

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**Projeto de Transformador de Potência Trifásico e
Simulação de Curtos Circuitos**

Marcos Brosso Pioltine

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



Projeto de Formatura – 2011

**Projeto de Transformador de Potência Trifásico e
Simulação de Curtos Circuitos**

ALUNO:

Marcos Brosso Pioltine

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Silvio Nabeta

COORDENADOR:

Prof. Dr. Dorel Soares Ramos

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Silvio Nabeta, que sempre me orientou de forma muito diligente, pelos valiosos conselhos dados ao longo da realização deste trabalho e por sua disposição em me ensinar e corrigir.

Também gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Lourenço Matakas Jr., pela atenção e paciência em me ajudar a realizar as correções necessárias para a finalização desse trabalho.

Ademais, agradeço ao coordenador do projeto, Prof. Dr. Dorel Soares Ramos, pelas orientações relativas ao andamento do trabalho, que me foram essenciais para a complementação desse trabalho com conteúdo relevante e de qualidade.

Gostaria de também prestar os agradecimentos aos meus pais, Paulo César e Maria Inês, minhas irmãs, Mariana e Marina, e todos meus familiares, além de meus amigos e colegas de trabalho que sempre me incentivaram, colaboraram e torceram pelo meu sucesso.

PIOLTINE, Marcos B.
PROJETO DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO E SIMULAÇÃO DE
CURTOS CIRCUITOS
2011.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Nabeta
Coordenador: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos
Relatório Final – Trabalho de Conclusão de Curso
São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1. PROJETO; CURTO CIRCUITO; PROJETO DE TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO E
SIMULAÇÃO DE CURTOS CIRCUITOS.

Sumário

1	Resumo.....	10
2	Introdução	11
3	Objetivos.....	12
4	Atualização bibliográfica.....	12
4.1	Topologia.....	12
4.2	Estudo de Curtos-Circuitos.....	13
5	Projeto	14
5.1	Núcleo	14
5.2	Isolação Principal.....	18
5.3	Enrolamentos	22
5.4	Parte Ativa.....	27
5.5	Perdas.....	28
5.6	Impedância.....	30
6	Curtos-Circuitos	31
6.1	Curto Circuito Trifásico.....	32
6.1.1	Secundário	32
6.1.2	Primário	33
6.2	Curto Circuito Dupla-Fase	34
6.2.1	Secundário	34
6.2.2	Primário	35
6.3	Curto Circuito Fase-Terra	36
6.3.1	Secundário	36
6.3.2	Primário	37
7	Transitórios	39
7.1	Transitórios no curto trifásico.....	41
7.2	Transitórios no curto dupla-fase.....	43
7.3	Transitórios no curto fase-terra	45
7.4	Análise geral dos curtos circuitos.....	46
8	Software ANSYS Maxwell	48
8.1	Equações de Maxwell.....	48
8.1.1	Lei de Gauss	49
8.1.2	Lei de Gauss para o magnetismo	49

8.1.3	Lei de Faraday	49
8.1.4	Lei de Ampère com a correção de Maxwell.....	50
8.2	Método dos Elementos Finitos (MEF).....	50
8.3	Funcionamento	52
9	Simulações	55
9.1	Introdução.....	55
9.2	Simulação Operação Nominal.....	56
9.3	Simulação Curto Circuito Fase-Terra.....	64
9.4	Simulação Curto Circuito Dupla Fase	68
9.5	Simulação Curto Circuito Trifásico	71
10	Dimensionamento da Isolação	77
10.1	Capacidade Elétrica de isolamento	80
10.2	Capacidade Mecânica de isolamento	84
10.3	Resultados.....	92
11	Conclusão	94
12	Propostas para continuação dos estudos.....	96
13	Referências bibliográficas.....	97
14	Anexos	99
14.1	Anexo A – Dados Elétricos.....	99
14.2	Anexo B – Placa de Identificação	99
14.3	Anexo C – Ensaios Dielétricos	99
14.4	Anexo D – Tanque	99
14.5	Anexo E – Núcleo	99
14.6	Anexo F – Parte Ativa	99
14.7	Anexo G – Enrolamentos.....	99
14.8	Anexo H – Esquema de ligação	99
14.9	Anexo I – Dados e Formas de Ondas da Operação Nominal da Simulação	99
14.10	Anexo J – Simulação do Curto Circuito Fase Terra	99
14.11	Anexo K – Simulação do Curto Circuito Dupla Fase.....	99
14.12	Anexo L – Simulação do Curto Circuito Trifásico	99

Índice de Figuras

Figura 1 - Representação de um núcleo trifásico de três pernas	14
Figura 2 - Seção transversal do Núcleo	15
Figura 3 - Núcleo laminado.....	15
Figure 4 - Tensões de Projeto na janela do transformador.....	20
Figura 5 - Distâncias elétricas mínimas.....	20
Figure 6 - Distâncias elétricas da isolação principal de projeto	21
Figura 7 - Espessura das isolações na parte ativa.....	21
Figura 8 - Condutor AT: (2,4) x 8,6 x 2,6	25
Figura 9 - Disco do enrolamento AT	25
Figura 10 - Condutor BT: (1) x 2,31 x 20//2,24	26
Figura 11 - Perdas locais no núcleo (vista em corte)	28
Figura 12 - Curto circuito trifásico no secundário (componentes simétricas)	32
Figura 13 - Curto circuito trifásico no primário (componentes simétricas)	33
Figura 14 - Curto circuito dupla fase no secundário (componentes simétricas).....	34
Figura 15 - Curto circuito dupla-fase no primário (componentes simétricas)	35
Figura 16 - Curto circuito fase-terra no secundário (componentes simétricas).....	37
Figura 17 - Curto circuito fase-terra no primário (componentes simétricas)	38
Figura 18 - Circuito R-L série utilizado no estudo do transitório do transformador	39
Figura 19 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=0^\circ$)	41
Figura 20 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=30^\circ$)	42
Figure 21 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=45^\circ$)	42
Figura 22 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=60^\circ$)	42
Figura 23 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=90^\circ$)	43
Figura 24 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=0^\circ$).....	43
Figura 25 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=30^\circ$).....	44
Figura 26 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=45^\circ$).....	44
Figura 27 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=60^\circ$).....	44
Figura 28 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=90^\circ$).....	45
Figura 29 - de onda da corrente de curto fase terra no secundário ($\alpha=0^\circ$)	45
Figura 30 - Forma de onda da corrente de curto fase terra no primário ($\alpha=90^\circ$).....	46
Figura 31 - Potência de curto circuito em regime permanente para cada falta	46
Figura 32 - Potência instantânea máxima de curto circuito no transitório para cada falta.....	47
Figura 33 - Armazenamento de valore calculados no elemento finito 3D.....	51
Figura 34 - Organograma de funcionamento do software Maxwell	53
Figura 35 - Processo de cálculo da malha.....	54
Figura 36 - Transformador trifásico 3D projetado no software Maxwell.....	56
Figura 37 - Detalhe da fase C da bobina de Alta Tensão	57
Figura 38 - Detalhe da fase C da bobina de Baixa Tensão.....	58
Figura 39 - Vista Frontal do detalhamento da parte ativa do transformador.....	58
Figure 40 - Malha do protótipo do Transformador	59
Figura 41 - Distribuição de Campo Magnético durante Operação Nominal	61
Figura 42 - Sentido das correntes de excitação na operação nominal.....	62

