos; entretanto, tais diferenças são insignificantes quando comparados com as que poderão surgir nos modelos devido as deformações propriamente dito.

Na sequência dos estudos apresentou-se o procedimento para a implementação de tais deformações no ATP, ou seja, os parâmetros que sofrem alterações, após a deformação no enrolamento, são as indutâncias entre coluna e enrolamento interno (L_{ic}) e entre enrolamentos (L_{ie}), bem como a resistência da bobina deformada. Para a determinação destes novos parâmetros foram

utilizados equacionamentos já apresentados no Capítulo II, juntamente aos valores de áreas necessários, obtidos no *software* FLUX3D.

Todas as análises realizadas tiveram como base o valor obtido nas simulações com o enrolamento não deformado, ou seja, as comparações desempenhadas verificam o aumento ou diminuição percentualmente de parâmetros quando as deformações incidem sobre o enrolamento interno da Fase B.

Neste contexto, a primeira verificação realizada foi referente às indutâncias supracitadas. Aquela existente entre enrolamentos, ou seja, que no ATP representa o fluxo no mesmo volume, diminui cerca de 0,65% e 1,3%, no CASO 1 e CASO 2, respectivamente. Já a indutância entre enrolamento interno e coluna aumenta 3,5% para o CASO 1 e 6,99% para o CASO 2. Quando a resistência na bobina interna da Fase B, sofre um aumento a cada deformação imposta, sendo este de 0,38% para o primeiro caso e 0,72% para o segundo.

Tal resistência poderia ter tido um aumento ainda maior, pois ao se deformar o enrolamento no FLUX3D, apenas o comprimento do mesmo teve suas dimensões alteradas, sendo a área da seção transversal mantida constante, entretanto em uma deformação real, este último iria diminuir. Pelo fato da resistência depender diretamente do comprimento e inversamente da área da seção transversal, fica claro que a resistência em questão poderia ter aumentado um pouco mais.

Após os ajustes destas últimas variáveis no modelo do ATP, iniciaram-se as novas simulações com os novos modelos criados. Cada um destes modelos, tanto no ATP quando no FLUX3D foram submetidos as mesmas condições operacionais, já apresentadas no Capítulo 4, para os casos a vazio, carga nominal, curto-circuito com tensão reduzida, curto-circuito trifásico “passante” e energização. Além claro, das capacitâncias intrínsecas verificadas apenas no FLUX3D.

Para as simulações a vazio, os dois *softwares* apresentaram o mesmo comportamento, ou seja, não houve nenhuma alteração nas correntes de magnetização (pico e eficaz), perdas no núcleo e densidades de fluxos nas colunas e culatras. Este fato era esperado, uma vez que a referida simulação depende do núcleo magnético, o qual não sofreu nenhuma alteração nos modelos estudados.

Aplicando um carregamento nominal no transformador não obteve-se nenhuma variação nem nos parâmetros elétrico e nem nos magnéticos quando as deformações foram aplicadas no enrolamento.

Nas simulações de curto-circuito com tensão reduzida, observa-se que os parâmetros analisados nas Fases A e C não se alteraram diferentemente da Fase B. Nesta a corrente possui um acréscimo de 0,37% e 0,74% no ATP, e 0,27% e 0,54% no FLUX3D. Desta forma, nota-se a mesma tendência em ambos os modelos, ou seja, de um acréscimo na corrente, durante o curto, na fase onde existe um enrolamento deformado. Outra variação observada nesta simulação foi em relação a perda nos enrolamentos, que no ATP aumentou 0,27% e 0,55%, e no FLUX3D de 0,21% e 0,43%. Outra análise realizada nestas simulações foram as variações das impedâncias percentuais, as quais foram de 0,14%, e 0,29% no ATP, e 0,12% e 0,21% no FLUX3D.

As variações mais significativas obtidas nas grandezas magnéticas para a condição operacional de curto-circuito com tensão reduzida são observadas tanto no ATP quando no FLUX3D em dois parâmetros: na densidade de fluxo de coluna e de dispersão na Fase B. Onde para a coluna, a variação foi de 0,42% e 0,85% no ATP, e 0,76% e 1,27% no FLUX3D. Quanto à dispersão, esta variou de 0,46% e 0,86% no ATP, e 0,26% e 0,45% no FLUX3D.

Nesta última condição operacional, pode-se observar pequenas variações em um parâmetro importante, a impedância percentual. Ambos os *softwares* responderam de forma semelhante as alterações proporcionadas pelas

deformações, ou seja, quando a deformação é duplicada (CASO 2), nota-se que a diferença percentual obtida na referida variável também duplica.

Durante a simulação de curto-circuito trifásico, os valores de correntes na Fase B possuem certa elevação tanto no enrolamento externo quando no interno, tais alterações foram de 0,24% e 0,48% no ATP, e 0,21% e 1,22% no FLUX3D. O fato da variação no FLUX3D ter ficado um pouco maior que no ATP, pode estar relacionado com a malha no modelo a qual já foi devidamente explicada anteriormente.

As alterações que ocorrem nas densidades de fluxos magnéticos nas colunas e culatras podem ser consideradas desprezíveis, diferentemente das de dispersão. Esta última possui variações significativas na Fase B que são de 0,34% e 0,57% no ATP, e 0,95% e 2,84% no FLUX3D.

As análises das grandezas mecânicas iniciaram-se com as forças radiais as quais aumentam aproximadamente 2%, no enrolamento interno da Fase B, a cada deformação imposta no ATP. Já para o FLUX3D esta alteração fica próxima de 6% e 14%. Com tais fatos há um indicio de que uma deformação no enrolamento tem a tendência de aumentar o estresse sob o mesmo, podendo aumentar ainda mais a deformação existente ou deformar o enrolamento em outro ponto. Isto indica ainda uma possível ocorrência de ruptura de dielétricos que envolvem o enrolamento, ou até mesmo o próprio cobre caso o estresse crítico do mesmo seja alcançado.

As forças radiais no enrolamento externo da Fase B, possuem variações que não ultrapassam 1,5% no ATP e 2% no FLUX3D, entretanto, este fato pode indicar que dependendo da deformação no enrolamento interno esta pode induzir um aumento no estresse do enrolamento externo, podendo levá-lo a uma deformação e suas consequências.

Quanto as forças axiais compressivas totais estas variam de 0,5% a 1% no ATP, e de 0,4% a 1,5% no FLUX3D, para a Fase B. Já as alterações das forças

axiais compressivas no enrolamento interno possuem variações de 0,6% e 1,17% no ATP, enquanto que no FLUX3D esta varia de 0,98% e 3,13%. Para o enrolamento externo tem-se alterações de 0,58% e 1,17% no ATP, e 0,43% e 1,00% no FLUX3D.

Observando tais estudos pode-se notar que no ATP as variações tanto no enrolamento interno, quando no externo foram iguais, fato este explicado facilmente pelas formulações analíticas aplicadas no referido *software* para os cálculos de tais parâmetros. Estas são baseadas em variáveis que permanecem constantes em todos os casos analisados, alterando apenas o valor da corrente. No FLUX3D este fato não ocorre, pois a cada estudo realizado a geometria do transformador é alterada e analisada de acordo com esta modificação. Com isto o parâmetro força axial compressiva no enrolamento interno e no externo acabam possuindo variações diferenciadas, de forma que no interno esta se demonstra mais acentuada que no externo.

As modificações nas forças axiais não se aproximam das obtidas para as radiais, o que pode ser um indicativo que pelo o menos o enrolamento interno, ou seja, o que possui uma deformação tipo radial, pode sofrer algum tipo de deformação também axial, piorando ainda mais o estado físico do enrolamento em questão.

Finalizados os estudos de curto-circuito, iniciou-se as análises referentes a condição operacional de energização. Contudo, pelo fato de existirem discrepâncias elevadas em se tratando de forças radiais e axiais quando comparados os obtidos no ATP e no FLUX3D durante o processo de validação, optou-se por realizar um estudo prévio para adequar as formulações analíticas utilizadas no ATP, para se obter os valores das variáveis acima mencionadas de forma mais coerente.

Neste estudo foi verificado o comportamento do transformador em duas situações distintas, empregando o FLUX3D e sem nenhuma deformação nos enrolamentos. Na primeira os enrolamentos externos são conectados a fonte e os

internos deixados em aberto, na segunda o inverso é considerado. Em ambas situações os três polos da chave, que conecta o enrolamento a fonte, são fechados simultaneamente no instante de tempo onde a tensão na Fase B passa por zero, de tal forma que a corrente naquela fase seja possua o maior valor.

Analisando os resultados pôde-se concluir alguns itens que se julgaram interessantes, ou seja, quando o enrolamento externo é energizado, a densidade de fluxo ao qual tal enrolamento fica submetido é a de dispersão, ou seja, aquela existente entre enrolamentos; entretanto, quando o enrolamento interno é energizado este fica submetido a densidade existente entre este e a coluna do núcleo do transformador.

Tais diferenças mostraram-se fundamentais em se tratando de forças eletromecânicas, de tal forma que algumas alterações foram propostas para que as formulações analíticas empregadas na ATP pudessem ser utilizadas no processo de energização.

As alterações propostas foram:

- Calcular a densidade de fluxo de dispersão da mesma maneira que a densidade entre coluna e enrolamento interno, ou seja, com o auxílio do integrador (Anexo II);

- Utilizar metade da densidade do fluxo de dispersão para calcular as forças radiais no enrolamento externo, e metade da densidade entre coluna e enrolamento interno para o cálculo da força radial no enrolamento interno;

- Calcular as forças axiais tendo como base as formulações conhecidas, entretanto, sofrendo pequenas modificações: ao invés de utilizar o diâmetro médio do transformador (D_{mt}), será utilizado o diâmetro médio do enrolamento (D_{mi} ou D_{me}) sob estudo; a espessura do ducto será desconsiderado para ambos enrolamentos (d_0); e a espessura do enrolamento será utilizado somente daquele que se encontra energizado (d_i ou d_e). Desta forma, serão calculadas inicialmente as forças axiais compressivas individuais e a força axial compressiva total é fornecida pela soma direta das individuais.

Após tais considerações e simulando novamente os casos iniciais, notou-se que houve uma melhora significativa relacionada às forças tanto radiais quanto axiais, em ambos os casos, bem como o desaparecimento da densidade do fluxo de dispersão para o caso do enrolamento energizado ser o interno, assim como ocorrido com no FLUX3D. Com tais alterações, as formulações analíticas apresentaram resultados satisfatórios, tornando-se adequadas para a utilização na condição de energização.

Ao submeter os modelos do ATP (com as modificações nas formulações analíticas) e do FLUX3D à condição de energização, verifica-se que em ambos programas computacionais as variações na corrente da Fase B foram de 0,47% e 0,93%. As densidades de fluxos para a coluna central (Fase B) não sofreram alterações, nem no ATP e nem no FLUX3D, e as de dispersões sofreram um decaimento, sendo este de 0,42% e 0,85% para o ATP, e 0,58% e 1,17% no FLUX3D.

Ao estudar a variação das forças eletromecânicas no enrolamento interno da Fase B, notou-se que tanto no ATP quanto no FLUX3D há um aumento nas forças radiais, sendo as variações no ATP de 0,58% e 1,19%, e de 4,77% e 7,53% no FLUX3D. É interessante observar que no FLUX3D houve uma modificação mais acentuada, a qual inclusive deve ser considerada mais real, uma vez que no ATP as formulações analíticas possuem simplificações que induzem tais diferenças. Finalmente, comparando as forças axiais nota-se um decaimento das mesmas em ambos os programas, sendo este de 0,97% e 1,88% no ATP, e 0,91% e 1,78% no FLUX3D.

O último estudo realizado foi em relação às capacitâncias intrínsecas existentes no transformador. Neste caso, a capacitância entre enrolamento externo e o tanque praticamente não varia com as deformações impostas ao enrolamento interno da Fase B. Enquanto isto as diferenças percentuais obtidas entre enrolamento interno e externo, na Fase B, crescem de 2,5% e 5,32%, já a existente entre enrolamento interno e coluna diminui de 0,99% e 2,00%.

Verifica-se que as deformações no enrolamento interno afetaram muito mais a capacitância entre enrolamentos que entre enrolamento interno e coluna.

De uma maneira em geral, neste Capítulo foi possível verificar que se um enrolamento possuir a deformação do tipo “curvatura livre”, esta pode ser observada em alguns casos, e em outros não. Ou seja, nos ensaios em vazio e medições com carga nominal a percepção de uma deformação no enrolamento não é possível. Entretanto, quando o ensaio de curto-circuito com tensão reduzida é realizado, pode-se perceber alterações tanto na corrente do enrolamento deformado, quanto na impedância percentual. Outro ensaio que facilmente percebe-se alterações na estrutura do enrolamento é a medição das capacitâncias parasitas, uma vez que as mesmas se modificam sob efeito das deformações radiais.

As simulações de curto-circuito trifásico “passante” e de energização mostram que as forças radiais aumentam quando o enrolamento possui uma deformação radial, o que pode indicar um aumento no estresse do enrolamento provocando um crescimento da deformação ou até mesmo uma possível ruptura dos dielétricos pertencentes ao mesmo. Já as forças axiais, estas possuem um aumento durante o curto-circuito e uma diminuição durante a energização. Percentualmente, tais variações são pequenas mediante às ocorridas nas forças radiais, mas podem indicar uma possível deformação axial no enrolamento, dependendo da magnitude da deformação radial existente no mesmo.

CAPÍTULO VI

METODOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ENROLAMENTOS DE TRANSFORMADORES

6.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após os estudos apresentados até o presente momento, inicia-se neste Capítulo uma sistematização de técnicas de diagnóstico e monitoramento para se avaliar a condição dos enrolamentos dos transformadores quando submetidos às elevadas correntes de curto-circuito e “*inrush*”.

As metodologias que serão apresentadas indicam de alguma maneira se os enrolamentos dos transformadores sofreram algum tipo de deformação/deslocamento, de forma que estas falhas possam comprometer a vida útil desses equipamentos. Todas estas técnicas são extremamente importantes para a verificação das condições dos enrolamentos e empregam os conceitos obtidos nos estudos realizados, os quais já indicaram os principais parâmetros que sofreram variações associados à deformações do enrolamento devido aos estresses eletromecânicos.

6.2 – AVALIAÇÃO ANALÍTICA E COMPUTACIONAL DA CONDIÇÃO MECÂNICA DOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES

Uma falha pode ocorrer nos enrolamentos dos transformadores quando a suportabilidade de suas propriedades essenciais é ultrapassada em situações de estresse. Desta forma, uma revisão de projeto ajuda a identificar o local e sua margem de segurança para prever o nível crítico do problema.

Diante dos estudos realizados, nota-se que o cálculo dos estresses admissíveis associados com forças axiais e radiais é de extrema importância. Por exemplo, durante o processo de fabricação de uma determinada unidade, os enrolamentos podem não estar devidamente estabilizados, resultando em um desalinhamento axial. A assimetria na altura do enrolamento causa um aumento significativo das forças axiais sobre os mesmos e nas estruturas de fixação [18]. Desta forma, uma nova simulação pode ser realizada a fim de identificar os novos valores dos estresses atuantes nos enrolamentos, e, conseqüentemente, se estimar os novos valores de margem de segurança, comparando-os com aqueles definidos em projeto.

No entanto, a aplicação de formulações analíticas, apesar de sua confiabilidade, é bem trabalhosa e torna-se extremamente complexa e pouco eficiente quando alguma deformação incide sobre os enrolamentos. Desta forma, pode-se dizer que para projeto, onde os enrolamentos não estão deformados, há a possibilidade de estimar os estresses dos mesmos por duas maneiras: uma através de cálculo analítico [18, 22], e outra por simulação baseada na técnica de elementos finitos, utilizando programas em ambientes 2D ou 3D, conforme proposto nesta tese. Entretanto, para a determinação desta variável com o enrolamento deformado, a utilização do método de elementos finitos torna-se obrigatória.

Além das avaliações analíticas e computacionais, tem sido desenvolvidas técnicas de medição a fim de diagnosticar as condições mecânicas dos enrolamentos devido às elevadas correntes que possam estar sujeitos. Desta forma, o próximo item faz uma síntese das principais medições existentes para avaliar falhas de origem eletromecânica.

6.3 – PRINCIPAIS TÉCNICAS LABORATORIAIS PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO MECÂNICA DOS ENROLAMENTOS DOS TRANSFORMADORES

O objetivo deste item é apresentar técnicas especiais que são capazes de avaliar a condição mecânica dos enrolamentos dos transformadores.

As técnicas a serem discutidas serão:

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

6.3.1 – MEDIÇÃO DE CAPACITÂNCIA DO ENROLAMENTO E ANÁLISES DO FATOR DE DISSIPACÃO (FD) E FATOR DE POTÊNCIA (FP) DE ISOLAMENTO

Este tipo de teste é uma das técnicas mais populares para detectar movimentos no enrolamento [2].

Um transformador contém um complicado sistema de isolamento. Para o caso de um transformador de dois enrolamentos, a bobina externa deve estar isolada tanto do tanque quanto da bobina interna, e esta última, por sua vez, isolada também do núcleo. Todos esses *gaps* de isolamento criam capacitâncias próprias ao transformador e devem ser verificadas regularmente, ou seja, necessita-se medir as capacitâncias existentes entre: o enrolamento externo e interno, externo e tanque, e finalmente, interno e núcleo. Em um transformador de três ou mais enrolamentos são necessários mais testes para medir todas as capacitâncias existentes.