Figura 43 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante operação nominal	63
Figura 44 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante operação nominal	63
Figure 45 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Fase Terra (Vista Superior).....	65
Figura 46 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Fase Terra (Vista Frontal)	66
Figura 47 - Sentido das correntes de excitação no curto fase terra.....	66
Figura 48 - Solicitações mecânicas no enrolamento AT durante curto fase terra	67
Figura 49 - Solicitações mecânicas no enrolamento BT durante curto fase terra	67
Figura 50 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Dupla Fase	69
Figura 51 - Sentido das correntes de excitação no curto dupla fase.....	69
Figura 52 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos durante curto dupla fase	70
Figure 53 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Trifásico (vista superior).....	72
Figure 54 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Trifásico (vista frontal)	73
Figura 55 - Sentido das correntes de excitação no curto trifásico (vista superior)	73
Figura 56 - Sentido das correntes de excitação no curto trifásico (vista frontal)	74
Figura 57 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante curto trifásico (vista superior)...	74
Figura 58 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante curto trifásico (vista frontal)	75
Figura 59 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante curto trifásico (vista superior)...	75
Figura 60 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante curto trifásico (vista frontal).....	76
Figura 61 - Condutor de cobre e isolação de papel.....	78
Figura 62 - Isolação da bobina	79
Figura 63 - Curva Típica Tensão versus Tempo para coordenação da proteção.....	82
Figura 64 - Valores mínimos de impedância	82
Figura 65 - Máxima potência de curto circuito admissível	83
Figura 66 - Regra da mão direita	84
Figura 67 - Bobina sucumbindo ante as forças radiais	87
Figura 68 - Tilt nos condutores	88
Figura 69 - Forças e momentos na seção transversal do condutor.....	88
Figura 70 - Distribuição de forças em segmentos de condutores	89
Figura 71 - Diagrama Ampère-Espira	90
Figura 72 - Suportabilidade do cobre	92
Figura 73 - Força nos enrolamentos	92
Figura 74 - Propriedades mecânicas de materiais isolantes	93

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Espessura dos pacotes do núcleo	16
Tabela 2 - Largura teórica dos pacotes do núcleo.....	17
Tabela 3 - Largura real dos pacotes do núcleo	17
Tabela 4 - Tensões de nível de isolamento.....	18
Tabela 5 - Tensões e Correntes na Linha.....	22
Tabela 6 - Resumo de dados dos enrolamentos	26
Tabela 7 - Massas principais da parte ativa.....	27
Tabela 8 - Perdas Joule	29
Tabela 9 - Valores de base.....	31
Tabela 10 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto trifásico no secundário	33
Tabela 11 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto trifásico no primário	34
Tabela 12 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto dupla-fase no secundário	35
Tabela 13 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto dupla-fase no primário	36
Tabela 14 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto fase-terra no secundário.....	37
Tabela 15 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto fase-terra no primário	38
Tabela 16 - Potência de curto circuito em regime permanente para os três tipos de falta	47
Tabela 17- Potência de curto circuito máxima durante o transitório para os três tipos de falta	47
Tabela 18 - Equações de Maxwell na forma integral	48
Tabela 19 - Dados simulados de operação nominal do transformador	60
Tabela 20 - Esforço mecânico no enrolamento durante operação nominal em regime	64
Tabela 21 - Corrente de curto fase terra do transformador	64
Tabela 22 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto fase terra.....	68
Tabela 23 - Corrente de curto dupla fase do transformador	68
Tabela 24 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto dupla fase.....	70
Tabela 25 - Corrente de curto trifásico do transformador.....	71
Tabela 26 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto trifásico	76
Tabela 27 - Propriedades de papeis isolantes	78
Tabela 28 - Propriedades de polímeros de alta densidade isolantes.....	79
Tabela 29 - Propriedades de óleos isolantes	80
Tabela 30 - Propriedades físicas do cobre para fabricação	87
Tabela 31 - Dimensionamento da isolação.....	93

1 Resumo

A proposta deste trabalho é projetar e simular um transformador de potência de dois enrolamentos na situação de curto circuito. Para tanto, foram avaliados os métodos disponíveis na literatura para o cálculo elétrico e dimensionamento da isolamento, com o intuito de atender a norma ABNT para projeto e proteção de transformadores de potência. Com auxílio do software Maxwell, que funciona pelo método dos elementos finitos, foram levantadas as curvas características dos parâmetros do transformador, e com isso foi possível analisar os resultados simulados do projeto do transformador e, consequentemente dimensionar a isolamento do transformador.

Palavras-chave: Transformador de Potência. Projeto. Simulação. Curtos Circuitos. Dimensionamento. Isolação.

2 Introdução

Os transformadores de potência desempenham atualmente um papel importante em várias áreas de aplicação devido às suas características magnéticas particulares. Trata-se de um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday e Lei de Lenz. A principal dessas características é a de realizar a regulação de tensão entre dois sistemas de maneira isolada galvanicamente. Além dessa característica, outra característica importante do transformador é o fato dele ser um dispositivo utilizado para transmitir energia elétrica ou potência elétrica entre dois circuitos. Por isso, o transformador de potência é um equipamento utilizado ao redor do mundo inteiro, pois ele permite que a fonte de geração de energia não esteja necessariamente próxima à carga, viabilizando assim o crescimento dos centros de consumos e alimentação de centros de consumos distantes.

As propriedades e utilizações únicas dos transformadores de potência determinam uma importância única a esse dispositivo, pois ele é quem garante que a energia elétrica chega aos consumidores. Como hoje em dia a energia elétrica é um bem essencial no dia a dia da humanidade, o bom funcionamento do transformador deve ser estudado, assim como tudo o que pode possa levar ao seu mau funcionamento. As consequências do mau funcionamento de um transformador de potência podem ser devastadoras, pois se trata de um equipamento com risco de explosão devido ao uso de óleo mineral em sua composição, além de utilizar muitos metais pesados e celulose e causar enormes impactos ambientais.

O principal evento que pode danificar um transformador são os curtos circuitos. O curto circuito é um evento ocasionado por uma falha que pode ser simétrica ou assimétrica, causando sobrecorrentes e sobretensões nos enrolamentos, saturação do núcleo e solicitando esforços mecânicos no transformador. Ademais, todas as consequências de um curto circuito no transformador devem ser prevista e estudadas para a proteção desse equipamento tão importante no nosso dia a dia.

3 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo principal o estudo de faltas simétricas e assimétricas em um transformador de potência projetado, através de simulações transitórias pelo método dos elementos finitos e comparação dos resultados com valores extraídos de equações analíticas. Essas simulações permitem obter não apenas a dinâmica da corrente de falta, mas também os esforços internos ao transformador e os níveis de indução no núcleo do transformador de potência.

Os objetivos principais desse projeto podem ser separados nas seguintes etapas:

- Definição da topologia do transformador de potência no qual serão estudados os tipos de curto circuito mais comuns;
- Desenvolvimento dos cálculos relativos ao projeto;
- Detalhamento dos parâmetros do transformador projetado para simulação;
- Familiarização com o software que irá simular os curtos-circuitos no transformador;
- Simulação e análise de resultados para averiguar se os resultados obtidos estão condizentes com a teoria.

4 Atualização bibliográfica

4.1 Topologia

As normas técnicas descrevem a topologia para o projeto e o bom funcionamento dos transformadores de potência. No Brasil, o órgão responsável pela normalização é a ABNT, de modo que as normas NBR 5356-1/2007^[1], NBR 5356-3/2007^[2], NBR 5380-1/1993^[3] foram utilizadas como referência no projeto do transformador apresentado nesse trabalho, de modo que o transformador de potência estudado esteja dentro das normas e especificações da legislação brasileira.

A partir da leitura das normas e dos conceitos dos transformadores, foi iniciado o projeto do transformador de potência nas seguintes etapas de projeto: núcleo, isolamento, enrolamentos e parte ativa. Todos os conceitos referentes ao projeto do transformador foram obtidos através Harlow, J., "Electric Power Transformer Engineering"^[3], e Jordão, R., "Transformadores"^[4].

4.2 Estudo de Curtos-Circuitos

A análise de curtos-circuitos utiliza ferramentas matemáticas, tais como as componentes simétricas, para calcular as correntes e tensões em todos os pontos do circuito após o evento. É importante salientar que os engenheiros classificam um curto-circuito como sendo uma região num circuito elétrico na qual a d.d.p (diferença de potencial) é nula. Existem diversos tipos de curtos-circuitos, porém esse trabalho tem objetivo estudar os curtos circuitos mais comuns em transformadores trifásicos, de acordo com a empresa fabricante e reparadora de transformadores de potência ABB, portanto serão estudados os curtos circuitos dupla-fase e fase-terra, e para comparação, será estudado o curto trifásico, que teoricamente é o tipo de curto circuito mais potente de todos os curtos.

O objetivo principal desse estudo é dimensionar e ajustar adequadamente os equipamentos de proteção do transformador de potência.

Os conceitos matemáticos relacionados a curto circuitos em transformadores de potência e componentes simétricas foram obtidos através de Blackburn, J. Lewis. "Symmetrical Components For Power Systems Engineering"^[5], Grainger, J., Jr., William Stevenson "Power System Analysis"^[6] e Kagan, N., de Oliveira, C. C. B., Robba, E. J., "Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica"^[7].

5 Projeto

O estudo de curtos circuitos em transformadores trifásicos requer um objeto/protótipo de estudo. O transformador estudado será um transformador trifásico, 15MVA, 138kV / 13,8kV, 60Hz, com grupo de ligação Ynd1, sendo que a norma técnica regulamentadora utilizada foi a ABNT.

O projeto do transformador trifásico pode ser separado em cinco partes correlacionadas: núcleo, isolamento principal, enrolamentos, parte ativa e impedância.

5.1 Núcleo

O núcleo de um transformador de potência trifásico pode ser de duas maneiras, ou é um núcleo com três pernas principais, ou ele é um núcleo com três pernas principais e duas pernas de retorno (totalizando cinco pernas). No projeto do transformador de potência desse trabalho, será produzido um núcleo de três pernas principais.

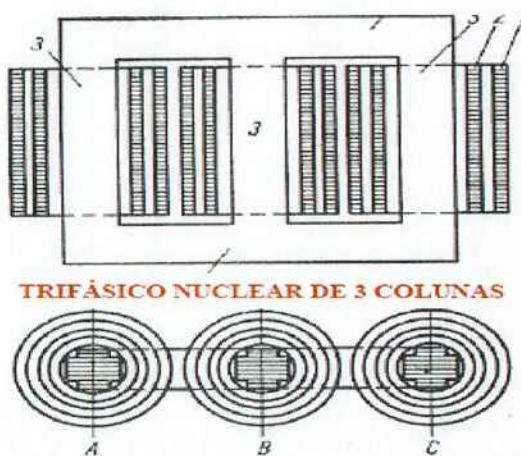


Figura 1 - Representação de um núcleo trifásico de três pernas

Para se realizar o projeto do núcleo de um transformador de potência trifásico, deve-se atentar para que o núcleo não seja um meio de perdas constantes elevadas, ou seja, o projeto deve ser feito de modo que as perdas no ferro desse transformador sejam mínimas. Dessa forma, o material utilizado para a montagem do núcleo considerado

nesse projeto foi aço silício de grão orientado regular (FeSi RGO), com chapas laminadas à frio, tipo M4, de espessura 0,27mm e sua montagem deve ser feita em "pacotes", para que seja formado um núcleo com formato circular (vide figura 02 e 03).

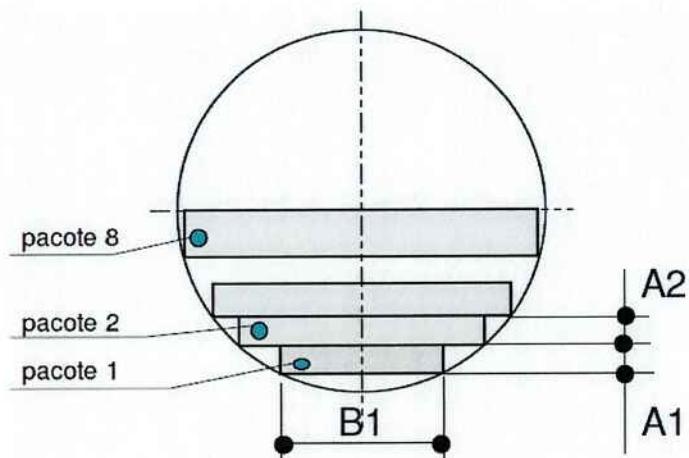


Figura 2 - Seção transversal do Núcleo

A laminação do núcleo é uma metodologia essencial para se evitar perdas constantes do transformador. O aquecimento do núcleo pode danificar as isolações da parte ativa do transformador, de modo que tal fato pode comprometer a vida útil do transformador.