Descargas elétricas atmosféricas, surtos de manobras ou ocorrência de faltas no sistema, podem causar alterações nos valores medidos das capacitâncias. Isto pode indicar deformação da bobina, problemas estruturais tais como o deslocamento da bobina e de seu suporte, além de alteração no dielétrico do isolante [30]. A sensibilidade da técnica depende do tipo de falta envolvida, sendo que podem existir dificuldades na interpretação dos valores medidos, caso os resultados de referência não sejam disponibilizados.

A técnica é efetiva particularmente em casos que é possível separar as medições por fase. Assim, comparações das capacitâncias entre primário e secundário de cada fase auxiliam bastante na possibilidade de encontrar alguma anormalidade [2].

Tais fatos foram devidamente comprovados pelos estudos apresentados no item 5.5 (F), pois, conforme indicado na ocasião, as deformações analisadas provocam alterações tanto na capacitância existente entre enrolamentos, quanto entre bobina interna e coluna. Para a determinação direta de tais parâmetros, as medições apresentadas no item 3.2.4 se demonstraram eficientes e relativamente simples, pois necessitam de um equipamento básico de medição de capacitância e algumas conexões entre enrolamentos e tanque para serem realizadas, além de formulações analíticas de baixa complexidade, e o único detalhe a ser seguido é

a desconexão do transformador do sistema para se evitar a contribuição das capacitâncias existentes no mesmo.

Além da medição direta das capacitâncias existem ainda dois testes [48] que podem ser realizados, que avaliam a qualidade da suportabilidade dielétrica do papel e da isolação óleo-papel. Os testes são conhecidos como: fator de dissipação dielétrica (FD - tangente δ), e/ou fator de potência ($\cos\phi$). A qualidade medida pode ser comprometida quando alguma deformação incide sobre o enrolamento, bem como a degradação do óleo, a quantidade da água e a contaminação com carbono e outras partículas. Ou seja, as capacitâncias podem ser modificadas por outros indicadores que não as deformações nos enrolamentos.

As técnicas de medição para fator de potência e fator de dissipação, são tipicamente referidas como medição de “capacitância e fator de potência” (C&FP) na América do Norte e como “capacitância e fator de dissipação” (C&FD) na Europa [49].

O teste C&FP, tem sido bastante aplicado, já que fornece a informação da constante dielétrica dos materiais isolantes, bem como as perdas dielétricas, que são propriedades intrínsecas do material e que influenciam no valor da capacitância.

Tais medições necessitam de equipamentos simples, tais como, wattímetros, voltímetros e amperímetros.

6.3.2 – MEDIÇÃO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO

Esta técnica tem a vantagem de utilizar equipamentos relativamente simples para medição, como basicamente fonte e medidores de tensão, potência e corrente.

A corrente de magnetização (corrente em vazio) é aquela que flui no enrolamento conectado a uma fonte de tensão, a qual é usada para excitar o transformador quando o outro enrolamento, da mesma fase, é deixado em aberto. Geralmente, esta corrente é expressa em percentagem da corrente nominal do enrolamento pela qual ela é medida [31].

As perdas em vazio registram as perdas no núcleo do transformador, a qual é função da magnitude, frequência e forma de onda da tensão de alimentação. Estas perdas variam com o tipo e a espessura da chapa de material ferromagnético, utilizado na construção do núcleo, bem como sua configuração e entreferros de junção, além da temperatura [31].

Tanto a corrente de excitação quanto as perdas em vazio devem ser medidas nos enrolamentos conectados à fonte, que deve ter tensão e frequência iguais à nominal do transformador. Além disto, o mesmo deve estar aproximadamente à temperatura ambiente.

Embora as medições de corrente de magnetização sejam tipicamente a forma mais fácil de detectar espiras curto-circuitadas, que pode ocorrer devido ao movimento do enrolamento, a técnica é de sensibilidade limitada para outros tipos de falhas mecânicas [2].

Conforme visualizado nos estudos apresentados no item 5.5 (A), as correntes de magnetização não sofreram alterações devido às deformações impostas ao enrolamento interno da Fase B. Este é um indicio de que esta medição, conforme mencionado por [2], não é muito eficiente em se tratando de pequenas deformações as que podem acometer os enrolamentos do transformador.

6.3.3 – MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO

As medições de impedância de curto-circuito são provavelmente uma das técnicas mais aceitas para detectar movimento do enrolamento, e são prescritas

em normas para testes de curto-circuito [2]. A técnica em princípio é simples e requer equipamentos relativamente padronizados.

Conforme já explanado em capítulos anteriores, quando um sistema de potência sofre uma condição de curto-circuito, a corrente gerada no evento é normalmente elevada. Nesta condição, esta corrente flui através dos enrolamentos dos transformadores gerando forças mecânicas extremamente altas, conforme comprovado nos Capítulos 4 e 5.

A corrente de curto-circuito é a maior fonte de deslocamentos mecânicos e, conseqüentemente, de falhas em transformadores. As deformações sofridas pelos enrolamentos devido às forças que atuam neles podem afetar a trajetória do fluxo de dispersão, que por sua vez pode resultar na mudança do valor da reatância de dispersão medida [33].

Em campo, as impedâncias podem ser medidas usando fontes monofásicas ou trifásicas de baixa tensão. Caso sejam realizadas medições monofásicas, então a separação dos dados por fase pode ser feita na tentativa de facilitar a detecção de faltas através de comparações fase por fase. Durante a interpretação desses resultados deve-se ter em mente que uma medição monofásica pode não fornecer o mesmo resultado de uma medição trifásica, dependendo das configurações do enrolamento e núcleo [2].

A técnica tem a desvantagem de que pequenas mudanças (da ordem de 1%) devem ser detectadas. A fim de obter bons resultados é necessário realizar a medição com correntes suficientemente altas, em que a impedância de magnetização possa ser desprezada; além disso, deve-se assegurar que os cabos responsáveis pelo curto-circuito sejam de baixa impedância, principalmente na realização de testes com transformadores de elevada relação de espiras [2].

Não obstante, a principal dificuldade em fazer uso desta técnica não está relacionada à repetibilidade das medições, mas sim na variação natural do parâmetro medido. Impedâncias de curto-circuito medidas por fase geralmente diferem bastante entre fases, mesmo para novos transformadores, ou unidades de

projeto semelhante. A conformidade com os valores de placa também é variável. Desta forma, conclui-se que sem resultados de referência do transformador em questão torna-se bastante difícil de obter uma interpretação confiável [2].

Apesar das dificuldades, a medição da impedância de curto-circuito é ainda a técnica de diagnóstico preferida em testes de curtos-circuitos por causa da necessidade de uma resposta conclusiva para indicar se o transformador tem ou não sido aprovado no teste [2].

Tomando-se a Tabela 6.1 para diferenciar as categorias dos transformadores, a norma IEEE Std. C57.12.90 [31] determina as variações permitidas da impedância de curto-circuito depois da aplicação de testes de curtos-circuitos (descrição do teste pelas normas IEEE Std. C57.12.90 e IEEE Std. C57.12.00).

Tabela 6.1: Categorias para transformadores de potência, distribuição e regulação imersos em líquido.

Categoria	Monofásico (kVA)	Trifásico (kVA)
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1667	501 a 5000
III	1668 a 10000	5001 a 30000
IV	Acima de 10000	Acima de 30000

Baseado, nesta categoria, seguem as variações permitidas da impedância de curto-circuito:

- *Categoria I:* A variação permitida deve ser em função da impedância Z_T do transformador, conforme Tabela 6.2:

Tabela 6.2: Variação da impedância de curto-circuito permitida para Categoria I.

Z_T [pu]	Variação em porcentagem
$\leq 0,0299$	$22,5 - (500) \times (Z_T)$
$\geq 0,0300$	7,5

- *Categoria II e III:* 7,5% de variação para enrolamentos concêntricos não circulares e 2% para enrolamentos concêntricos circulares;

- *Categoria IV*: 2% de variação.

Com a medida das impedâncias no teste apresentado, pode-se obter informações sobre deslocamentos dos enrolamentos, alterações das distâncias entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e núcleo magnético [33].

Alterações observadas na reatância de dispersão servem para a indicação de movimento das bobinas e problemas estruturais (cunha deslocada, empeno, etc.). Este teste não substitui testes de corrente de excitação ou testes de capacitância, porém os complementam nas informações de diagnóstico e são frequentemente utilizados em conjunto [33].

De acordo com os estudos realizados no item 5.5 (C), a impedância percentual possui certa variação com a aplicação de deformações no enrolamento. Pela informação contida na Tabela 6.1, o transformador sob estudo pertence à *Categoria I*, na qual a variação permitida (Tabela 6.2) para a referida impedância pode ser de até 7,5%. As deformações impostas no enrolamento interno da fase central tiveram variações entre 0,12% e 0,29%, dependendo do *software*, ou seja, são modificações que pelo critério adotado nesta metodologia de medição ainda estariam longe de alcançar o valor permitido. Entretanto, vale ressaltar que são alterações importantes e que não podem ser desprezadas.

6.3.4 – MÉTODO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DAS PERDAS ADICIONAIS (FRSL)

O método usado para o diagnóstico de deslocamento de enrolamento baseado na resposta em frequência de perdas adicionais (FRSL – *Frequency Response Stray Losses*) foi utilizado nos últimos 20 anos, para diagnóstico de deslocamento no enrolamento em aproximadamente 40 transformadores de potência. Além disso, ultimamente este método tem sido parte do procedimento

ISO, usado para testes de suportabilidade de curto-circuito, em laboratórios de alta tensão.

O método avalia a condição dos enrolamentos do transformador ou para propostas de comissionamento, após ter sido exposto a um teste de suportabilidade de curto-circuito ou como parte do monitoramento de envelhecimento do equipamento [33].

Ao contrário do método de medição de impedância convencional, o FRSL é aplicado em uma faixa de frequências de 20 a 600 Hz, incluindo a frequência industrial. Esta faixa de frequência é dada somente como uma referência, podendo ser ajustada de acordo com as capacidades da fonte e/ou wattímetro usado.

O diagnóstico para avaliar deformações nos enrolamentos, através de medição de reatância de dispersão ou pelo método FRSL, baseiam-se no caminho do fluxo de dispersão através dos enrolamentos; porém, o método FRSL tem a vantagem de ter sensibilidade à variação das perdas por correntes induzidas nos enrolamentos [33].

Segundo a estrutura da disposição dos enrolamentos sem a transposição da fiação, ocorrerão perdas devido a essas correntes induzidas. Para minimizá-las, os fios são transpostos de forma a compensar tais correntes. Se esses condutores forem danificados ou sofrerem um curto-circuito, ocorrerá um aumento nas perdas do enrolamento [33].

O método FRSL é capaz de detectar o envelhecimento da isolação do papel, a qual pode causar curto-circuito entre espiras e conseqüentemente aumentar as perdas por correntes induzidas. Este tipo de falta não pode ser identificado pela simples medição da impedância de curto-circuito, já que o canal de dispersão permanece virtualmente inalterado.

Testes envolvendo um deslocamento controlado dos enrolamentos apontaram que o método FRSL é mais sensível do que a medição da variação da impedância de curto-circuito. Nenhum desses dois métodos, entretanto, é capaz

de detectar um deslocamento axial tão pequeno. O limiar de detecção requer que o deslocamento seja da mesma magnitude que o espaço entre os enrolamentos [33].

O método FRSL utiliza medidas com a variação de frequência, baseado no fato de que a resistência do enrolamento pode ser dividida em duas parcelas: uma conhecida como a resistência dc (R_{dc}) e a outra (R_{ac}) que é dependente da frequência [33]. A Figura 6.1 apresenta um modelo de gráfico da variação dessa última resistência com a frequência [33].

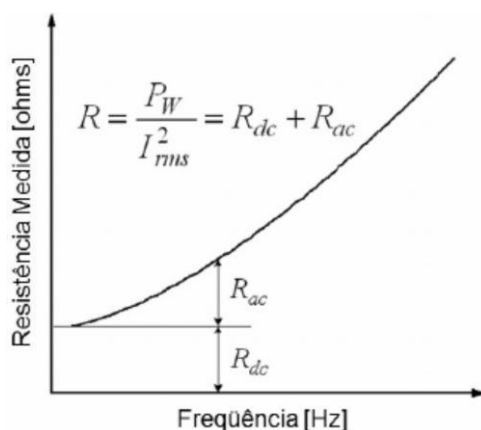


Figura 6.1: Gráfico do resultado da medida de resistência variando a frequência.

O diagnóstico do FRSL não é baseado no valor absoluto da resistência em função da frequência, mas sim através da comparação de curvas. Esta pode ser estabelecida com um transformador similar ou com um teste previamente realizado na mesma unidade a ser avaliada. No caso de transformadores trifásicos, os resultados podem ser interpretados em uma comparação entre fases. Existe, geralmente, uma leve diferença entre a coluna do meio e a das extremidades, ou até mesmo entre estas últimas. Estas diferenças nas perdas adicionais podem ser atribuídas ao efeito da proximidade do tanque, o qual não é o mesmo em todas as fases [33].

A título de ilustração, optou-se por apresentar dois exemplos [33] de medições da referida metodologia. No primeiro, apresentado na Figura 6.2 (a), mostra-se, pela sobreposição das três fases, que os enrolamentos não possuem nenhuma deformação. Para o segundo exemplo, representado na Figura 6.2 (b),

fica evidenciando a descoberta de um problema no enrolamento da Fase C. Pode-se notar, para frequências maiores, o desvio na referida fase em relação às Fases A e B. Entretanto, se forem observados os valores em torno de 50 e 60 Hz não existe nenhuma indicação de defeito ou ocorrência de qualquer anormalidade [33].

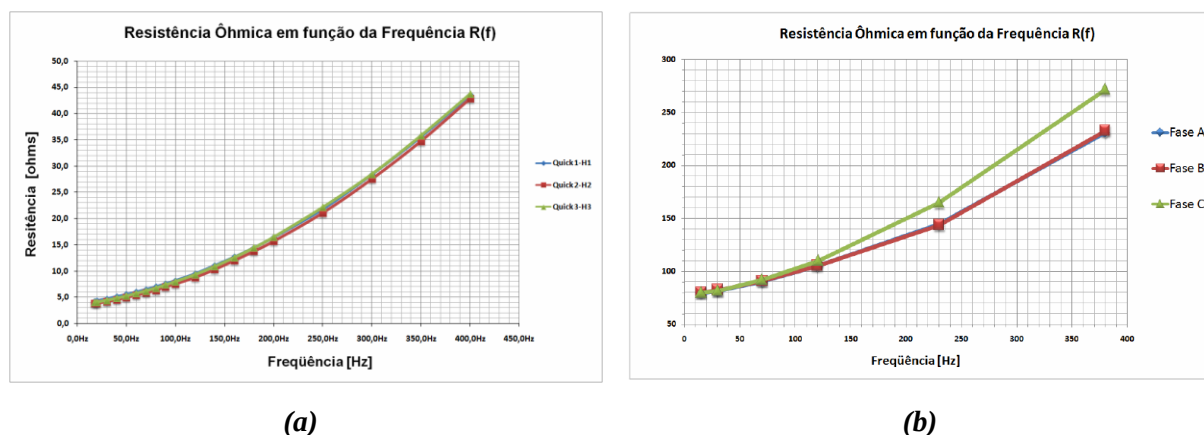


Figura 6.2: Resultados de medidas de resistência variando a frequência em transformadores.

Após inspeção visual foi detectado um curto-circuito entre espiras que ocorreu devido a um superaquecimento conforme apresentado na Figura 6.3.



Figura 6.3: Defeito na Fase C diagnosticado pelo método FRSL.

Diante dos exemplos apresentados e outros que podem ser encontrados em [33], verifica-se que o teste FRSL é uma ferramenta muito efetiva para avaliação da condição dos enrolamentos de um transformador. O método obviamente não é uma aplicação única, que substitui todas as outras metodologias. Contudo, quando usado em conjunto com outras medições, pode

conduzir a diagnósticos mais exatos da condição real dos enrolamentos do transformador [33].

6.3.5 – ANÁLISE POR IMPULSO EM BAIXA TENSÃO (LVI)

O teste de impulso em baixa tensão (LVI – *Low Voltage Impulse*) tem sido reconhecido como a metodologia mais sensível dentre as técnicas tradicionais [2].

A análise pelo método LVI é realizada não somente no domínio da frequência (espectro), mas também no domínio do tempo (oscilogramas). Para análises no domínio do tempo, geralmente verifica-se um fator de correlação e a diferença dos oscilogramas [34].

O teste consiste na aplicação de um impulso em baixa tensão no enrolamento. Assim, é registrado tanto o impulso de tensão aplicado, quanto a corrente ou tensão de saída no enrolamento sob teste. Nesta metodologia é possível realizar várias medições de corrente ou tensão simultaneamente. Os sinais são filtrados, amostrados e armazenados no domínio do tempo. Posteriormente, são transferidos para o domínio da frequência e, assim, é calculada uma função de transferência [50].

As modernas instalações para aplicação do teste LVI consistem de um computador, um gerador de impulso retangular (geralmente até 500 V, com duração de 1 μ s), uma unidade de controle (canais de medição, seleção de divisores de tensão, controle de entrada/saída) e um rápido digitalizador (12 bits com taxa de amostragem até 60 MHz), sendo estes dois últimos instalados em um computador.

Para ilustrar tal metodologia, optou-se por apresentar um exemplo de medição realizada em um transformador trifásico de 6,3 MVA [34], onde os testes de curto-circuito foram realizados fase por fase. As medições de impedância de curto-circuito e LVI foram realizadas antes e depois do teste.

Apesar da alteração das impedâncias nas Fases B e C não terem excedido 1%, como no caso tratado neste trabalho, os testes foram interrompidos de acordo com as medições LVI, conforme apresentado na Figura 6.4 (a), onde nota-se mudanças nos oscilogramas, indicando uma possível ocorrência de deformação mecânica nos enrolamentos. Analisando o transformador, foi verificado um estágio inicial de falha tipo *buckling* no enrolamento de baixa tensão, como pode ser visto pela Figura 6.4 (b).

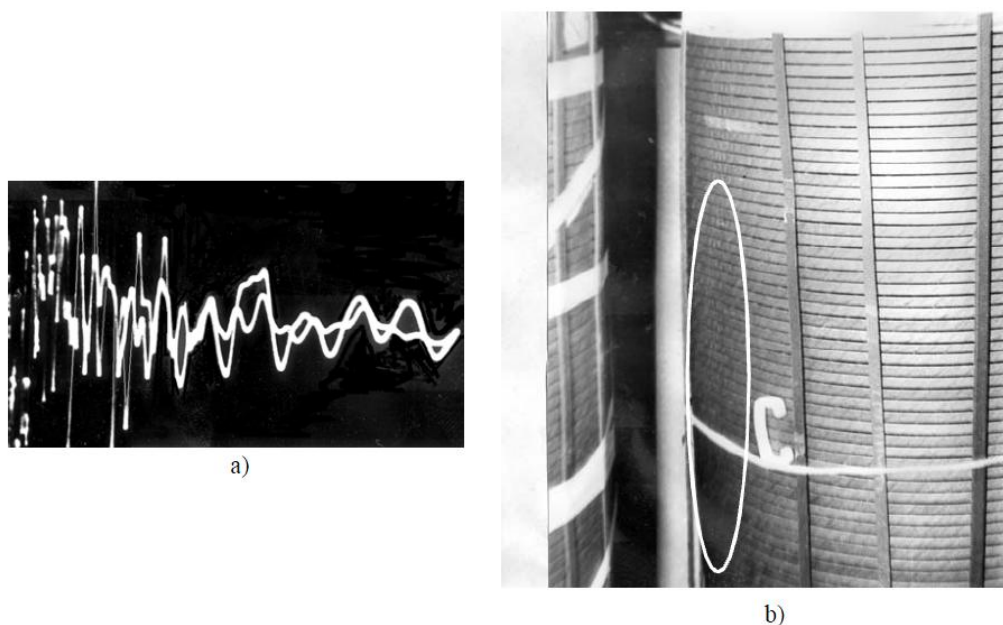


Figura 6.4: a) Mudança nos oscilogramas através de medição LVI após transformador ser submetido ao teste de curto-circuito; b) área de deformação diagnosticada.

A desvantagem do método LVI é a necessidade da repetibilidade. Uma das razões é a dificuldade de reproduzir um sinal de entrada padrão devido às complicadas e variadas características de impedância dos transformadores. Além disso, a disposição dos cabos de testes tem uma influência significativa nos resultados [2].

6.3.6 – ANÁLISE POR RESPOSTA EM FREQUÊNCIA (FRA)

Dentre os métodos explicados anteriormente, esta metodologia é a que mais vem sendo utilizada para avaliar a integridade dos enrolamentos de

transformadores. Por isso, a ela será dado um enfoque maior neste trabalho, além de se verificar alterações em simulações computacionais para o caso do transformador de 15 kVA aqui estudado.

O principal interesse das medições de resposta em frequência em transformadores é detectar deformações em seus enrolamentos e núcleo, resultante das forças eletromagnéticas ocasionadas por falhas no sistema em que o equipamento está conectado, falhas no comutador sob carga, falhas de sincronização, de transporte, descarga atmosférica ou falta dentro do transformador, que podem gerar altas correntes circulantes nas bobinas e/ou uma alta tensão sobre estas. Consequentemente, são provocados danos estruturais, deformações nas bobinas e/ou de isolamento do equipamento, fechando-se curto-circuito entre espiras, entre bobinas ou destas para a carcaça (ponto de terra) [36].

Além do diagnóstico de falhas depois de um evento, como curto-circuito, por exemplo, também há interesse crescente na detecção da integridade enrolamento, do grau de deformação, antes de um eventual defeito. Isto é realizado durante interrupções planejadas, ou seja, as avaliações das condições do transformador determinando a confiabilidade do mesmo seriam realizadas dentro de um programa de manutenção preventiva [36].

Outra importante aplicação para medições de análise de resposta em frequência é verificar a integridade mecânica de um transformador depois de transporte, uma vez que, este pode ter sido realizado fora dos padrões, podendo causar movimento do enrolamento e núcleo [36].

A) MÉTODO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Este método está baseado na suposição que qualquer deformação mecânica pode ser associada a uma mudança das impedâncias do circuito

equivalente e que essas mudanças podem ser detectadas por uma função de transferência [37].

Este método consiste em medir a função de transferência, também conhecida como resposta em frequência, e a impedância terminal dos enrolamentos. Essas medidas podem ser usadas como um método de diagnóstico para detecção de defeitos elétricos e mecânicos do transformador para uma larga escala de frequências. Para tal, é realizada a comparação da função de transferência obtida com as assinaturas de referência. Diferenças podem indicar dano ao transformador, o qual pode ser investigado usando outras técnicas ou um exame interno [37].

O circuito equivalente de um transformador é complexo e composto de resistências, indutâncias e capacitâncias provenientes dos enrolamentos, assim como capacitâncias parasitas entre espiras, entre bobinas e destas para o tanque. Este circuito possui características únicas de resposta em frequência para cada transformador, funcionando como se fosse uma impressão digital. Qualquer tipo de dano na sua estrutura interna, tanto na parte ativa (enrolamentos e núcleo) como na parte passiva (estrutura, suportes, tanque etc.), afeta diretamente os parâmetros deste circuito equivalente, alterando sensivelmente a resposta em frequência deste circuito, a qual, comparada à sua resposta original, pode claramente evidenciar a falha. A Figura 6.5 exibe uma representação da estrutura dos enrolamentos dentro do transformador. A reunião da parte ativa (enrolamentos) e as partes aterradas (núcleo e tanque do transformador) formam uma complexa rede RLC [37].

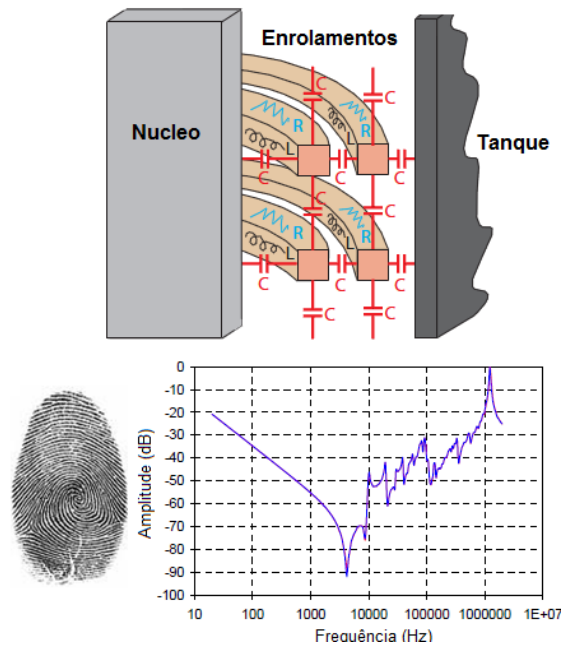


Figura 6.5: Representação simplificada do circuito RLC interno ao transformado, o qual fornece uma impressão digital para comparações futuras.

Em essência, o método consiste na aplicação de um sinal senoidal de baixa tensão, por exemplo, 1V, variando a frequência deste sinal de 10 Hz a 20 MHz. Em outro terminal, são medidos amplitude e ângulo do sinal da resposta correspondente ao sinal aplicado.

O circuito equivalente do arranjo é apresentado pela Figura 6.6, em que V_{fonte} é o sinal injetado, V_{entrada} e $V_{\text{saída}}$ são as medidas da tensão de referência e de teste, Z_{in} é a impedância interna do gerador de sinais ou do medidor e $Z(j\omega)$ é a impedância do enrolamento. Uma impedância Z_{in} é definida como 50 Ω e incorporada em $H(j\omega)$ [37].

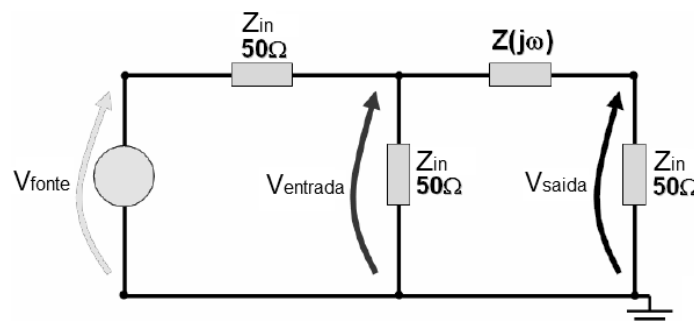


Figura 6.6: Circuito equivalente básico para teste.

As Equações 6.1 e 6.2 mostram a relação entre $Z(j\omega)$ e $H(j\omega)$.

$$H(j\omega) = \frac{Vsaida(j\omega)}{Ventrada(j\omega)} = \frac{50}{Z(j\omega) + 50} \quad (6.1)$$

$$Z(j\omega) = \frac{50}{H(j\omega)} - 50 \quad (6.2)$$

A medida da amplitude da relação de tensões ou da função transferência de tensão é dada pela Equação 6.3 ou 6.4:

$$A(dB) = 20 \cdot \log(H(j\omega)) \quad (6.3)$$

$$A(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{Vsaida}{Ventrada}\right) \quad (6.4)$$

E a relação das fases pela Expressão 6.5 ou 6.6:

$$A(\theta) = \tan^{-1}(H(j\omega)) \quad (6.5)$$

$$A(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{Vsaida}{Ventrada}\right) \quad (6.6)$$

A próxima seção descreve as principais configurações existentes para execução dos testes baseados no FRA.

B) TIPOS DE TESTE DO FRA

A descrição dos tipos de testes para execução do FRA será baseado em um transformador trifásico (estrela – delta), ressaltando-se que os mesmos princípios podem ser aplicados em outras configurações. Para cada teste, as medições são fornecidas usando uma impedância de entrada de 50 Ω [36], conforme descrito anteriormente.

B.1) TESTE “END-TO-END OPEN”

Neste tipo de teste o sinal é aplicado sucessivamente na extremidade do enrolamento, enquanto que, o sinal transmitido é medido no outro terminal. Com este tipo de configuração, a impedância de magnetização do transformador é o parâmetro principal, a qual caracteriza a resposta em baixa frequência (abaixo da primeira ressonância). Este teste é o mais utilizado devido à sua simplicidade e a possibilidade de examinar cada enrolamento de forma separada. As Figuras 6.7 e 6.8 apresentam respectivamente a configuração do teste “end-to-end open” e exemplos de medições [36].

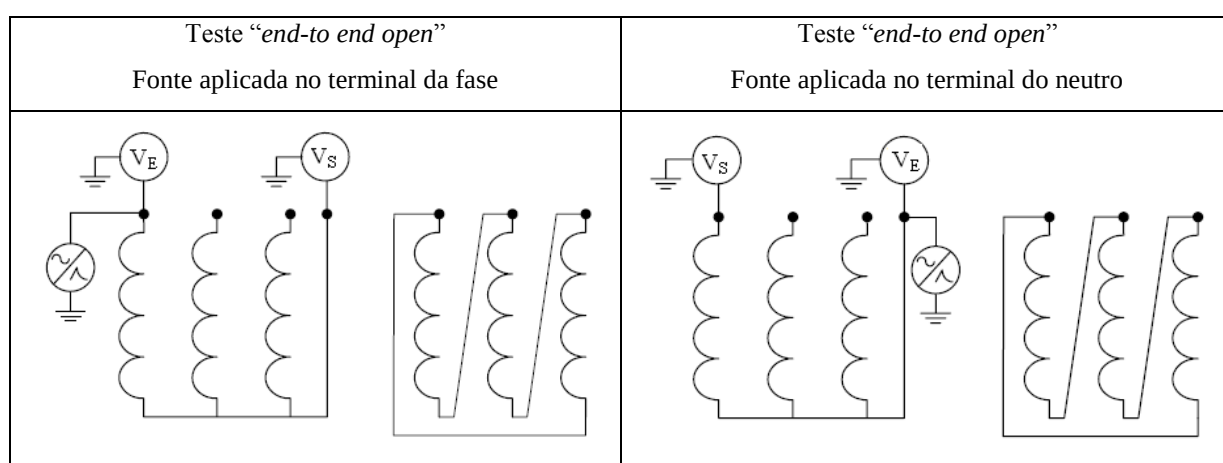


Figura 6.7: Configuração do teste “end-to-end open” para um transformador estrela-delta.

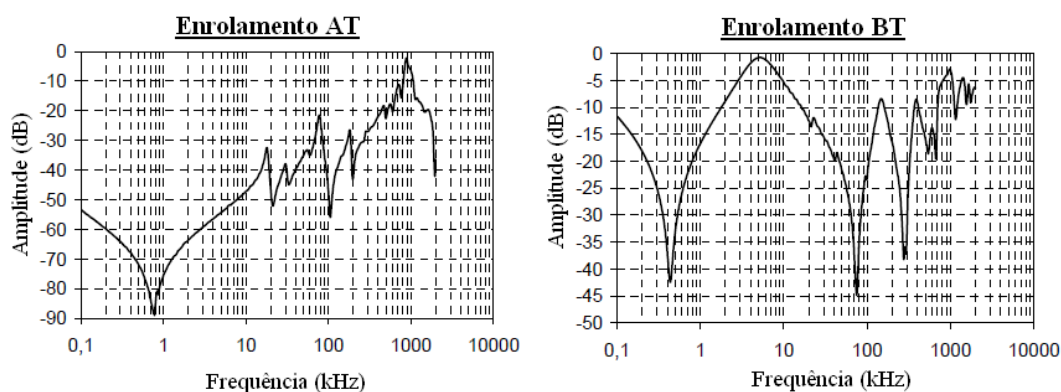


Figura 6.8: Exemplos de medições do teste “end-to-end open”
(Transformador 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).

B.2) TESTE “END-TO-END SHORT-CIRCUIT”

Este teste é similar ao anterior, com o outro enrolamento da mesma fase curto-circuitado. As medições nesta configuração permitem que a influência do núcleo seja removida abaixo da faixa de frequência em torno de 10 Hz a 20 kHz, já que a resposta em baixa frequência neste caso é caracterizada pela indutância de dispersão ao invés da indutância de magnetização. A resposta em altas frequências é similar àquela obtida pelo método anterior. As Figuras 6.9 e 6.10 apresentam, respectivamente, a configuração do teste “*end-to-end short-circuit*” e uma comparação de medição entre esta configuração e a apresentada anteriormente [36].

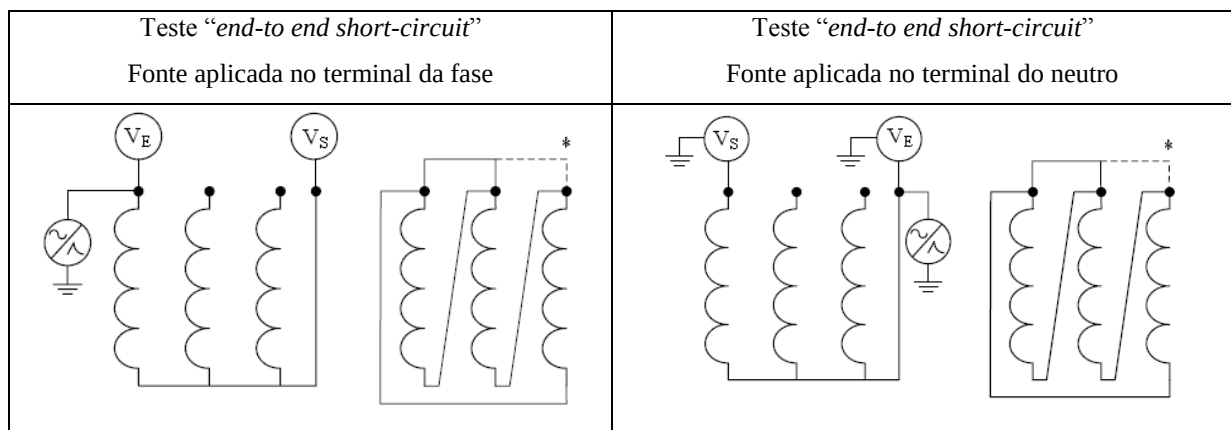


Figura 6.9: Configuração do teste “*end-to-end short-circuit*” para um transformador estrela -delta.

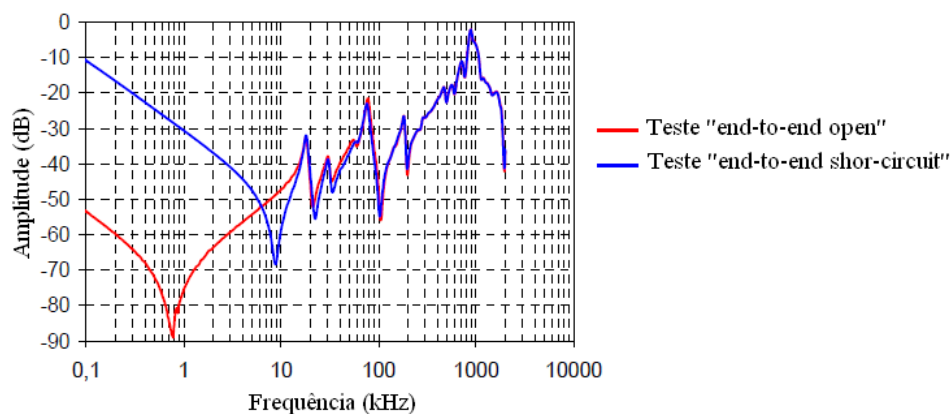


Figura 6.10: Comparação do teste “*end-to-end open*” e “*end-to-end short-circuit*” no enrolamento AT do transformador 266 MVA, 420/ $\sqrt{3}$, 21, 21 kV.