Figura 3 - Núcleo laminado

Com essa metodologia definida, agora precisamos definir o diâmetro do núcleo que será projetado, de forma que toda a energia seja transmitida.

Há diversas fórmulas de se calcular o diâmetro do núcleo de transformador de potência trifásico, a fórmula utilizada será uma fórmula empírica para o cálculo do diâmetro, dessa forma o diâmetro do núcleo será calculado pela seguinte fórmula:

$$D_n = 40 \sqrt{\frac{S_n}{10^5}} \text{ [mm]} \quad (1)$$

A partir dessa fórmula empírica, obtemos que o diâmetro nominal do núcleo do transformador será $D_N = 470$ mm.

Com esse dado, vamos projetar um transformador com dezesseis pacotes de núcleo, sem nenhum canal de resfriamento de óleo entre eles. A quantidade de pacotes do núcleo fica a critério do projetista. O objetivo de montar o núcleo em pacotes é produzir um núcleo com formato cilíndrico, sem que haja várias larguras de chapas diferentes, pois o corte de chapas de aço silício é um processo trabalhoso, e para acelerar a produção, deve-se acelerar a produção realizando o corte do maior número de chapas idênticas possível.

Inicialmente, foi definido que para se obtiver um diâmetro próximo de 470 mm, as espessuras de pacotes do núcleo são apresentadas na figura 4.

Pacote	A_i, espessura [mm]
1	10.5
2	17.0
3	21.1
4	24.0
5	33.2
6	28.4
7	46.4
8	46.1

Tabela 1 - Espessura dos pacotes do núcleo

Note que como o núcleo é simétrico, só é apresentada metade dos pacotes.

A partir das espessuras do núcleo definidas, vamos realizar o cálculo inicial das larguras dos pacotes do núcleo, pelo teorema de Pitágoras, uma vez que é conhecido o diâmetro do núcleo a espessura de cada pacote. O comprimento dos pacotes é apresentado na figura 5.

Pacote	A _i , espessura [mm]	Número de chapas	B _i , largura [mm]
1	10,5	39	123,8081
2	17,0	63	184,2016
3	21,1	79	249,3540
4	24,0	89	306,6293
5	33,2	123	354,8419
6	28,4	106	403,0295
7	46,4	172	432,0590
8	46,1	171	460,8678

Tabela 2 - Largura teórica dos pacotes do núcleo

Os valores obtidos na figura 5 estão teoricamente corretos, porém na prática, as chapas de aço silício são cortadas aos pares, portanto é necessário ter um número par de chapas por pacote de núcleo. Dessa forma, realizando-se uma nova interação, para as chapas com 0,27mm de espessura, temos os seguintes valores:

Pacote	A _i , espessura [mm]	Número de chapas	B _i , largura [mm]
1	10,8	40	123,8081
2	17,3	64	184,2016
3	21,6	80	249,3540
4	24,3	90	306,6293
5	33,5	124	354,8419
6	28,6	106	403,0295
7	46,4	172	432,0590
8	46,4	172	460,8678

Tabela 3 - Largura real dos pacotes do núcleo

Dessa forma, obtemos um novo valor do diâmetro do núcleo, de valor $D_N = 470,1338$ mm.

Com esse dimensionamento das chapas, temos que a área da seção transversal do núcleo será:

$$A_{SEÇÃO\ TRANSVERSAL} = 164.479,2 \text{ mm}^2$$

Devido ao fato do fluxo magnético que percorre o núcleo não utilizar 100% da área transversal efetiva do núcleo, supondo que ele utilize 99%, tem-se uma área efetiva do núcleo de:

$$A_{SEÇÃO\ EFETIVA} = 162.834,41 \text{ mm}^2$$

A área da seção efetiva do núcleo efetiva do núcleo será utilizada para calcular a tensão induzida nas bobinas do transformador.

Com o projeto do núcleo finalizado, já é conhecido o diâmetro das três pernas do núcleo e dos jugos superior e inferior. As distâncias entre as pernas do núcleo e sua altura são definidas a partir das dimensões do enrolamento.

5.2 Isolação Principal

A isolação principal do transformador se refere à composição de material isolante, com o objetivo de aumentar a isolação dielétrica entre enrolamento-enrolamento e entre enrolamento-núcleo.

O dimensionamento da isolação principal do transformador de potência é feito com base em uma simplificação da metodologia especificada na norma técnica ABNT 5356-3 (2007), de modo que para o transformador de potência de estudo, foi realizado o estudo da isolação considerando os ensaios de tensão suportável à frequência industrial e ensaio de tensão de impulso atmosférico. De acordo com a norma, deveria ser considerado para um dimensionamento mais preciso os ensaios de tensão induzida de curta e longa duração.

As tensões de nível de isolamento dos enrolamentos BT (13,8 kV) e AT (138 kV) são apresentadas na figura abaixo:

Enrolamento	Tensão Ensaio Frequência Industrial	Tensão Impulso Atmosférico
AT	275 kV	650 kV
BT	34,5 kV	110 kV
Neutro AT	34,5 kV	110 kV

Tabela 4 - Tensões de nível de isolamento

Para o fator de conversão dos ensaios, temos os seguintes valores:

Para tensão de ensaio à frequência industrial: $K = 1,0$

Para impulso atmosférico: $K = 2,85$

A tensão obtida é o valor da tensão calculado em projeto para dimensionar a distância da isolação principal. A relação da tensão de projeto com a tensão de ensaio é apresentada na fórmula abaixo:

$$K = \frac{U_{ensaio}}{U_{projeto}} \quad (2)$$

Segundo estudos sobre transformadores de potência, um valor válido de campo elétrico admissível para as distâncias internas desse transformador são:

- Enrolamentos-Jugos: $E_{MAX} = 2,43 \text{ kV/mm}$
- Núcleo-Enrolamento e enrolamento-enrolamento: $E_{MAX} = 6,90 \text{ kV/mm}$

Para simplificar o projeto desse transformador, não serão considerados os valores de campo magnético admissíveis, de modo que a distância da isolação será considerada unicamente pelo campo elétrico admissível e alguns fatores de segurança que serão especificados durante o projeto. Ademais, será considerado que 1/10 da distância de isolação será preenchido com isolação de celulose.

A realização dos ensaios é feita da seguinte forma, executa-se os ensaios especificados, aplicando as tensões de ensaios especificadas pela ABNT. Aplica-se a tensão de ensaio no esquema de ligação do ensaio e então, se obtém as tensões entre enrolamentos e entre enrolamento-núcleo. A tensão de ensaio é convertida para tensão de projeto, através dos coeficientes apresentados anteriormente e a utilização da fórmula (2). Os maiores valores de tensão de ensaio entre enrolamentos e entre enrolamento-núcleo serão os valores utilizados no projeto. Os esquemas de ensaio teórico são apresentados no anexo.

Os resultados dos ensaios dielétricos do transformador são apresentados a seguir:

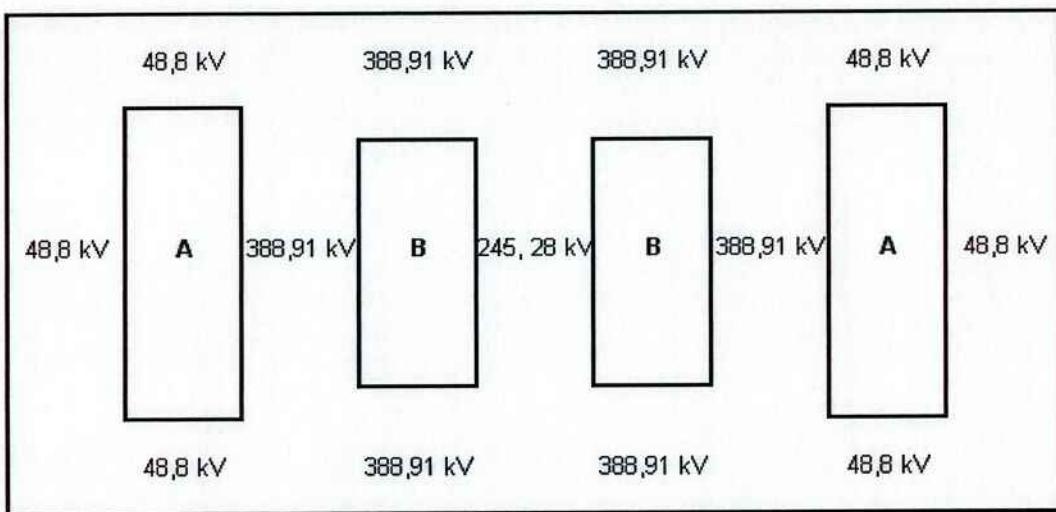


Figure 4 - Tensões de Projeto na janela do transformador

Com os valores de tensão de projeto obtidos, devem-se calcular as distâncias elétricas do transformador de potência trifásico. Respeitando o limite de campo elétrico máximo entre núcleo-enrolamento e entre enrolamentos estabelecidos anteriormente, temos as seguintes distâncias elétricas:

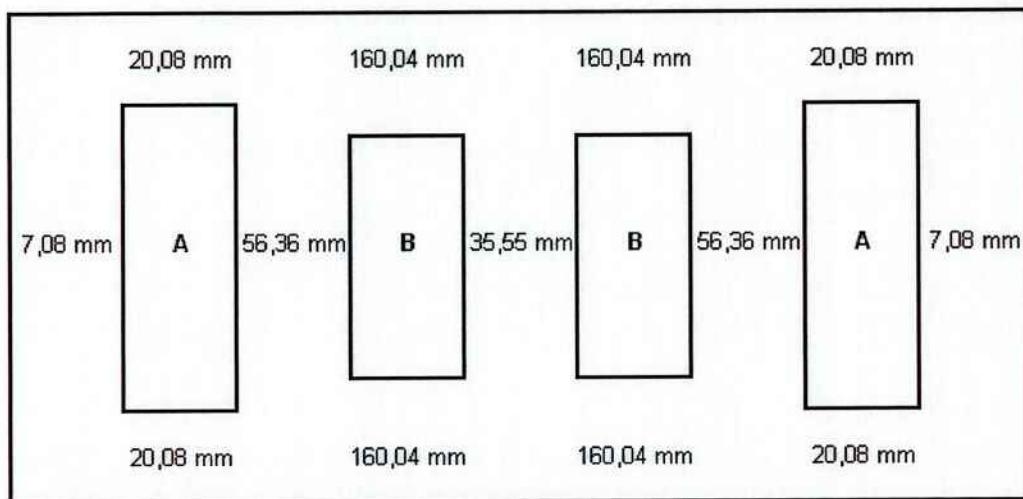


Figura 5 - Distâncias elétricas mínimas

Os valores obtidos, apesar de estarem de acordo com os limites especificados, serão adaptados por questões de projeto, para que possa haver uma folga de projeto, deixando o projeto condizente com o projeto de um transformador real. A distância entre o núcleo e a baixa tensão (enrolamento A) por razões de segurança e praticidade, vamos considerar uma distância mínima admissível é 17 mm. Dessa forma, temos as seguintes distâncias de projeto da isolação principal:

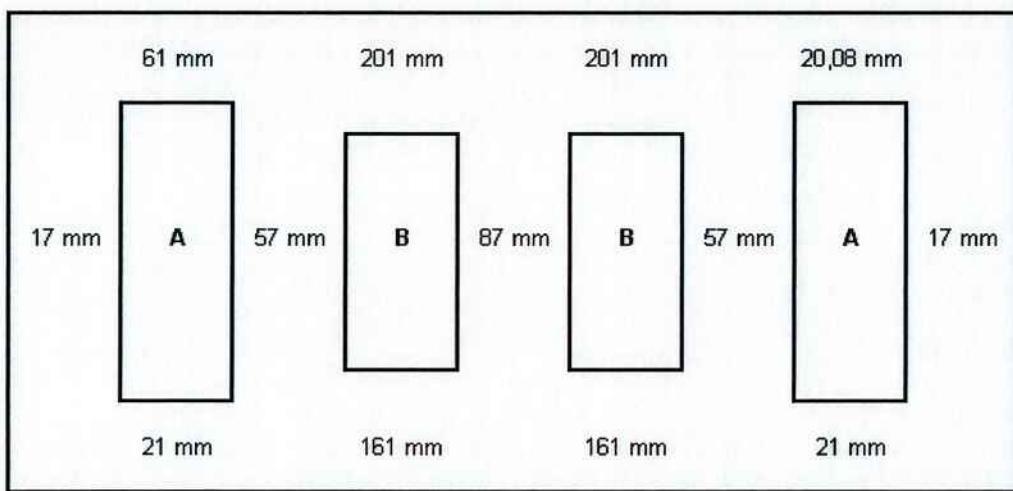


Figure 6 - Distâncias elétricas da isolação principal de projeto

As distâncias elétricas da isolação da celulose são apresentadas abaixo, sendo que para o dimensionamento da celulose foi considerado um décimo da distância de isolação de projeto.