O enrolamento curto-circuitado pode ser aterrado ou não. Para transformadores trifásicos, existem duas variações (curto-circuito bifásico ou

trifásico). Além disso, este tipo de teste pode ser realizado com a fonte aplicada no terminal da fase ou neutro. O teste “*end-to-end short-circuit*” é realizado quando há interesse em obter alguma informação associada à impedância de dispersão em baixa frequência.

B.3) TESTE “CAPACITIVE INTER-WINDING”

Neste tipo de teste, o sinal é aplicado na extremidade de um enrolamento e a resposta é medida no terminal do outro enrolamento da mesma fase (enrolamentos desconectados entre si). Por definição, este teste não é possível de ser aplicado em autotransformadores, nos quais há enrolamentos com terminais em comum. A resposta obtida por esta configuração é dominada em baixa frequência pela capacitância entre enrolamentos, por isso o nome em inglês “*capacitive inter-winding*”. As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam, respectivamente, a configuração do teste “*capacitive inter-winding*” e exemplo de medição [36].

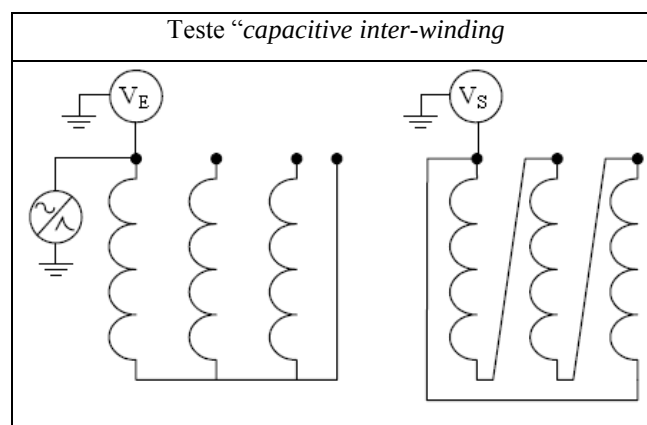


Figura 6.11: Configuração do teste “*capacitive inter-winding*” para um transformador estrela-delta.

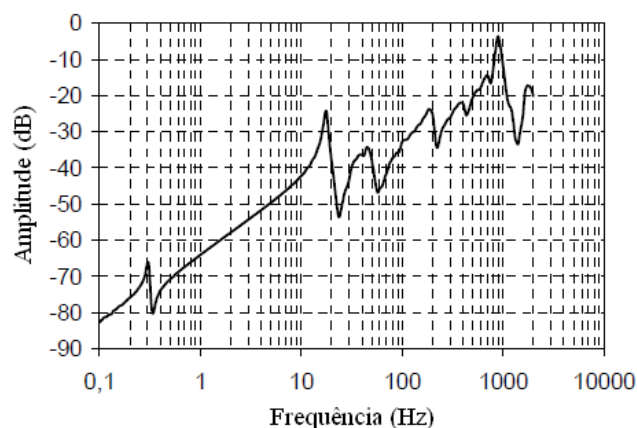


Figura 6.12: Exemplo de medição do teste “capacitive inter-winding” aplicado entre os enrolamentos AT e BT (Transformador 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).

B.5) TESTE “INDUCTIVE INTER-WINDING”

O sinal é aplicado no terminal do lado AT e a resposta é medida no terminal correspondente do lado BT, com as outras extremidades de ambos os enrolamentos sendo aterradas. A faixa de baixa frequência nesta configuração é determinada pela relação de espiras do enrolamento. As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam, respectivamente, a configuração do teste “*inductive inter-winding*” e exemplo de medição [36].

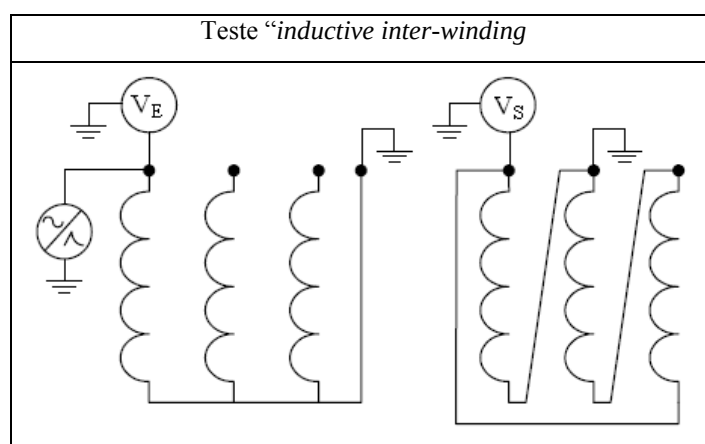


Figura 6.13: Configuração do teste “*inductive inter-winding*” para um transformador estrela-delta.

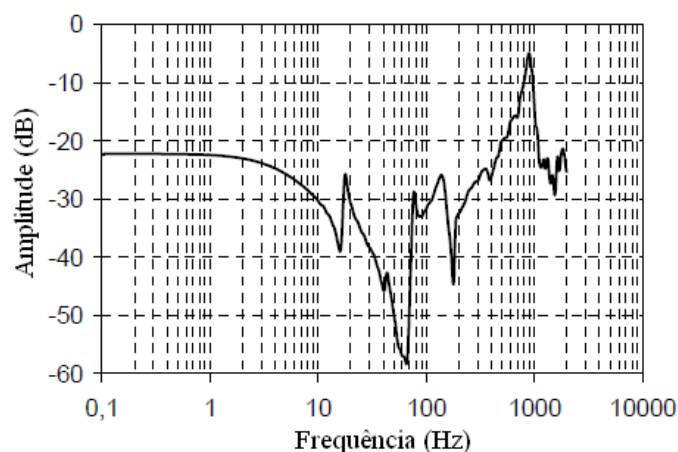


Figura 6.14: Exemplo de medição do teste “inductive inter-winding” aplicado entre os enrolamentos AT e BT (Transformador 266 MVA, $420/\sqrt{3}$, 21, 21 kV).

Embora a prática da medição por FRA venha sendo aplicada em grande escala, ainda não existe uma padronização em comum a ser seguida, havendo apenas algumas recomendações sugeridas pelo grupo de trabalho A2.26 do Cigré para padronização de práticas utilizando o FRA [36, 38].

C) INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO FRA

A Figura 6.15 [41] mostra uma faixa de frequências para a interpretação do FRA, considerando algumas limitações das instalações de teste e incertezas das condições do fluxo residual. A classificação é baseada na tensão nominal, já que este fator correlaciona bem com o tamanho das buchas e consequentemente ao comprimento dos cabos utilizados para medição. De uma forma geral, para interpretação do FRA, recomenda-se manter um “gap” entre a região de interpretação e a região possível de ser afetada pelas condições de teste.

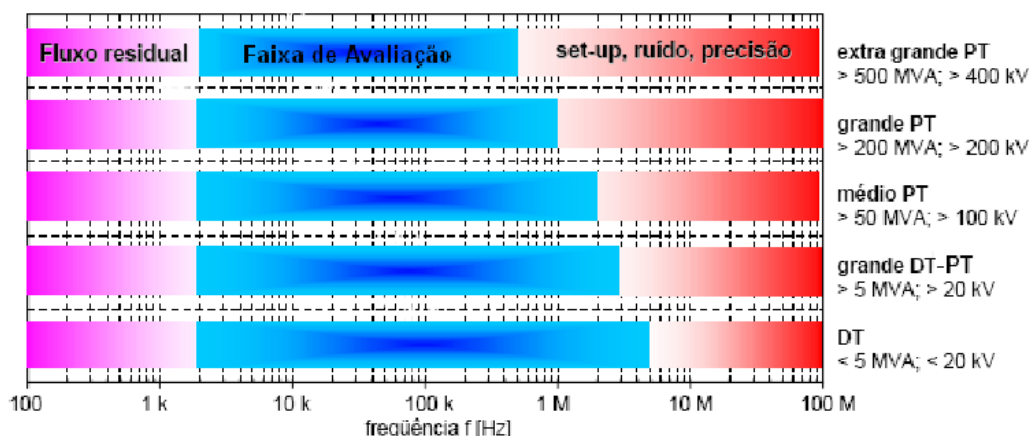


Figura 6.15: Faixa típica de frequência para interpretação do FRA.

De acordo com experiências práticas, tem-se feito uma associação das faixas de frequências com os possíveis danos no transformador:

- Baixa frequência (até 2 kHz): Indica condição do núcleo;
- Média e alta frequência (entre 2 kHz e 1 MHz): Indica movimento dos enrolamentos entre eles e distorção da geometria, ou seja, possíveis deformações;
- Acima de 1 MHz: a análise nesta faixa está relacionada às alterações das conexões, buchas, conexões entre enrolamentos, comutadores e outros.

Para avaliar os resultados do FRA, a informação obtida recentemente deve ser comparada com dados de referência ou por inspeção visual direta das curvas ou usando informação do FRA processada.

Existem três formas para gerar os dados de referência:

- Medições prévias da mesma unidade;
- Medições em unidades com projetos idênticos;
- Medições em fases separadas.

D) EXEMPLOS DE MEDIÇÕES E INTERPRETAÇÃO DO FRA

Para ilustrar a medição e interpretação do FRA, apresenta-se neste item um exemplo no qual o enrolamento da baixa tensão de um determinado

transformador possui uma deformação tipo “*buckling*”. Este exemplo foi escolhido dentre muitos existentes em referências bibliográficas [36, 43] por se tratar do mesmo efeito estudado nesta tese.

A Figura 6.16 ilustra as respostas em frequência do enrolamento BT de dois transformadores idênticos monofásicos (provenientes de um banco de unidades monofásicas). O efeito “*buckling*”, conforme mostrado na Figura 6.17 da Fase B, é claramente detectado por comparação da medição de FRA entre esta fase e a Fase C [36].

Nota-se que a fase que possui o defeito tem sua curva representativa se deslocando para a esquerda em relação aquela sem deformação. Ou seja, as frequências de ressonância se tornam menores e as magnitudes ora maiores ora menores.

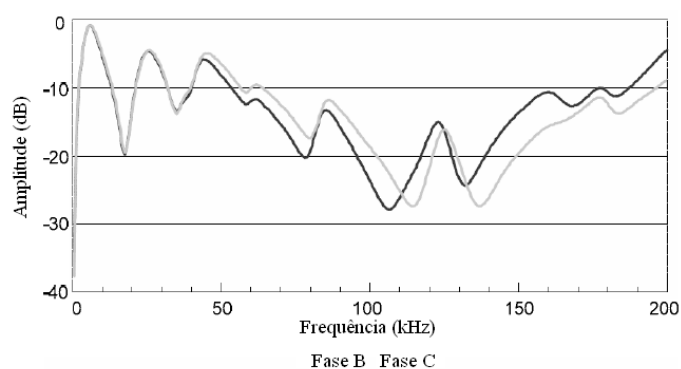


Figura 6.16: Respostas FRA mostrando uma falha de “hoop buckling” do enrolamento interno BT da Fase B.



Figura 6.17: Efeito “buckling” diagnosticado no enrolamento interno BT.

E) MODELAGEM DO TRANSFORMADOR PARA ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA NO ATP

Pelo fato do FRA ser uma das metodologias mais utilizadas no presente momento para o diagnóstico de falhas nos enrolamentos dos transformadores, optou-se por apresentar nesta tese estudos computacionais para a verificação desta metodologia no transformador de 15 kVA, após as deformações impostas no mesmo.

Para esta análise, será necessário criar um outro modelo do transformador, diferente dos apresentados no Capítulo 2. Este fato ocorre pois, para estudos no domínio da frequência e em uma ampla faixa da mesma, alguns parâmetros anteriormente não utilizados se tornam extremamente necessários, como por exemplo, as capacitâncias intrínsecas e suas perdas.

É importante mencionar que esta tese não tem a pretensão de desenvolver nenhum modelo para os referidos estudos, e, devido à ampla referência bibliográfica existente, que tratam exclusivamente deste assunto [39-44], optou-se por empregar um dos modelos mais simples [45] para tal análise, uma vez que este não é o foco principal deste trabalho.

Na referência [45] são tratados os aspectos construtivos do núcleo e enrolamentos, bem como sua interação com a estrutura do transformador. Além disso, é proposto um modelo matemático baseado na geometria interna do mesmo, para aplicação em testes de impulso de tensão e análise de resposta em frequência. Esta referência, bem como as citadas [39-41], utilizam-se de equacionamentos para a determinação de cada um dos parâmetros necessários, tais como os valores de capacitâncias e indutâncias presentes no modelo. Nesta tese será utilizado o *software* FLUX3D para a obtenção destas variáveis.

A Figura 6.18 representa o circuito equivalente para o transformador contendo: as indutâncias (L_{AT} , L_{BT}) e resistências (R_{AT} , R_{BT}) próprias dos enrolamentos, as capacitâncias (C_{AT_TQ} , C_{AT_BT} , C_{BT_N}) e condutâncias

(GAT_TQ, GAT_BT, GBT_N) geométricas, capacitâncias (CS_AT, CS_BT) e condutâncias (GS_AT, GS_BT) série [41]. Este modelo será utilizado neste trabalho para os estudos referentes a análise da resposta em frequência. Este se diferencia do utilizado em [41], pela não consideração das indutâncias e capacitâncias mútuas [39].

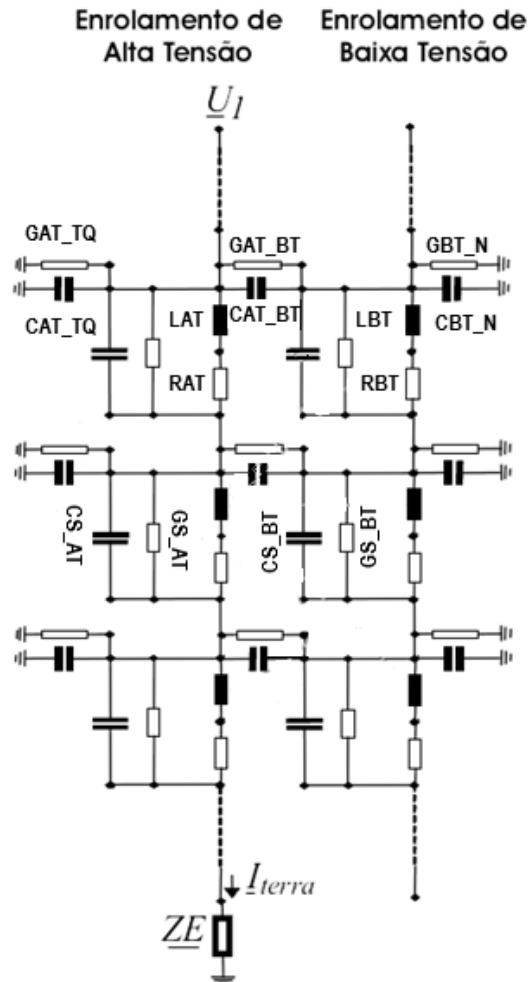


Figura 6.18: Modelo de enrolamento para análise de resposta em frequência com parâmetros distribuídos.

A modelagem do enrolamento com o modelo detalhado, ou seja, uma rede RLCCG com parâmetros distribuídos, permite o cálculo de correntes e tensões utilizando ferramentas comuns de análise e de redes, por exemplo, *Alternative Transient Program* (ATP), Pspice, etc. Em adição, é possível considerar não-linearidades como histerese e saturação, além de efeitos dependentes da

frequência, como correntes parasitas e perdas no dielétrico. Nesta modelagem o enrolamento é separado em unidades menores, as quais podem ser constituídas de um disco, dois discos ou várias espiras [41].