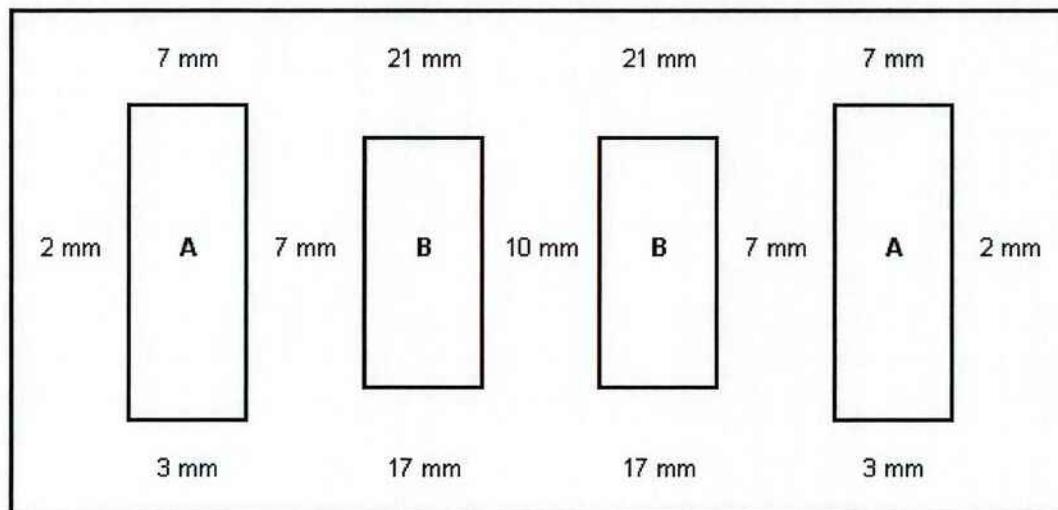


Figura 7 - Espessura das isolações na parte ativa

Os detalhes de projeto e espaçamento da configuração das distâncias elétricas de isolação do transformador de potência são apresentados nos desenhos de fabricação da parte ativa, no anexo desse trabalho.

5.3 Enrolamentos

O dimensionamento dos enrolamentos tem como objetivo projetar um conjunto de bobinas de modo a atender os níveis de tensão especificados e atender os padrões da norma ABNT.

O projeto de enrolamentos pode ser muito diversificado, uma vez que existem diversos tipos de bobinas diferentes (por exemplo: camada, hélice, loop-layer, camada-hélice (mista), disco contínuo, disco entrelaçado, etc.). Para o projeto dos enrolamentos do transformador de potência em estudo foi considerado que o transformador terá só dois enrolamentos (AT e BT), de modo que não se fez necessário o uso de bobinas de regulação ou terciário. Os condutores das bobinas foram projetados para ser de cobre ($\rho_{Cu} = 8900 \times 10^{-9}$ kg/mm³) e o papel isolante dos condutores é um composto de celulose ($\rho_{PAPEL} = 750 \times 10^{-9}$ kg/mm³), informações segundo a fabricante de materiais isolantes e condutores.

O efeito pelicular é um fenômeno que acontece em condutores metálicos que conduzem corrente alternadas. O efeito pelicular nos mostra que a condução dos elétrons ocorre de modo que os elétrons se concentram nas extremidades do condutor, tornando a área efetiva do condutor menor e consequentemente, aumentando a resistência do condutor. No projeto desse transformador não foi considerado os efeitos causados pelo efeito pelicular, para simplificação do estudo.

O projeto de uma bobina se inicia com o cálculo das correntes que circulam pelas fases a partir da potência e tensões já definidas:

$$S = 3VI \quad (3)$$

Com base nos cálculos das correntes, obtemos:

AT (Yn)		BT (D)	
TENSÃO [kV]	CORRENTE [A]	TENSÃO [kV]	CORRENTE [A]
138	62,76	13,8	627,56

Tabela 5 - Tensões e Correntes na Linha

A partir dos valores calculados das tensões e correntes na linha do transformador de potência, o próximo passo é a definição do número de espiras do enrolamento do

transformador. Para tal, vamos considerar uma indução magnética no núcleo de 1,7 T. Para o cálculo do número de espiras, será utilizada a Lei de Faraday:

$$E = \sqrt{2\pi f N \Phi} \quad (4)$$

Considerando a indução magnética de 1,7 T e a área efetiva de indução do núcleo do transformador de 162.834,41 mm², obtemos a seguinte relação de Volts por espira:

$$E/N = 73,77 \text{ V/espira}$$

Dessa forma, com os valores das tensões de fase do transformador, a partir da relação volt/espira podemos obter o número de espiras para o enrolamento de AT e BT.

Para o enrolamento AT, temos uma ligação estrela aterrada e 138 kV de tensão de linha. Portanto, para se obter 138 kV na linha, serão necessários 79,67 kV na fase, devido à ligação estrela. Aplicando a relação volt/espira para o enrolamento AT, teremos:

$$N_1 = (79,67 \text{ kV})/(73,77 \text{ V/espira}) \rightarrow N_1 = 1080 \text{ espiras}$$

Para o enrolamento BT, temos uma ligação triângulo e 13,8 kV de tensão de linha. Portanto, para se obter 13,8 kV na linha, serão necessários 13,8 kV na fase, devido à ligação delta. Aplicando a relação volt/espira para o enrolamento BT, teremos:

$$N_2 = (13,8 \text{ kV})/(73,77 \text{ V/espira}) \rightarrow N_2 = 188 \text{ espiras}$$

Note que o enrolamento com ligação em estrela necessita de uma menor tensão induzida, em relação ao seu valor de linha, portanto dessa forma há uma economia do número de espiras do transformador e consequentemente, uma redução do custo da bobina.

Pelo número de espiras definidos, o enrolamento BT será projetado como um conjunto de bobinas tipo hélice simples. Por outro lado, o enrolamento AT será projetado na forma de um conjunto de bobinas tipo disco contínuo. A definição do tipo de bobina fica a critério do projetista, no entanto há algumas restrições de alguns tipos de bobinas para algumas classes de tensões, contudo segundo o fabricante ABB, para

essa classe de tensões, esses tipos de bobinas estão de acordo com os critérios de níveis de tensão.