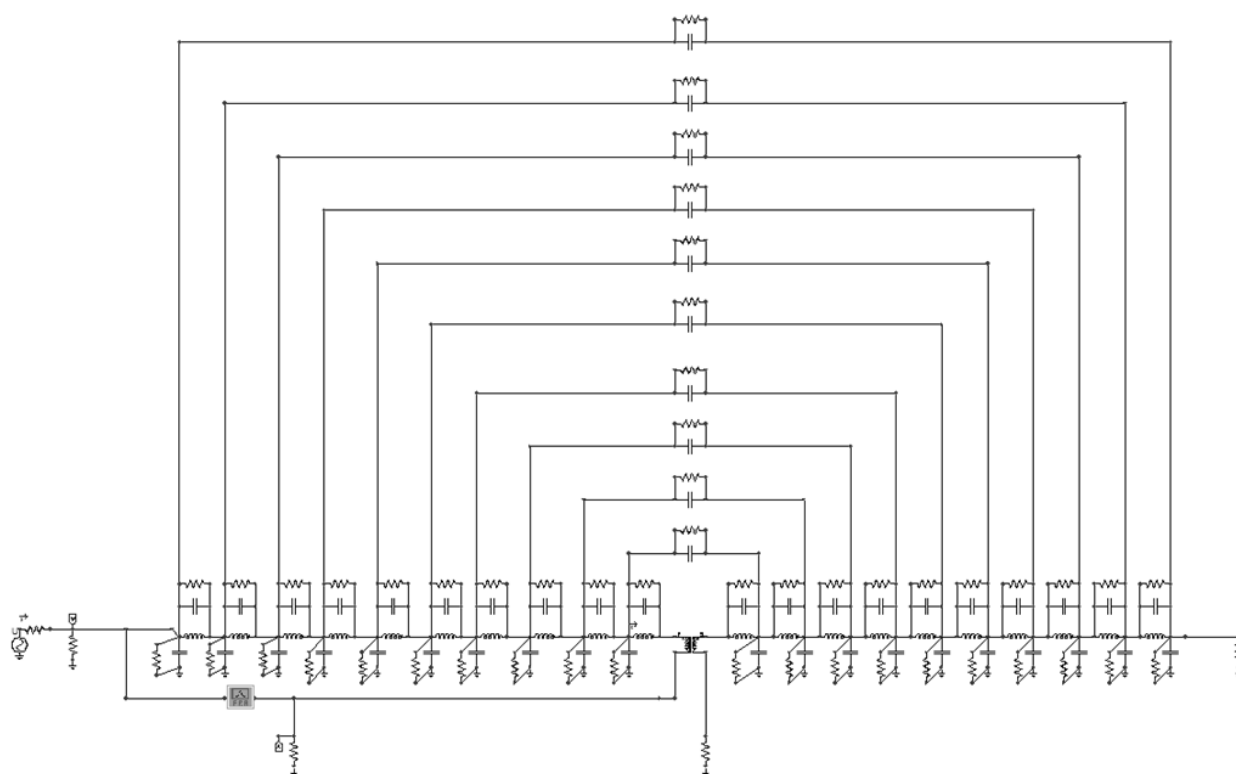
As capacitâncias geométricas representam principalmente os acoplamentos eletrostáticos dos enrolamentos entre si, e acoplamentos adjacentes entre enrolamentos e “terra” (tanque ou núcleo). Estas capacitâncias são supostas como distribuídas uniformemente ao longo do enrolamento de interesse. As capacitâncias série são encontradas no interior de cada enrolamento, entre espiras, discos, camadas e entre bobinas individuais [39]. As condutâncias série e geométricas representam as perdas no dielétrico entre espiras e entre enrolamento e a terra, respectivamente, sendo ambos os termos dependentes da frequência.

Definido o modelo, bem como os parâmetros a serem determinados com o enrolamento intacto e com as duas deformações impostas, é importante mencionar que as faltas são detectáveis com o FRA a partir do momento em que variam significativamente as capacitâncias e indutâncias que compõem o enrolamento de um transformador [41]. Pode-se associar as faltas no enrolamento, sejam de natureza elétrica ou mecânica, com a modificação dos parâmetros do mesmo. A Tabela 6.3 apresenta os principais parâmetros que são modificados devido a algumas faltas de natureza elétrica e mecânica [39, 41].

De posse de tais informações e retornando ao ATP na sua forma gráfica, ou seja, no ATPDraw, modelou-se os enrolamentos interno e externo, da Fase B do transformador conforme apresentado na Figura 6.19.

Tabela 6.3: Variação dos principais parâmetros do enrolamento em função da falta

FALTA	PRINCIPAL PARÂMETRO VARIANTE
Circulação de Corrente em Malha Fechada	Indutância
Aterramento Múltiplo	Indutância
Espiras em Curto Circuito	Indutância
Curto Circuito entre Enrolamento e Tanque	Indutância
Curto Circuito entre Enrolamentos	Indutância
Afundamento Local	Indutância
Movimentação de Discos	Capacitância Shunt ou Geométrica
Encurvamento	Capacitância Shunt ou Geométrica
Ingresso de Umidade	Capacitância Shunt ou Geométrica
Espiras Frouxas	Capacitância Série
Envelhecimento da Isolação Sólida	Capacitância Série

**Figura 6.19: Representação da Fase B no ATPDraw para estudos do FRA.**

Nota-se nesta figura que tanto o enrolamento interno, quando o externo, foram representados por 10 células cada um, as quais incluem a capacitância e condutância que representam o dielétrico existente entre enrolamentos. O núcleo do transformador, por não ser foco deste trabalho foi representado por um transformador monofásico saturável, disponível no próprio *software*, com

características do tipo: tensão nominal e resistência própria em cada enrolamento, perda no núcleo, indutância de dispersão e curva de saturação.

A simulação aqui empregada é do tipo “*frequency scan*”, na qual o *software* faz uma varredura de frequência, que no caso em questão variou entre 10 Hz a 10 MHz. A fonte utilizada, conectada no terminal do enrolamento interno, foi de 5 V (rms), enquanto as impedâncias conectadas ao mesmo são de 50 Ω , conforme indicado no item anterior. Para verificar a amplitude da relação de tensões ou da função transferência de tensão foi implementado utilizando a rotina MODELS a Equação 6.4, representado no ATPDraw pelo ícone “FRA”. O enrolamento externo é aterrado.

Foram criados três arquivos de simulação, cada um deles representando uma condição do enrolamento interno da Fase B, ou seja, na primeira os valores utilizados para resistências, indutâncias, capacitâncias e condutâncias, retirados no FLUX3D, foram obtidas para o caso onde não há nenhuma deformação no enrolamento em questão; na segunda os parâmetros são aqueles retirados quando a primeira deformação é aplicada; e a terceira quando a segunda deformação é imposta.

A obtenção de cada um dos parâmetros supramencionados é relativamente simples, uma vez que o programa em questão possui uma vasta ferramenta empregada no pós-processamento. Desta forma, as resistências dos enrolamentos e perdas nos dielétricos são retiradas de forma direta, ao passo que as indutâncias e capacitâncias são obtidas através da energia armazenada, magnética e eletrostática, respectivamente, nos volumes desejados. O único cuidado a ser tomado é em relação aos parâmetros de permissividade, permeabilidade, resistividade e tangente delta ($\text{tg } \delta$) que são indicados na modelagem [42]. Vale ressaltar que esta última é importante para a determinação da perda, e consequentemente, da condutância nos dielétricos.

A Tabela 6.4 apresenta de forma resumida a variação de cada um dos parâmetros utilizados no modelo do transformador no ATP para a análise do

FRA. Pelo fato dos enrolamentos terem sido divididos em 10 células, alguns parâmetros devem ser divididos por 10 e outros multiplicados, conforme indicado na legenda da tabela.

Tabela 6.4: Variação dos parâmetros utilizados nas simulações do FRA.

Parâmetros	FLUX3D – SEM DEF.	FLUX3D - CASO 1	FLUX3D - CASO 2
<i>RAT</i> [Ω]	0,04048	0,04048	0,04048
<i>LAT</i> * [<i>mH</i>]	$2,31 \times 10^{-3}$	$2,31 \times 10^{-3}$	$2,31 \times 10^{-3}$
<i>RBT</i> [Ω]	0,02897	0,02908	0,02918
<i>LBT</i> * [<i>mH</i>]	$5,93 \times 10^{-3}$	$5,93 \times 10^{-3}$	$5,93 \times 10^{-3}$
<i>CBT_N</i> * [μF]	$32,1078 \times 10^{-6}$	$31,79 \times 10^{-6}$	$31,462 \times 10^{-6}$
<i>GBT_N</i> * [Ω]	$6,968 \times 10^9$	$6,998 \times 10^9$	$7,1098 \times 10^9$
<i>CBT_AT</i> * [μF]	$14,4908 \times 10^{-6}$	$14,8492 \times 10^{-6}$	$15,262 \times 10^{-6}$
<i>GBT_AT</i> * [Ω]	$1,618 \times 10^{10}$	$1,579 \times 10^{10}$	$1,537 \times 10^{10}$
<i>CAT_TQ</i> * [μF]	$9,4529 \times 10^{-6}$	$9,4815 \times 10^{-6}$	$9,4995 \times 10^{-6}$
<i>GAT_TQ</i> * [Ω]	$1,83 \times 10^{10}$	$1,831 \times 10^{10}$	$1,827 \times 10^{10}$
<i>CS_BT</i> ** [μF]	$4991,4 \times 10^{-6}$	$5079,97 \times 10^{-6}$	$5147,8 \times 10^{-6}$
<i>GV_BT</i> ** [Ω]	$1,796 \times 10^{10}$	$1,765 \times 10^{10}$	$1,74 \times 10^{10}$
<i>CS_AT</i> ** [μF]	$7275,8 \times 10^{-6}$	$7275,8 \times 10^{-6}$	$7275,8 \times 10^{-6}$
<i>GV_AT</i> ** [Ω]	$1,232 \times 10^{10}$	$1,232 \times 10^{10}$	$1,232 \times 10^{10}$
<i>LD_AT</i> [<i>mH</i>]	0,116984	0, 116222	0,115460
<i>LD_BT</i> [<i>mH</i>]	0,116984	0, 116222	0,115460

- * Dividido por 10
- ** Multiplicado por 10

Realizadas as simulações, foi possível obter as curvas representativas de cada uma das condições operacionais do transformador, conforme observado na Figura 6.20. Nota-se inicialmente que as três curvas já não se encontram sobrepostas. Deve-se salientar que pelo fato do núcleo não ter sido devidamente representado, por não ser o foco principal deste trabalho, nas frequências iniciais, ou seja, aquelas que vão de 10 Hz a 2 kHz, a análise de resposta em frequência possui amplitude igual a zero. Deste ponto em diante, as ressonâncias encontradas se devem ao enrolamento propriamente dito.

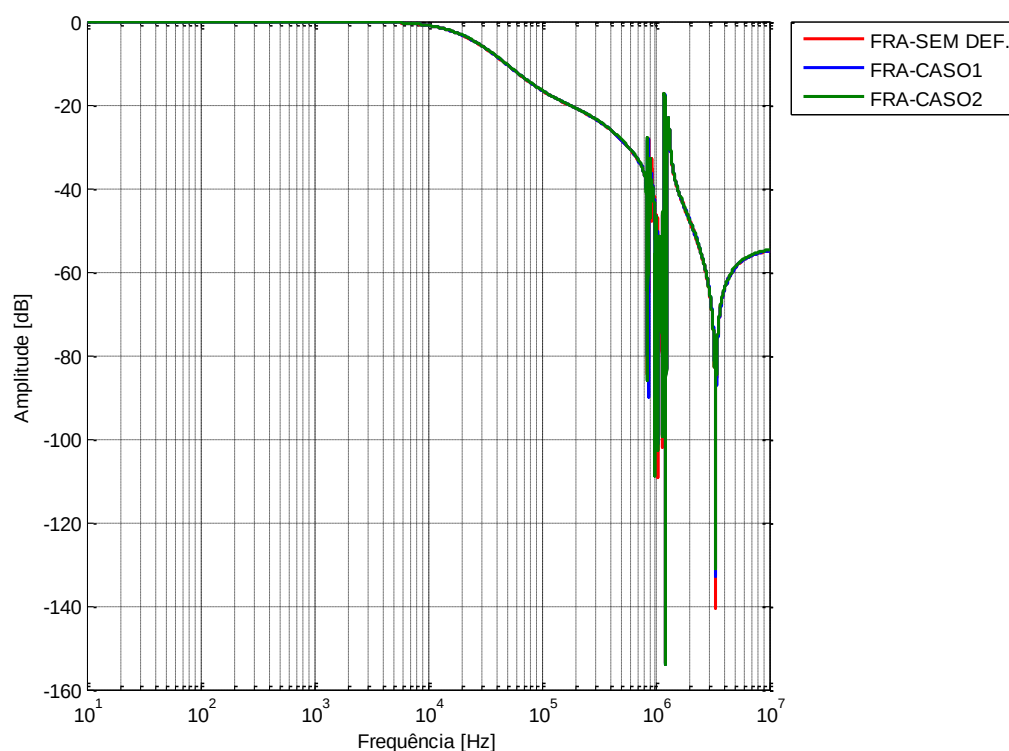


Figura 6.20: Resultados do FRA para os três casos de deformação no enrolamento

Para se verificar de forma mais clara o que ocorreu nos pontos ressonantes durante a análise do FRA, optou-se por ampliar cada um destes pontos, conforme apresentado nas Figuras subsequentes.

Na Figura 6.21 apresentam-se o primeiro e o segundo pontos onde pode-se notar que a cada deformação imposta ao enrolamento interno da Fase B há um deslocamento da curva obtida pelo FRA para a esquerda. Isto indica que a frequência onde antes ocorria a ressonância passa a ser uma frequência menor, o que foi observado também no exemplo apresentado ao final do item anterior, onde o enrolamento sob investigação também havia sofrido a mesma deformação aqui analisada. Para uma comparação realizada entre o caso sem deformação com o primeiro caso, esta variação na frequência foi de 0,57%, para a comparação entre enrolamento sem deformação com o segundo caso deformado esta variação chega a 1,15%. No segundo ponto de ressonância estas variações ficam próximas de 0,66% e 1,24%, respectivamente.

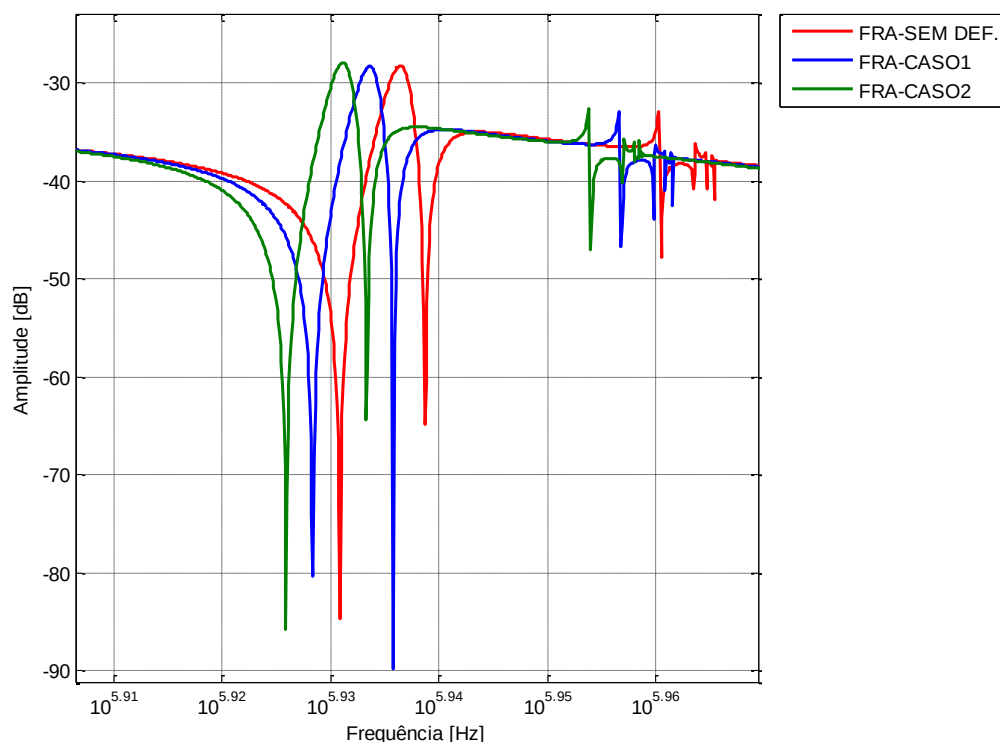


Figura 6.21: Resultados do FRA para os três casos de deformação no enrolamento – Primeiro e segundo picos de ressonância

A Figura 6.22 apresenta os próximos três pontos de ressonância, onde nota-se variações de 0,60% e 1,17%, 0,76% e 1,33%, para o terceiro e quarto ponto, respectivamente. A partir do quinto ponto nota-se que as variações nas frequências ressonantes praticamente não se alteram; entretanto, algumas ressonâncias tem suas amplitudes modificadas, principalmente quando a segunda deformação incide sobre o enrolamento, conforme pode ser visualizado na Figura 6.23, a qual demonstra os últimos pontos ressonantes.

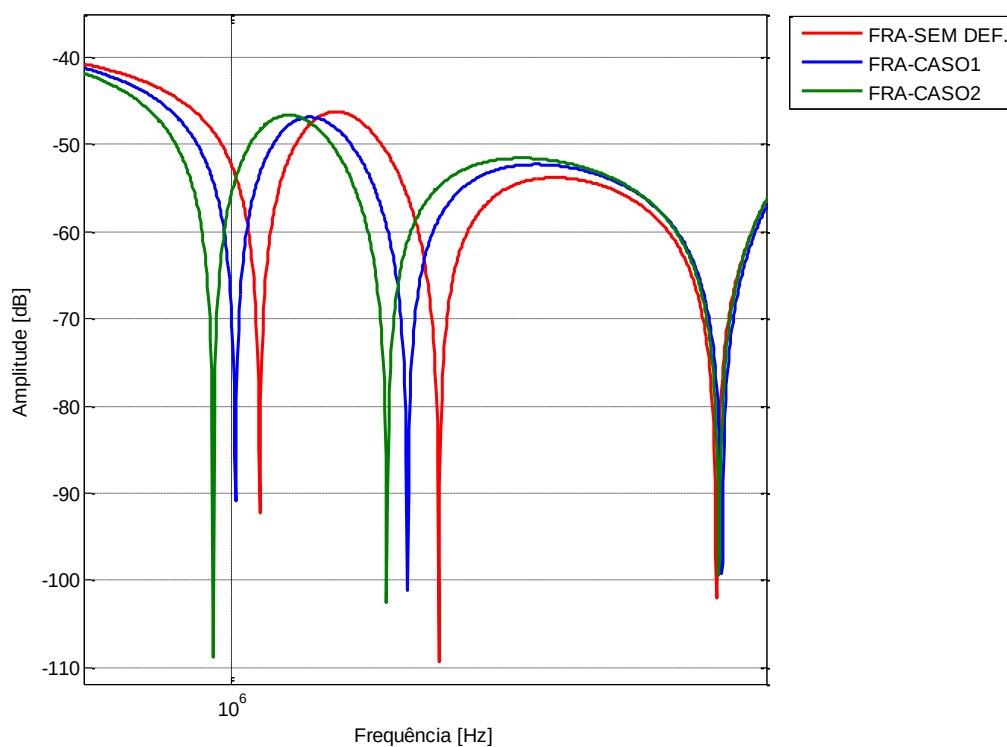


Figura 6.22: Resultados do FRA para os três casos de deformação no enrolamento – Terceiro, quarto e quinto picos de ressonância

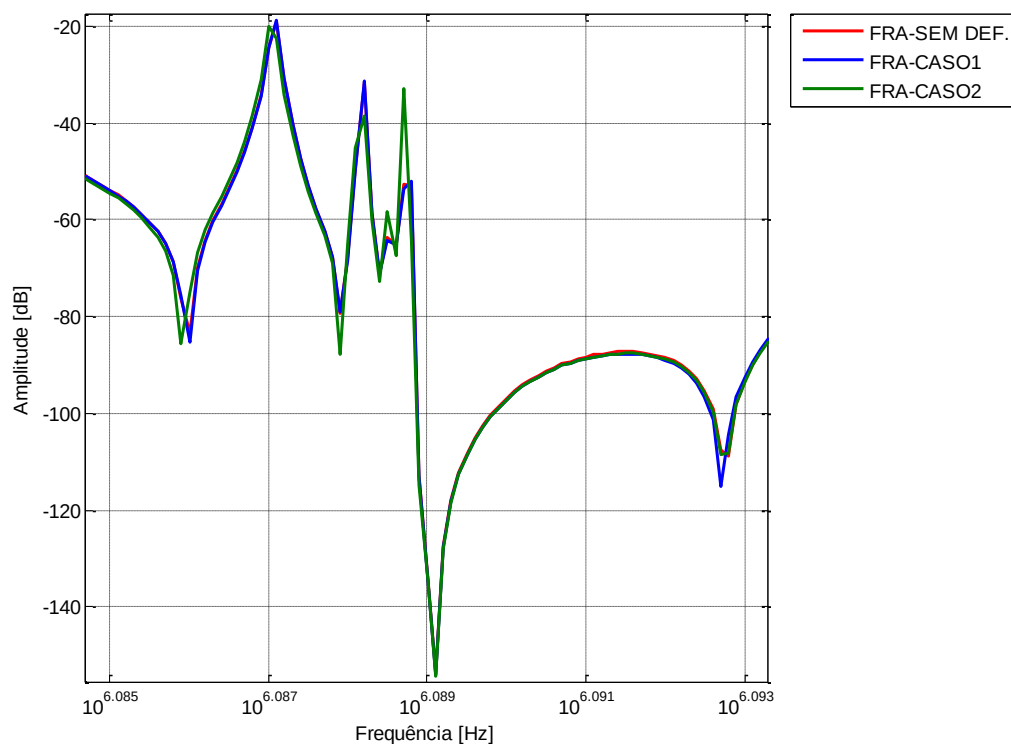


Figura 6.23: Resultados do FRA para os três casos de deformação no enrolamento – últimos picos de ressonância

6.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo descreveu seis metodologias que podem ser aplicadas em transformadores a fim de diagnosticar problemas mecânicos nos enrolamentos.

Antes da aplicação de qualquer tipo de ensaio, o primeiro passo é realizar uma revisão do projeto do equipamento. Nesta primeira etapa, como a preocupação é associada aos estresses mecânicos, deve ser avaliado a margem de segurança de suportabilidade aos esforços eletromecânicos decorrentes das elevadas correntes “passantes” nos enrolamentos. Dessa forma, pode-se ter um indicativo da capacidade do transformador em suportá-las sem que seus enrolamentos sofram algum tipo de deformação.

A próxima etapa é verificar o histórico de energizações e ocorrências de curtos-circuitos que o transformador foi sujeito. Assim, diante da revisão de projeto realizada na etapa anterior, a qual fornece uma margem de segurança de suportabilidade mecânica, tem-se um indicativo da possibilidade do enrolamento estar deformado. Tais verificações podem ser realizadas utilizando equacionamentos já consagrados, ou *softwares* que empregam o método de elementos finitos, conforme aplicado neste trabalho. Este último tem a vantagem de não realizar simplificações, como as existentes em formulações analíticas, gerando assim uma maior confiabilidade nos resultados.

Após perceber a necessidade de se fazer uso de alguma técnica de medição, para avaliar o enrolamento do transformador, aplica-se então os métodos de ensaios apresentados neste Capítulo, os quais são os principais para diagnosticar avarias nos enrolamentos, lembrando que cada teste tem suas limitações. A Tabela 6.5 fornece de forma bem geral, algumas vantagens e desvantagens de cada ensaio [36].

Tabela 6.5: Comparação das principais técnicas de diagnóstico de deformação nos enrolamentos.

Técnica de Diagnóstico	Vantagens	Desvantagens
Corrente de Magnetização	Requer equipamento simples Pode detectar problema no núcleo.	Não é sensível para detecção de deformação no enrolamento; Bastante afetada pela magnetização residual do núcleo.
Reatância de Dispersão	Método convencional, atualmente aplicado nas normas para testes de curtos-circuitos; Valores de referência (dados de placa) são fornecidos.	Pequenas variações podem ser significantes; Sensibilidade limitada para algumas falhas (tem-se mais sucesso para deformações radiais).
FRSL	Pode ser mais sensível do que medição da reatância de dispersão.	Não é um ensaio padrão realizado em indústria.
Capacitância do Enrolamento	Pode ser mais sensível que medições de reatância de dispersão; Disponibilidade de equipamento padrão.	Sensibilidade limitada para algumas falhas (tem-se mais sucesso para deformações radiais).
LVI (Domínio do tempo)	Reconhecido em ser bastante sensível.	Necessidade de equipamento especial; Dificuldade em obter repetibilidade; Difícil de interpretar os resultados.
FRA	Melhor repetibilidade que o LVI, com a mesma sensibilidade; Mais fácil de interpretar que o LVI (domínio da frequência ao invés do domínio do tempo);	Necessidade de padronização das técnicas; Necessidade de um guia para interpretação.

Ressalta-se que a validade destas metodologias foi demonstrada a partir de experiências industriais, bem como simulações computacionais pelo caso aqui estudo, as quais forneceram um bom indicativo da potencialidade de cada método aplicado.

Tomando-se como base as metodologias descritas neste Capítulo, e verificando-as dentro de certo limite, observou-se que as deformações aplicadas no transformador de 15 kVA no Capítulo anterior foram detectadas em três delas, a saber:

- Medição de capacitâncias do enrolamento;
- Medição da impedância de curto-circuito/reatância de dispersão;
- Análise de resposta em frequência (FRA).

Provavelmente também seriam em mais outras duas, se as mesmas tivessem sido aqui aplicadas:

- Medição pelo método de resposta em frequência das perdas adicionais (FRSL);
- Análise por impulso de baixa tensão (LVI).

As variações nos parâmetros, já verificadas no Capítulo 5, foram condizentes com as esperadas e descritas em cada uma das metodologias apresentadas.

As capacitâncias intrínsecas apresentam variações mínimas, embora indicativas de alterações internas ao transformador. Pelo fato de se ter mantido constantes os parâmetros como permissividade e tangente delta em cada um dos dielétricos contidos no transformador, em todas as simulações realizadas, a variação neste parâmetro foi única e exclusivamente pertinente às deformações aplicadas no enrolamento interno da Fase B. Entretanto, em um caso real de medição, a degradação do óleo, a quantidade da água e a contaminação com carbono e outras partículas podem alterar estes fatores; sendo assim, é até mesmo indicada uma verificação na qualidade do próprio óleo antes de se prosseguir com outro método para verificar se houve ou não uma deformação no enrolamento.

A modificação da impedância de curto-circuito, por mais sutil que tenha sido, já pode indicar uma alteração no enrolamento, e quando se faz esta medição por fase, já se tem uma perspectiva em qual delas o enrolamento esteja prejudicado. Entretanto, a utilização de uma medição tão simples como esta, a qual pode acabar acarretando erros provenientes de conexões mal feitas ou equipamentos mal calibrados são sempre previstos, desta forma, há a indicação de se empregar outro método para a verificação de tais variações.

Além dos métodos de medição pela análise de resposta em frequência das perdas adicionais (FRSL) e por impulso de baixa tensão (LVI), há ainda outra metodologia, a análise da resposta em frequência (FRA) que podem complementar as medições mencionadas anteriormente. As duas primeiras não

foram verificadas no presente trabalho, diferentemente da última, a qual foi verificada através de simulações computacionais empregando o ATP.

Para a realização de tal estudo foi necessária a implementação de um modelo do transformador de 15 kVA diferente dos apresentados no Capítulo 2, uma vez que este deve responder bem às altas frequências existentes no método. Dentre os muitos modelos existentes para este intuito, optou-se por utilizar o mais simples deles, pois já seria o suficiente para verificar a metodologia do FRA, juntamente com as deformações impostas ao enrolamento. Conforme esperado, este modelo apresentou características as quais puderam ser comparadas com uma medição real existente em outro transformador, mas com o mesmo defeito aqui utilizado. Pode-se observar que as frequências dos pontos de ressonâncias existentes no modelo sem deformação se alteram, com a tendência de diminuir seu valor quando a deformação é aplicada.

De uma maneira geral pode-se comprovar que as metodologias propostas nas literaturas possuem suas vantagens e desvantagens, e a aplicação dessas metodologias podem auxiliar bastante na avaliação da condição do enrolamento do transformador.

Contudo, não se deve esquecer que os principais estresses que atuam no transformador (mecânico, elétrico, térmico e químico) estão relacionados entre si. Assim, torna-se difícil estimar a vida útil do transformador de forma quantitativa. Por isso, tem-se buscado cada vez mais a inserção de metodologias que avaliem o transformador de forma qualitativa, realizando manutenções baseadas na condição de suportabilidade do transformador e não mais aplicando manutenções periódicas.

CAPÍTULO VII

CONSIDERAÇÕES GERAIS

7.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

O estudo realizado no presente trabalho teve como princípio a determinação, através de uma metodologia computacional, de possíveis alterações nos parâmetros elétricos, magnéticos e mecânicos do transformador quando uma deformação incidisse sobre seu enrolamento.

O primeiro passo para o desenvolvimento desta metodologia foi a busca por *softwares* e modelos que pudessem assessorar o objetivo aqui almejado. Inicialmente, optou-se por empregar o programa computacional amplamente utilizado e conhecido, tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial, o ATP (*Alternative Transient Program*). E dentre os modelos de transformadores existentes neste *software*, aquele que emprega o princípio da dualidade, e conseqüentemente o acoplamento magnético entre fases, se demonstrou o mais completo e apropriado para a investigação a ser realizada nesta tese.

Neste modelo, cada caminho de fluxo magnético existente no interior do transformador é representado por uma indutância, seja ela linear (para o caso do ar), e não linear (para o núcleo ferromagnético). A determinação de cada uma destas indutâncias pode ser realizada através de cálculos relativamente simples e

se baseia nos parâmetros construtivos do equipamento, juntamente a ensaios de rotina como, por exemplo, o ensaio a vazio.

Este modelo foi implementado para auxiliar na obtenção das variáveis elétricas, magnéticas e mecânicas perante uma deformação do enrolamento do transformador. Obviamente, as variáveis elétricas são obtidas de forma direta no próprio *software*; entretanto, para a aquisição das grandezas magnéticas e mecânicas, foram necessárias algumas adequações. As variáveis magnéticas puderam ser obtidas através de um integrador formado por uma resistência e uma capacitância, inserido em paralelo com as indutâncias representativas dos caminhos dos fluxos magnéticos. Para a obtenção das variáveis mecânicas, utilizou-se de formulações analíticas, implementadas utilizando a rotina TACS, existentes em referências bibliográficas e já validadas para o caso do transformador sendo submetido à condição operacional de curto-circuito. Observa-se que as formulações analíticas atualmente disponíveis na bibliografia, não se aplicam para o caso de somente um enrolamento por fase energizado, ou seja, as mesmas não se aplicam aos estudos de energização.

Com o intuito de analisar as consequências da deformação no enrolamento do transformador, verificou-se que a mesma acarreta variações nas indutâncias acima mencionadas, ou seja, os caminhos de fluxos representados pelas indutâncias modificam seus valores de acordo com a deformação imposta ao enrolamento. Pelo fato das formulações empregadas inicialmente levarem em consideração os parâmetros do transformador quando o mesmo está em seu estado intacto, empregar novas formulações para o caso do enrolamento deformado acarretaria certa complexidade. Neste contexto, optou-se então por utilizar outro *software* que pudesse assessorar na obtenção de tais parâmetros, bem como para confrontar os resultados obtidos no modelo do ATP.

Dentre os *softwares* analisados, um dos que se destacaram por sua eficiência foi o FLUX3D, o qual utiliza o método de elementos finitos para a realização dos cálculos. Para os estudos propostos nesta tese, houve a

necessidade de se criar dois modelos neste software, um para estudos magnéticos e eletrodinâmicos, e outro para eletrostáticos.

Após as finalizações das modelagens, no ATP e no FLUX3D, foram realizadas simulações de operações do transformador empregando ambos os modelos, a saber: a vazio, em curto-circuito com tensão reduzida, com carga nominal, em curto-circuito trifásico “passante” e energização. Os resultados obtidos em tais simulações foram confrontados com medições realizadas, ou com parâmetros calculados analiticamente. Além das condições operacionais supracitadas foi realizada uma simulação utilizando o modelo no FLUX3D para estudos eletrostáticos, para a verificação das capacitâncias intrínsecas existentes no interior do transformador, sendo que os valores obtidos foram confrontados com os adquiridos através de medições realizadas. Tais medições tomam como base algumas configurações de conexões dos enrolamentos, bem como formulações simples. As confrontações de resultados obtidos através das simulações, com os obtidos via medição ou cálculos analíticos possibilitaram a validação dos modelos.

Durante o processo de validação, do ensaio de energização, deparou-se com diferenças percentuais altas, quando confrontados os resultados obtidos para as forças axiais no ATP e no FLUX3D. Este fato pode ser facilmente explicado, uma vez que as formulações utilizadas no ATP, para o cálculo de tais forças, têm como base estudos relacionados em outro tipo de fenômeno eletromagnético, ou seja, o curto-circuito. Neste contexto, com o intuito de melhorar os resultados de tal parâmetro na modelagem do ATP, esta tese propõe adequações nas referidas formulações, de tal forma que as mesmas pudessem ser utilizadas para a condição operacional de energização. Tais alterações foram devidamente embasadas em estudos realizados no FLUX3D.

Após as validações, o próximo passo realizado neste trabalho foi a imposição da deformação tipo “curvatura livre” no enrolamento interno da Fase B. Inicialmente, a deformação foi bem sutil e ocorrendo em um lado do referido

enrolamento. Para que o estudo ficasse bem embasado, aplicou-se na sequência a mesma saliência no outro lado da bobina. Tais alterações no enrolamento foram inseridas primeiramente no FLUX3D, uma vez que este *software* foi utilizado para determinar alguns parâmetros empregados no ATP.

Com o auxílio do FLUX3D foi possível perceber que algumas características magnéticas sofreram alterações após a imposição das deformações como, por exemplo, o caminho de fluxo magnético entre enrolamentos e entre enrolamento interno e coluna. Tais variações refletem alterações nas indutâncias lineares que representam tais caminhos no ATP.

Além destas grandezas, o *software* acima mencionado, possibilitou a obtenção de outros parâmetros que também sofrem alterações após a aplicação das deformações, a saber: resistência do enrolamento interno, capacitâncias e perdas dielétricas existentes entre enrolamento externo e interno, e entre este último com a coluna central do núcleo do transformador.

Após as análises criteriosas para a verificação das possíveis alterações ocorridas no transformador, em termos de parâmetros construtivos, empregando o FLUX3D, ajustaram-se os mesmos no modelo do ATP. Na sequência tais modelagens (ATP e FLUX3D) foram submetidas às mesmas simulações anteriormente utilizadas para a realização da validação.

Analizando as simulações a vazio e com carga nominal, notou-se que nenhuma variação nas grandezas elétricas e magnéticas foi detectada. Para o caso operacional de curto-circuito com tensão reduzida, notou-se variações nas correntes da fase onde existe um enrolamento deformado, bem como na perda dos enrolamentos, impedâncias percentuais, e nas densidades de fluxos de coluna e de dispersão. Tais variações são pequenas e muitas das vezes poderiam ser consideradas desprezíveis; no entanto, os estudos aqui apresentados demonstram que estas já indicam uma alteração na geometria do transformador. Pelo fato destas alterações serem perceptíveis na Fase B, ou seja, na fase central

do transformador, em um caso real, poder-se-ia investigar com maiores detalhes, os motivos que levaram a tais variações.

Continuando as análises perante as simulações realizadas, observou-se que na condição operacional de curto-circuito “passante”, pequenas variações ocorrem nas correntes e na densidade de fluxo de dispersão, somente na Fase B. Entretanto, um fato extremamente importante foi verificado nas forças radiais para este caso. Tal parâmetro sofre um aumento considerável quando a deformação incide sobre o enrolamento, indicando que quando o enrolamento possui alguma deformação esta pode ser agravada com a ocorrência de outro curto-circuito. Para o caso onde haviam duas deformações no enrolamento, o aumento desta grandeza foi próximo de 16%. Assim, quando se verificar que o enrolamento tem algum tipo de deformação, é necessário que se faça manutenções preventivas para evitar a retirada do mesmo de operação.