O dimensionamento dos condutores é feito da seguinte maneira. Para cada enrolamento é definido uma altura total do enrolamento, o número de espiras (já definido anteriormente), a densidade de corrente e as isolações (alturas dos calços e espessura do papel do condutor). A altura da bobina é definida de maneira interativa, para que se obtenha a impedância desejada do transformador ou pelo menos a impedância mínima especificada pela norma técnica que rege as diretrizes do projeto. Tanto os valores de densidade de corrente utilizados, quanto as espessuras de papel do condutor e os calços entre discos foram fornecidos pelo fabricante de transformadores ABB.

No dimensionamento dos condutores AT, para uma densidade de corrente de $J_{AT} = 2,81 \text{ A/mm}^2$ e uma corrente circulando na fase de 62,76 A, necessitamos de um condutor com área de $22,36 \text{ mm}^2$, dessa forma, podemos utilizar um condutor as dimensões 2,6 mm de espessura (radial) com 8,6 mm de altura (axial), com 1,2 mm de isolamento unilateral, temos. Fixando a altura da bobina em 940 mm e a altura de calço da bobina em 3 mm, tem-se o seguinte número de discos:

$$H_{ENROLAMENTO} = (h_{AXIAL} + \text{isolamento}) \times N_{DISCOS} + h_{CALÇOS} (N_{DISCOS} - 1) \quad (5)$$

Dessa forma, temos:

$$940 = (8,6 + 2,4) \times N_{DISCOS} + 3 \times (N_{DISCOS} - 1)$$

Portanto teremos 68 discos, com 16 espiras/disco. Dessa forma o condutor fica dimensionado da seguinte forma:

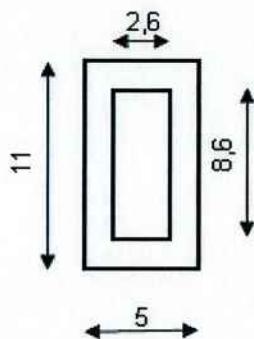


Figura 8 - Condutor AT: (2,4) x 8,6 x 2,6

Para completarmos o número de espiras em todos os discos, vamos preencher a bobina com 1088 espiras. Dessa forma haverá um pequeno acréscimo na tensão induzida nos enrolamentos de alta tensão.

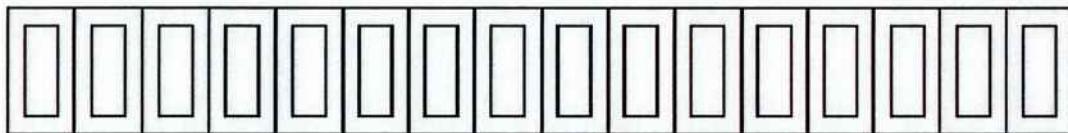


Figura 9 - Disco do enrolamento AT

No dimensionamento dos condutores BT, para uma densidade de corrente de $J_{BT} = 3,5 \text{ A/mm}^2$ com 0,5 mm de isolamento unilateral, temos. Fixando a altura da bobina em 1000 mm e a altura de calço da bobina em 2 mm e conhecido o número de espiras tem-se a seguinte altura de condutor:

$$H_{ENROLAMENTO} = (h_{AXIAL} + \text{isolação}) \times N_{ESPIRAS} + h_{CALÇOS} (N_{ESPIRAS} - 1) \quad (6)$$

Dessa forma, temos:

$$1000 = (h_{AXIAL} + 1) \times 188 + 2 \times (188 - 1)$$

Portanto teremos uma altura do condutor de 2,31 mm. Com uma corrente circulante na fase de 362,32 A, necessitamos de um condutor de área 103,52 mm². Dessa forma o condutor fica dimensionado com (1) x 2,31 x 44,81, contudo, para não se utilizar um, condutor com cota radial de 44,81 mm, vamos decompô-lo em vários condutores em paralelo, de modo que seja obtida a mesma cota radial. Assim, serão utilizados 20 condutores em paralelo no sentido radial, com cota radial de 2,24 mm cada um. Portanto o condutor BT é dimensionado da seguinte forma:

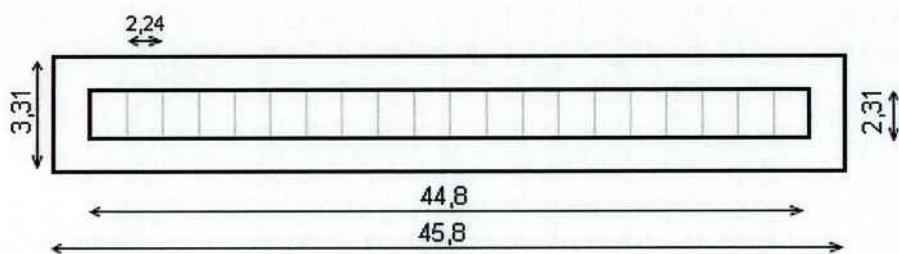


Figura 10 - Condutor BT: (1) x 2,31 x 20/2,24

Com base nos parâmetros dimensionados, é apresentado na tabela abaixo o resumo dos dados dimensionados dos enrolamentos:

	Baixa Tensão	Alta Tensão
Enrolamento	A	B
Espiras	188	1088
Tipo	Hélice	Disco Contínuo
Isolação [mm]	1 (0,5 + 0,5)	2,4 (1,2 + 1,2)
Axial [mm]	2,31	8,6
Radial [mm]	2,24	2,6
Área feixe [mm ²]	5,17	-
Área cobre [mm ²]	103,49	22,36
Área Isolação [mm ²]	48,11	32,64
Área Total [mm ²]	151,60	55
Diâmetro Interno [mm]	495	700,60
Diâmetro Médio [mm]	540,80	780,60
Diâmetro Externo [mm]	586,60	860,60

Tabela 6 - Resumo de dados dos enrolamentos

O projeto dos enrolamentos fornece dados importantes para o dimensionamento da parte ativa e do núcleo. O conjunto de todas as informações sobre os enrolamentos pode ser obtido nos documentos e desenhos apresentados nos anexos.

5.4 Parte Ativa

A parte ativa do transformador é constituída do conjunto núcleo e bobina, juntamente com as isolações e anteparos do conjunto, como viga grampo, anéis de pressão, tiras isolantes, quadro de ligações (lides), tirantes, entre outros.

A partir do cálculo dos enrolamentos e das distâncias de isolamento obtidas através dos ensaios e impulso atmosférico e tensão suportável à frequência industrial, obtemos as distâncias totais da parte ativa do transformador projetado.