A força radial no enrolamento externo da mesma fase também teve um acréscimo perante a deformação no enrolamento interno, embora este tenha ficado bem abaixo daquele obtido na bobina defeituosa. Este acréscimo pode acarretar uma deformação no enrolamento externo quando o estresse sob o mesmo ultrapassar o admissível.

Quanto à força axial analisada, notou-se que a mesma também possui um acréscimo com a deformação radial imposta. Para o caso do enrolamento sob estudo, deformações axiais não são possíveis de ocorrerem, entretanto, para um enrolamento que possua espaçadores radiais este acréscimo na força compressiva axial pode levar a uma deformação também axial.

Os estudos referentes à condição operacional de energização apresentaram variações na corrente da Fase B, na densidade de dispersão, bem como nas forças radiais e axiais. Neste caso, os acréscimos ocorridos nas forças radiais existiram, mas ficaram abaixo dos observados para o estudo sob curto-circuito trifásico “passante”. Todavia, tais variações devem ser levadas em consideração, uma vez que uma deformação no enrolamento provoca, de certa maneira, um

enfraquecimento do cobre e do material isolante. Desta forma, uma pequena variação na força radial, provocada por um simples religamento do transformador, poderá provocar a ruptura do dielétrico e, conseqüentemente, a retirada do equipamento de operação.

Durante as análises das forças axiais pôde-se perceber que, para o caso de energização, estas sofrem um decaimento perante a deformação, o que pode indicar uma possível despreocupação com este parâmetro no ato da energização do transformador.

Notou-se ainda, nestas investigações, que as adequações desenvolvidas nas formulações analíticas empregadas no ATP para o cálculo das forças radiais e axiais, se demonstraram eficientes, uma vez que os resultados obtidos no ATP se aproximaram mais daqueles adquiridos no FLUX3D. Entretanto, é válido lembrar que estas formulações analíticas ainda possuem simplificações que induzem às diferenças existentes entre *softwares*.

O último estudo realizado nesta etapa do trabalho foi em relação às capacitâncias intrínsecas existentes no transformador. Nestas pode-se perceber que a existente entre o enrolamento interno e a coluna diminui, enquanto que a existente entre enrolamento interno e externo aumenta. Foi verificado ainda que as deformações no enrolamento interno afetaram muito mais a capacitância entre enrolamentos que entre enrolamento interno e coluna.

Realizados estes estudos, a última etapa deste trabalho foi a análise computacional das metodologias existentes para o diagnóstico de falhas nos enrolamentos do transformador. Algumas destas metodologias puderam ser comprovadas computacionalmente, como por exemplo, corrente de magnetização, reatância de dispersão, capacitâncias dos enrolamentos e a análise de resposta em frequência (FRA).

Dentre estas metodologias testadas, a única que não demonstrou nenhuma alteração nos valores analisados foi a da corrente de magnetização, o que já era

esperado, uma vez que esta sofreria modificações apenas caso o núcleo tivesse sido alterado, ou se houvesse curto-circuito entre espiras.

As metodologias que medem as variações na reatância de dispersão e nas capacitâncias intrínsecas foram comprovadas via simulação, embora tais variações tenham se mostrado pequenas e, por vezes, podendo ser desprezadas. Não obstante, nos estudos aqui apresentados, notou-se que pequenas variações em tais parâmetros indicam deformações nos enrolamentos, as quais aumentam de forma significativa as forças radiais perante o curto-circuito trifásico “passante”. É válido mencionar que tais técnicas podem apresentar variações em seus resultados por outros problemas que não a deformação no enrolamento. Para o caso da medição da reatância de dispersão, equipamentos mal calibrados ou conectores defeituosos podem levar também à alteração da reatância. Já para o caso das capacitâncias, tem-se que estas sofrem alterações em função da temperatura, bem como impurezas no óleo. Ou seja, caso ocorra alguma variação em tais parâmetros, é necessário aprofundar os estudos para verificar se estas são ou não provenientes de deformações.

Para a realização da análise de resposta em frequência (FRA), houve a necessidade da implementação de um outro modelo para o transformador, mais adequado para o referido estudo. Tal modelo foi implementado no ATP, onde foi submetido à simulação do tipo “*frequency scan*”, na qual o *software* faz uma varredura de frequência. Os resultados obtidos para o caso onde não havia nenhuma deformação no enrolamento interno da fase central, juntamente àqueles obtidos quando o referido enrolamento possuía as deformações foram comparados, e, como conclusão final, pôde-se perceber que as saliências impostas ao enrolamento, por mais sutil que tenha sido, inicialmente já modificou a resposta do FRA. Ou seja, os mesmos pontos de ressonância existentes para o caso sem deformação continuaram existindo para os casos deformados, embora as frequências de ressonância tenham sofrido diminuição em seus valores. Este fato foi comparado com um exemplo real, no qual o

enrolamento também possuía a deformação tipo “curvatura livre”, comprovando sua eficiência.

De todas as técnicas testadas nesta tese, a que mais se destacou foi a do FRA, uma vez que, mesmo havendo alterações na reatância de dispersão ou na capacitância, estas podem não estar relacionadas com a deformação do enrolamento em si, conforme explicado nesta tese. Entretanto, a medição do FRA se mostrou mais sensível à deformação imposta ao enrolamento, e, segundo outros estudos, sensível também a outros tipos de deformações não estudadas aqui, diferentemente das técnicas supracitadas que podem não sofrer nenhuma variação dependendo da distorção sofrida pelo enrolamento.

De uma maneira geral, este trabalho contribuiu com alguns estudos e análises que vão dar subsídios a trabalhos futuros. Considerando as propostas iniciais, pode-se dizer que a tese em questão conseguiu cumpri-las. Destaca-se a utilização do *software* ATP para a determinação de variáveis magnéticas e mecânicas, as quais foram obtidas diretamente do modelo utilizado e com implementações de formulações analíticas utilizando a rotina TACS, respectivamente. Tais formulações foram adequadas para a análise durante o processo de energização, uma vez que as mesmas foram baseadas em estudos considerando o transformador submetido a um curto-circuito. Outro item interessante que merece destaque é a utilização de um *software* que emprega o método de elementos finitos, para a determinação de parâmetros empregados no modelo do ATP, os quais seriam extremamente complexos de serem obtidos através de equacionamentos quando a incidência de uma deformação no enrolamento ocorresse. E, finalmente, nesta tese pôde-se chegar à conclusão que uma das metodologias empregadas na atualidade para o diagnóstico de falhas nos enrolamentos dos transformadores, ou seja, a análise de resposta em frequência, se demonstrou a mais eficiente no estudo aqui apresentado.

É importante que se tenha em mente que nem sempre é possível realizar medições reais, de forma que, simulações computacionais, tais como as

realizadas neste trabalho, contribuem para uma análise que pode indicar possíveis alterações em transformadores que poderiam levá-los a uma falha inesperada.

7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após o fechamento desta tese, e com base na relevância do assunto aqui abordado, apresentam-se, como temas indicativos para um maior aprofundamento, os seguintes assuntos:

- Tendo como base a metodologia aqui apresentada, realizar estudos com transformadores de maior potência e com outros tipos de enrolamentos, aplicando outras deformações radiais e também axiais, para a verificação do comportamento das técnicas de diagnóstico de falhas nos enrolamentos do transformador;

- Realizar um estudo em um transformador real, tendo como base um histórico do mesmo durante alguns anos, desde sua instalação no sistema até sua interdição pela falta de condição operacional. Neste estudo, deve-se tomar o cuidado de realizar as técnicas de diagnóstico de falhas, verificando o aparecimento de possível deformação, e através de simulações empregando a metodologia aqui proposta, constatar o momento no qual o enrolamento ficou prejudicado. O histórico deste estudo deve constar tanto o número e durações de curto-circuitos ao qual o transformador foi submetido, juntamente com o número de energizações, bem como a condição operacional do sistema no qual o mesmo está conectado;

- Efetuar estudos computacionais utilizando outro *software* que emprega o método de elementos finitos, onde seja possível visualizar a deformação no enrolamento do transformador quando as forças radiais e axiais incidirem sob o

mesmo. Ou seja, neste estudo a deformação não deverá ser imposta como nos casos aqui apresentados, mas sim aquela que ocorreria tendo como base as características físicas do cobre juntamente com o próprio enrolamento. Esta análise poderia levar em consideração também a temperatura interna do transformador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] CIGRE, Working Group 12.19 - "***The Short Circuit Performance of Power Transformers***", Brochure 209, CIGRE, 2002.
- [3] MEDINA P., M. C. - "***Falhas em Transformadores de Potência: Uma Contribuição para Análises, Definições, Causas e Soluções***", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2003.
- [4] CIGRE, Groupe du Travail 12.05 - "***Enquête Internationale sur les Défaillances en Service des Transformateurs de Grande Puissance***", ELECTRA, No. 88, 1983.
- [5] FRANZEN, A., KARLSSON, S. - "***Failure Modes and Effects Analysis of Transformers***", Royal Institute of Technology, KTH, School of Electrical Engineering, Stockholm, January 2007.
- [6] DE LEON, F.; SEMLYEN, A. - "***Complete transformer model for electromagnetic transients***", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, January 1994
- [7] R. YACAMINI and H. BRONZEADO - "***Transformer inrush calculation using a coupled electromagnetic model***", IEE Proc.Sci.Meas.Technol., V.141, N° 06, November/1994.
- [8] A.M. MIRI, C. MÜLLER and C. SIHLER - "***Modelling of inrush currents in power transformers by a detailed magnetic equivalent circuit***", Universität Karlsruhe,

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik e Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP).

[9] FANDI, J. C. O. - “**Modelagem de Transformadores de Três Colunas para Estudos de Corrente de Energização**”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/2003.

[10] SARAIVA, E. - “**Modelagem de Transformadores de Três Colunas com Base na Distribuição de Fluxos Magnéticos no Núcleo, Considerando o Efeito do Ciclo de Histerese**”, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia/2004.

[11] MORK. B. A. - “**Five-Legged Wound-Core Transformer Model: Derivation, Parameters, Implementation, and Evaluation**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999

[12] CHERRY, E. C. - “**The Duality Between Interlinked Electric and Magnetic Circuits and the Formation of Transformer Equivalent Circuit**”, Proc. Of the Physical Society, V. (B) 62, pages 101-111, February/1949.

[13] KERCHNER, R. M. and CORCORAN, G. F. - “**Circuitos de Corrente Alternada**”, Editora Globo Ltda, 1977.

[14] BASTOS, J. P. A. - “**Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**”, 2. ed. [S.l.]: UFSC, 1992.

[15] CARDOSO, J. R. - “**Introdução ao Método dos Elementos Finitos**”, Publicação Independente, Primeira Edição, São Paulo, 1995.

[16] “**Manual de utilização do FLUX**”, Volumes 1-5, 17 julho 2007, CEDRAT

[17] AZEVEDO, A. C. - “**Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Correntes de Energização**”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Fevereiro de 2007.

- [18] ROSENTINO JR, A. J. P. -***“Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-circuito Trifásico”***, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, julho 2010
- [19] YUN-QIU, T.; JING-QIU, Q.; ZI-HONG, X. -***“Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformers winding”***, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 2, p. 1039-1041, March 1990.
- [20] NAJDENSKOSKI, K.; MANOV, D. -***“Electromagnetic forces calculation on power transformer windings under short circuits”***, *The International Journal Computation Mathematics in Electrical and Electronics Engineering*, v. 17, n. 1/2/3, p. 374-377, May/June 1998.
- [21] SALON, S.; LAMATTINA, B.; SIVASUBRAMANIAM, K. -***“Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers”***, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 36, n. 5, p. 3521- 3523, September 2000.
- [22] WATERS, M. -***“The Short-Circuit Strength of Power Transformers”***, Macdonald & Co., London, 1966.
- [23] E. BILLIG, E. -***“Mechanical Stresses in Transformers Windings”***, *Electrical Engineers - Part II: Power Engineering, Journal of the Institution*, Vol.93, pags 227-243, June 1946.
- [24] AGUIAR, E. R. -***“Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência”***, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2007.
- [25] MCNUTT, W. J., JOHNSON, W. M., NELSON, R. A., AYERS, R. E. -***“Power Transformer Short-circuit Strength – Requirements, Design and Demonstration”***, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. Pas-89, nº8, p.p. 1955-1969, December 1970.

- [26] ASLAM MINHAS, M. S. - ***“Dynamic Behaviour of Transformer Winding under Short-Circuits”***, PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, November 2007.
- [27] BARTLEY P. E., W. H. - ***“Analysis of Transformer Failures”***, International Association of Engineering Insurers, 36th Annual Conference, Stockholm, 2003.
- [28] CORCORAN, R. J., PALMER, S. - ***“Mechanical Properties of Copper in Relation to Power-Transformer Design”***, IEEE Power Engineering Journal, Vol.1, pp. 154-157, 1987.
- [29] NORRIS, E. T. - ***“Mechanical Strength of Power Transformers in Service”***, Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, Vol.104, pp. 289 – 300, 1957.
- [30] PAULINO, M. E. de C. - ***“Medidas de Resposta em Frequência, Capacitância e Fator de Potência com Variação de Frequência para Diagnóstico de Transformadores”*** SBSE 2006, Campo Grande – Paraíba, julho/2006
- [31] IEEE Std C57.12.90TM - 2010 - ***“IEEE Standard test code for liquid-immersed distribution, power and regulating transformers”***, IEEE power & energy society, 15 october 2010
- [32] NUNES, A.P.; BELTRÃO, V. C. V. M.; PAULINO, M. E. C. - ***“Medidas de impedância de curto-circuito e reatância de dispersão com variação de frequência em transformadores de potência”***, XIII ERIAC - Décimo Tercer Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ, 24 al 28 de mayo de 2009
- [33] BOLDUC, L.; PICHER, P.; PARÉ, G.; DEMERS, R.J.; BÉLANG J. - ***“Detection of transformer winding displacement by the frequency response of stray losses (FRSL)”***, CIGRÉ Session 2000 - 12/33-02
- [34] DROBYSHEVSKI, A.; LEVITSKAYA, E.; LURIE, A.; PANIBRATETS, A. - ***“Combined Assessment of Transformer Winding Mechanical Condition - Important Step to Enhancement of Transformer Reliability”***, CIGRÉ 2006 - A2-109

- [35] DROBYSHEVSKI, A. - ***“Assessment of Transformer Winding Mechanical Condition by Low-Voltage Impulse Method”***, IEEE Bologna Power Tech conference, June 23th-26th / 2003, Bologna, Italy
- [36] CIGRE, Working Group A2.26 - ***“Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA)”***, Brochure 342, April 2008
- [37] PAULINO, M. E. de C. - ***“Introdução à análise de resposta em frequência”***, O setor elétrico / setembro 2009
- [38] KRAETGE, A.; KRÜGER, M.; VELÁSQUEZ, J.L.; VILJOEN, H.; DIERKS, A. - ***“Aspects of the practical application of sweep frequency response analysis (SFRA) on power Transformers”***, Cigré 2009, 6th Southern Africa Regional Conference, Paper P504
- [39] HERSZTERG, K. S. - ***“Desenvolvimento de um modelo matemático para enrolamentos de transformadores: uma abordagem analítica da resposta em frequência”***, tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, março de 2004
- [40] BJERKAN, E. - ***“High Frequency Modeling of Power Transformers”***, Doctor Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
- [41] TORRES, A. L. O. - ***“Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Análise da Resposta em Frequência”***, dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/2006
- [42] MARTINS, H. J. A. - ***“Diagnóstico de Transformadores de Potência através de Metodologias do Domínio da Frequência”***, Tese de doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, Fevereiro / 2007
- [43] AGUIAR, E. R. - ***“Análise de resposta em frequência aplicada em transformadores de potência”***, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, março/2007

- [44] JANUÁRIO, M. - *“Modelagem de transformadores em função da frequência”*, dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/2007
- [45] KARSAI, K., KERÉNYI, D., KISS, L. - *“Large Power Transformer”*, v. 25, New York, Elsevier. 1987
- [46] LEUVEN EMTP CENTER (LEC) - *“Alternative Transients Program (ATP)”*, RULE BOOK, july/1987.
- [47] ABNT, Rio de Janeiro - *“NBR5380 - Transformador de Potência - Método de Ensaio”*, junho/1993.
- [48] PAULINO, M. E. C.; *“Avaliação do Isolamento em Transformadores de Potência com Testes Elétricos Avançados”*. INDUSCON 2010, São Paulo – São Paulo, novembro/2010.
- [49] ROJAS, A.; *“Power Factor Testing in Transformer Condition Assessment – Is There a Better Way?”* 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela
- [50] WANG, M.; VANDERMAAR, A.; SRIVASTAVA, K.; *“Condition Monitoring of Transformers in Service by the Low Voltage Impulse Test Method.”* High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication No. 467, IEE, 1999

ANEXO I

MODELO DE TRANSFORMADOR DE 15 kVA NO ATP

```

BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
C *****
CUNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA
CDESENVOLVIDO POR ELISE SARAIVA E MARCELO LYNCE R. CHAVES
CMODELO DE TRANSFORMADOR DE 3 COLUNAS BASEADO NO CIRCUITO MAGNETICO
CIMPLEMENTAÇÃO DE CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DE FORÇA E ESTRESSES
CTRANSFORMADOR DE 15 kVA 220-220V YY
C *****
$ERASE
ARG ALTA F XXXXY BAIXA NEUTRO
C *****
C          TACS PARA AQUISIÇÃO DE CORRENTES E TENSÕES
C *****
/TACS
C *****
C          DETERMINAÇÃO DAS INDUÇÕES MAGNÉTICAS
C *****
C          COLUNAS
C *****
90FICOLA
90FICOLB
90FICOLC
90IN_COA
90IN_COB
90IN_COC
C *****
C          CULATRAS
C *****
90FICULA
90FICULC
90DELTA1
90DELTA3
C *****
C          AQUISIÇÃO DAS CORRENTES ENROLAMENTOS DE ALTA E BAIXA
C *****
91ALTAFA
91ALTAFB
91ALT AFC
91BAIXAA
91BAIXAB
91BAIXAC
C *****
C          ESPECIFICAÇÃO DAS CONSTANTES
C *****
C  NAME|  |AMPLITUDE|  | TSTART  | TSTOP
C *****
88N      = 66.
88PI_____ = 3.14159265359
88AREA___ = 0.00001575
88ALTURA = 0.167
88AREADP  = 2.6966
88AREACO  = 3.84879
88AREACU  = 3.6426
88DM_INT  = 0.097879

```

```

88DM_EXT = 0.142879
88DMTRAF = 0.14694
88D0 = 0.01494
88DINT = 0.007561
88DEXT = 0.007561
C *****
C FORMULAÇÕES PARA CÁLCULOS DE FORÇAS E ESTRESSES
C *****
C CÁLCULOS DAS INDUÇÕES DE COLUNAS
C *****
88B_COLA = (FICOLA-IN_COA)*AREACO
88B_COLB = (FICOLB-IN_COB)*AREACO
88B_COLC = (FICOLC-IN_COC)*AREACO
C *****
C CÁLCULOS DAS INDUÇÕES DE CULATRAS
C *****
88B_CULA = (FICULA-DELTA1)*AREACU
88B_CULC = (FICULC-DELTA3)*AREACU
C *****
C CÁLCULOS DAS INDUÇÕES DE DISPERSÃO
C *****
88B_DISA = (4*PI____*N*ALTAFA)/(1E7*ALTURA)
88B_DISB = (4*PI____*N*ALTAFB)/(1E7*ALTURA)
88B_DISC = (4*PI____*N*ALTAFC)/(1E7*ALTURA)
C *****
C CÁLCULOS DAS INDUÇÕES MAGNÉTICAS DE DISPERSÃO
C *****
88BIDISA = (4*PI____*N*BAIXAA)/(1E7*ALTURA)
88BIDISB = (4*PI____*N*BAIXAB)/(1E7*ALTURA)
88BIDISC = (4*PI____*N*BAIXAC)/(1E7*ALTURA)
C *****
C FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS
C *****
88FR_EXA = (N*ALTAFA*B_DISA*PI____*DM_EXT)/2
88FR_EXB = (N*ALTAFB*B_DISB*PI____*DM_EXT)/2
88FR_EXC = (N*ALTAFC*B_DISC*PI____*DM_EXT)/2
C *****
C FORÇAS RADIAIS NOS ENROLAMENTOS INTERNOS
C *****
88FR_INA = (N*BAIXAA*(BIDISA)*PI____*DM_INT)/2
88FR_INB = (N*BAIXAB*(BIDISB)*PI____*DM_INT)/2
88FR_INC = (N*BAIXAC*(BIDISC)*PI____*DM_INT)/2
C *****
C FORÇAS RADIAIS MÉDIAS NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS
C *****
88FRMEXA = FR_EXA/PI____
88FRMEXB = FR_EXB/PI____
88FRMEXC = FR_EXC/PI____
C *****
C FORÇAS RADIAIS MÉDIAS NOS ENROLAMENTOS INTERNOS
C *****
88FRMINA = FR_INA/PI____
88FRMINB = FR_INB/PI____
88FRMINC = FR_INC/PI____
C *****
C ESTRESSES RADIAIS MÉDIOS NOS ENROLAMENTOS EXTERNOS
C *****
88ERMEXA = (FRMEXA)/(2*N*AREA____)
88ERMEXB = (FRMEXB)/(2*N*AREA____)
88ERMEXC = (FRMEXC)/(2*N*AREA____)
C *****
C ESTRESSES RADIAIS MÉDIOS NOS ENROLAMENTOS INTERNOS
C *****
88ERMINA = (FRMINA)/(2*N*AREA____)
88ERMINB = (FRMINB)/(2*N*AREA____)
88ERMINC = (FRMINC)/(2*N*AREA____)
C *****
C FORÇAS AXIAIS COMPRESSIVAS TOTAIS
C *****
88FAC1A = ((2*PI____*PI____*N*N*BAIXAA*BAIXAA*DMTRAF)/(1E7*ALTURA*ALTURA))
88FACTOA = FAC1A*(D0+(DINT+DEXT)/3)
88FAC1B = ((2*PI____*PI____*N*N*BAIXAB*BAIXAB*DMTRAF)/(1E7*ALTURA*ALTURA))
88FACTOB = FAC1B*(D0+(DINT+DEXT)/3)
88FAC1C = ((2*PI____*PI____*N*N*BAIXAC*BAIXAC*DMTRAF)/(1E7*ALTURA*ALTURA))
88FACTOC = FAC1C*(D0+(DINT+DEXT)/3)
C *****
C FORÇAS AXIAIS COMPRESSIVAS INDIVIDUAIS
C *****
88FACTIA = (2/3)*FACTOA
88FACTIB = (2/3)*FACTOB
88FACTIC = (2/3)*FACTOC
88FACTEA = (1/3)*FACTOA
88FACTEB = (1/3)*FACTOB
88FACTEC = (1/3)*FACTOC
C *****
C VARIÁVEIS DE SAIDAS

```

```

C *****
C CNAME| NOME| NOME| NOME|
33B_COLAB_COLBB_COLCB_CULAB_CULCB_DISAB_DISBB_DISCBIDISABIDISBBIDISC
33FR_EXAFR_EXBFR_EXCDBDISPABDISPBBDISPC
33FR_INAFR_INBFR_INC
33FRMEXAFRMEXBFRMEXCFRMINAFRMINBFRMINC
33ERMEXAERMEXBERMEXCERMINAERMINBERMINC
33FACTOFACTOBFACIOFACTIAFACTIBFACTICFACTEAFACTEBFACTEC
C *****
C                               MODELO DO TRANSFORMADOR
C *****
/BRANCH
$VINTAGE, 1
C *****
C                               FLUXOS MAGNETICOS - FASE A
C *****
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
EX_INAFICOLA      10000000.
FICOLAIN_COA      {FLUXO NA COLUNA} .1
DELTA2FICULA      10000000.
FICULADELTA1      {FLUXO NAS CULTRAS DA COLUNA A } .1
C *****
C                               FLUXOS MAGNETICOS - FASE B
C *****
C EX_INBFICOLB      10000000.
FICOLBIN_COB      {FLUXO NA COLUNA} .1
C *****
C                               FLUXOS MAGNETICOS - FASE C
C *****
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
EX_INCFICOLC      10000000.
FICOLCIN_COC      {FLUXO NA COLUNA} .1
DELTA1FICULC      10000000.
FICULCDELTA3      {FLUXO NAS CULTRAS DA COLUNA A } .1
C *****
$VINTAGE, 0
C *****
C                               COLUNA CENTRAL FASEB
C *****
C CENROLAMENTO EXTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kV
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
TRANSFORMER      .1E-06.37538TOPATB
.10000E-06      .37581E+00
C *****
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO X CORRENTE
9999
C *****
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | | E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA2AR_TQB      .00001.100
2ALTAFBXXXXXY      .040 .00001.127
C *****
C CENROLAMENTO INTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kV
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
TRANSFORMER      TOPBTB
.10000E-06      .37581E+00
C *****
C ***** CARTAO PARA TERMINAR A CARACTERISTICA DE FLUXO X CORRENTE
9999
C *****
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | | E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA2EX_INB      .00001.100
2BAIXABNEUTRO      .029 .00001.127
C *****
C                               DISPERSAO ENTRE BOBINAS
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
AR_TQBEX_INB      0.14502
AR_TQBEX_INB      29.0040
$VINTAGE, 0
C *****
C                               REATOR SATURAVELCOLUNA
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VXS. |RES
98EX_INBIN_COB      .25078.37540
C CURVA DE SATURACAO
0.042198      0.0493947
0.054539      0.0740921
0.064889      0.0987895
0.074642      0.1234868
0.083599      0.1481842
0.092556      0.1728816
0.093551      0.1778211
0.097930      0.1877000
0.101513      0.1975789
0.108480      0.2222763
0.114451      0.2469737

```

ANEXO I – MODELO DO TRANSFORMADOR DE 15 kVA NO ATP

```

0.121418      0.2716711
0.132166      0.2963684
0.151274      0.3210658
0.184171      0.3457632
0.196657      0.3556421
0.234874      0.3704605
0.250780      0.3754000
0.382167      0.3951579
3.8332        0.4198553
13.8354       0.4445526
230.15886     0.4890145
9999.

C *****
C PERDA NO FERRO DA COLUNA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
EX_INBIN_COB      648.843
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DEVIDO AO FLUXO NO AR ENTRE BOBINA INT. E COLUNA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
IN_COBDELTA2      0.024526
IN_COBDELTA2      4.9053
C *****
C ENTREFERRO COLUNA CENTRAL
C *****
EX_INBIN_COB      230.142976
EX_INBIN_COB      46028.5952
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DE DISPERCAO ENTRE FASES
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
DELTA3AR_TQB      0.16058
DELTA3AR_TQB      32.116
$VINTAGE, 0
C *****
C COLUNA EXTERNAFASE A
C *****
CENROLAMENTO EXTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kv
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
TRANSFORMER TOPATB TOPATA
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA1AR_TQA
2ALTAFAXXXXXY
C *****
CENROLAMENTO INTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kv
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
TRANSFORMER TOPBTB TOPBTA
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 | BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA1EX_INA
2BAIXAANEUTRO
C *****
C REATOR SATURAVELCULTRAS
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VXS. |
98DELTA1DELTA2    .2467 .3754
C CURVA DE SATURACAO
0.052933      0.0521389
0.068413      0.0782083
0.081396      0.1042778
0.093631      0.1303472
0.104866      0.1564167
0.116102      0.1824861
0.117350      0.1877000
0.122843      0.1981278
0.127338      0.2085556
0.136077      0.2346250
0.143567      0.2606944
0.152306      0.2867639
0.165783      0.3128333
0.189758      0.3389028
0.227210      0.3649722
0.246685      0.3754000
0.294625      0.3910417
0.314599      0.3962556
0.479389      0.4171111
2.7623        0.4431806
9.94446       0.4692500

```

```

180.11750      0.5161800
9999.
C *****
C PERDA NO FERRO DA CULATRA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  DELTA1DELTA2      486.6180
$VINTAGE, 0
C *****
C DISPERSAO ENTRE BOBINAS
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  AR_TQAEX_INA      0.14502
  AR_TQAEX_INA      29.004
$VINTAGE, 0
C *****
C REATOR SATURAVEL COLUNA DO TRANSFORMADOR
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VXS. |
98EX_INAIN_COAEX_INBIN_COB      1
C *****
C PERDA NO FERRO DA COLUNA FASE A
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  EX_INAIN_COA      648.843
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DEVIDO AO FLUXO NO AR ENTRE BOBINA INT. E COLUNA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  IN_COADELTA1      0.024526
  IN_COADELTA1      4.9053
C *****
C ENTRE-FERRO COLUNA FASE A
C *****
  EX_INAIN_COA      93.6
  EX_INAIN_COA      18720.0
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DE DISPERCAO ENTRE FASES
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  DELTA2AR_TQA      0.16058
  DELTA2AR_TQA      32.116
$VINTAGE, 0
C *****
C COLUNA EXTERNAFASEC
C *****
CENROLAMENTO EXTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kv
C *****
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
  TRANSFORMER TOPATB      TOPATC
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 |BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA3AR_TQC
2ALTAFCXXXXXY
C *****
CENROLAMENTO INTERNO - TRANSFORMADOR MONOFASICO IDEAL 0.127/0.100 kv
C *****
C SPECIAL REQ|REF| | AMP.|VXS. |BUS O| Rmag|
  TRANSFORMER TOPBTB      TOPBTC
C ***** CARTAO PARA ESPECIFICACAO DE CADA ENROLAMENTO
C BUS1 |BUS2| | RES.|REAT.|Vnom.|
CA6 | A6 | |E6.2 |E6.2 | E6.2|
1DELTA3EX_INC
2BAIXACNEUTRO
C *****
C REATOR SATURAVEL CULATRAS
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VXS. |
98DELTA1DELTA3DELTA1DELTA2      8888.      0.0      1
C *****
C PERDA NO FERRO DA CULATRA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  DELTA1DELTA3      486.618
$VINTAGE, 0
C *****
C DISPERSAO ENTRE BOBINAS
C *****

```

```

$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  AR_TQCEX_INC                                0.14502
  AR_TQCEX_INC                                29.004
$VINTAGE, 0
C *****
C REATOR SATURAVEL COLUNA
C *****
C BUS1 |BUS2 |REF1 |REF2 | AMP.|VXS. |
98EX_INBIN_COCEX_INBIN_COB 1
C *****
C PERDA NO FERRO DA COLUNA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
  EX_INBIN_COCEX_INBIN_COB 648.843
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DEVIDO AO FLUXO NO AR ENTRE BOBINA INT. E COLUNA
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
IN_COCEX_INBIN_COB 0.024526
IN_COCEX_INBIN_COB 4.9053
C *****
C ENTREFERRO COLUNA
C *****
  EX_INBIN_COCEX_INBIN_COB 93.03768
  EX_INBIN_COCEX_INBIN_COB 18607.536
$VINTAGE, 0
C *****
C INDUTANCIA DE DISPERCAO ENTRE FASES
C *****
$VINTAGE, 1
C BUS1 |BUS2 |BUS3 |BUS4 | RESIT (OHM)| INDUT.(OHM/mH)| CAP(UMHO/uF) |
DELTA1AR_TQC 0.16058
DELTA1AR_TQC 32.116
$VINTAGE, 0
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH, 15KVA_SAT_2.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF

```

ANEXO II

INTEGRADOR PARA OBTENÇÃO DAS DENSIDADES DE FLUXOS NO MODELO DO ATP

Durante os estudos realizados no ATP do presente trabalho percebeu-se a necessidade de se verificar os valores das densidades de fluxos magnéticos (B [T]) em colunas, culatras, dispersão e entre enrolamento interno e coluna do núcleo. Pelo fato do *software* acima mencionado trabalhar com grandezas elétricas, ou seja, corrente e tensão, viu-se a necessidade de implementar junto ao modelo do transformador de 15kVA um componente que forneceria os parâmetros supracitados.

Como se sabe a densidade de fluxo magnético possui como uma de suas equações base a representada pela (A.1) na sequência.

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (A.1)$$

Onde o fluxo magnético (ϕ) é dado em [Wb] e “A” a área da seção transversal sob estudo [m^2]. Esta última é facilmente obtida através dos dados geométricos fornecidos pelo fabricante. Enquanto isto, sabe-se que o fluxo magnético é fornecido pela Equação (A.2).

$$\lambda = N \times \phi \quad (A.2)$$

Onde (λ) é o fluxo total concatenado e (N) é o número de espiras do enrolamento.

Após tais considerações, chega-se a conclusão que é necessário a obtenção do fluxo magnético (ϕ), ou do fluxo total concatenado (λ) para a determinação das densidades de fluxos mencionadas anteriormente.

É importante lembrar que cada um dos fluxos magnéticos no modelo do ATP são representados por indutores, ao se inserir um simples circuito formado por uma resistência e capacitância em paralelo com cada uma delas, tem-se na tensão do capacitor o valor do fluxo total concatenado. Ou seja, este circuito, onde a resistência (R) está em série com o capacitor (C), formam um tipo de integrador de tal forma que o fluxo total concatenado pode ser representado pela Equação (A.3);

$$\lambda = \int V dt \quad (A.3)$$

Fazendo a análise neste ramo, tem-se que a queda de tensão na resistência (R) é dada pela Equação (A.4) e a no capacitor (C) é dado pela Expressão (A.5) tem-se:

$$v_R = R \times i \quad (A.4)$$

$$v_C = \frac{1}{C} \times \int i dt \quad (A.5)$$

Impondo um valor bem alto para a resistência, de tal forma que $R \gg \omega \times C$, e pelo fato do capacitor (C) e da resistência (R) estarem em série possuírem a mesma corrente circulando por eles, pode-se desprezar a queda de tensão no capacitor e fazer a aproximação apresentada pela Equação (A.6).

$$V = V_R = R \times i \Rightarrow i = \frac{V}{R} \quad (A.6)$$

Substituindo a Equação A.6, na Expressão A.5, chega-se a Equação A.7, na qual percebe-se que a tensão do capacitor é igual ao fluxo total concatenado, apresentado na Equação A.3, considerando que $R \times C = 1$.

$$v_C = \frac{1}{R \times C} \int V dt \quad (A.7)$$

Se ainda forem adotados para os valores de resistência e capacitância tal que $R = 1/C$ então, $v_C = \int V dt = \lambda$. No integrador utilizado no modelo do ATP tem-se: $R = 10^6 [\Omega]$ e $C = 10^{-6} [F]$.

Desta forma, ao verificar os valores obtidos por A.7 no modelo, estes devem ser divididos pelo número de espiras do enrolamento (N) e pela área da seção transversal (A) sob estudo, para a obtenção do valor da densidade de fluxo magnético.