Com a altura das bobinas definidas, juntamente com as distâncias elétricas, temos que o núcleo do transformador terá uma janela de 1302 mm de altura e o núcleo terá uma altura total de 2224 mm.

O comprimento da parte ativa, isto é, a distância entre o ponto extremo do enrolamento de alta tensão da primeira perna e a última perna do transformador é de 2755,80 mm de modo que o comprimento do núcleo dimensionado foi de 2356,20 mm. A visualização do projeto da parte ativa pode ser visto nos desenhos referentes à parte ativa em anexo.

Com o dimensionamento de todas as distâncias, comprimentos e áreas da parte ativa do transformador, estimam-se as massas de cada um desses componentes.

A tabela abaixo mostra o volume e a massa totais de aço silício, cobre e papel utilizado no transformador.

	Aço Silício ($\rho_{FeSi} = 7,65 \text{ g/cm}^3$)	Cobre ($\rho_{Cu} = 8900 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$)	Papel ($\rho_{Papel} = 750 \times 10^{-9} \text{ kg/mm}^3$)
Volume [mm ³]	$1,42 \times 10^9$	$88,5 \times 10^6$	$97,8 \times 10^6$
Massa [kg]	10845	784,26	72,92

Tabela 7 - Massas principais da parte ativa

Há outros componentes importantes da parte ativa que são dimensionados detalhadamente somente em projeto de fabricação. Esses componentes são a viga

grampo, anéis de pressão (feito de presspahn), suporte dos quadros de ligações e cilindros de presspahn. No geral, podemos estimar que seja utilizado aproximadamente 1100 kg de viga grampo para prensagem do núcleo e suporte das bobinas, e 157 kg de presspahn para o quadro de ligações, isolação entre as bobinas e para calçamento e prensagem das bobinas.

5.5 Perdas

Os transformadores de potência possuem perdas constantes e perdas variáveis. As perdas constantes do transformador são as perdas que dependem unicamente a energização do transformador, isto é, dependem apenas da tensão induzida no transformador. Essas perdas são as perdas no ferro (núcleo) e perdas dielétricas. O transformador possui também as perdas variáveis, que são decorrentes da perda joule nas bobinas e as perdas adicionais, causadas pela dispersão de fluxo. Para efeito de simplificação as perdas dielétricas serão desprezadas.

Para o cálculo das perdas no núcleo, foram fornecidos pela ABB alguns fatores típicos de perdas locais no núcleo para a indução de 1,7T:

1,44 W/kg	1,88 W/kg	2,43 W/kg	1,88 W/kg	1,44 W/kg
1,60 W/kg		1,60 W/kg		1,60 W/kg
1,44 W/kg	1,88 W/kg	2,43 W/kg	1,88 W/kg	1,44 W/kg

Figura 11 - Perdas locais no núcleo (vista em corte)

A partir do valor calculado de seção transversal do núcleo e das massas locais do núcleo obtemos a perda no ferro de 17,32 kW para uma indução de 1,7 T e 60 Hz.

Para o cálculo de perdas no cobre (perdas joule), primeiramente necessita-se calcular os o valor das resistências dos enrolamentos.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (7)$$

Dessa forma obtemos:

$$R_{20^\circ\text{C_AT}} = 2,099 \Omega$$

$$R_{20^\circ\text{C_BT}} = 0,0547 \Omega$$

Fazendo a conversão da resistência para 75 °C, obtemos:

$$R_{75^\circ\text{C}} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot AT \times (1 - 234,5 \cdot (T - 20)) / (1 - 234,5 \cdot (75 - 20)) \quad (8)$$

$$R_{75^\circ\text{C}} \text{ AT} = 2,5526 \Omega$$

$$R_{75^\circ\text{C}} \text{ BT} = 0,0665 \Omega$$

Para o cálculo da impedância, vamos referir a resistência do secundário (baixa tensão) para o primário. Isso nos dá uma resistência equivalente de:

$$Req = 2,5526 + \left(\frac{138}{13,8}\right)^2 \times 0,0665$$

$$Req = 9,2026 \Omega$$

Portanto, a resistência equivalente do circuito elétrico do transformador, referido ao primário, será representada pela soma das resistências à 75°C referidas ao primário:

$$Req = 9,2026 \Omega.$$

O cálculo das perdas no cobre é feito pela fórmula da potência ativa:

$$P = 3Ri^2 \quad (9)$$

Dessa forma, com base na circulação de corrente nominal nas fases do transformador, obtemos as seguintes perdas no cobre:

	Perdas à 75°C [kW]
Baixa Tensão	26,19
Alta Tensão	30,20
TOTAL	56,39

Tabela 8 - Perdas Joule

As perdas adicionais, para efeito de simplificação segundo a ABB podem ser consideradas como 20% das perdas joule. Portanto, temos: $P_{ADD} = 11,27 \text{ kW}$.

5.6 Impedância

Como a impedância do transformador é a principal grandeza para o estudo de curtos-circuitos em transformadores de potência e é a grandeza que sintetiza todas as informações sobre as dimensões do transformador, podemos dizer que a determinação da impedância do transformador de potência é a etapa principal do projeto do transformador no contexto do estudo dos curtos circuitos.

A norma técnica ABNT NBR5380/1993 diz que a impedância mínima para transformadores da classe de 15 MVA deve ser no mínimo de 8%, e que do valor especificado da impedância do transformador, é permito uma variação máxima de $\pm 7,5\%$.

Uma forma simplificada de se calcular a impedância de transformadores de potência, considerando-se a geometria do transformador, é pela fórmula:

$$U(x) = 8 \times 10^{-6} f N I \left\{ \frac{\frac{D_{AB}(D_{AT}-D_{BT})}{z} + [(D_{AT} \cdot I_{AT}) + (D_{BT} \cdot I_{BT})]/3}{[(R_{AB} + I_{AT} + I_{BT}) \cdot U_n]} \right\} \quad (10)$$

Onde:

$U(x)$ = impedância de sequência positiva porcentual

f = frequência da tensão de alimentação

N = número de espiras

I = corrente que percorre as espiras

D_{AT} = diâmetro médio do enrolamento AT

D_{BT} = diâmetro médio do enrolamento BT

d_{AB} = distância entre enrolamentos A e B

I_{AT} = largura do disco

I_{BT} = largura do condutor BT

H_{EBT} = altura do enrolamento BT

U_N = tensão volt/espira

Substituindo os valores e efetuando os cálculos, obteremos na tensão nominal e 15 MVA, impedância de sequência positiva 8,12%.

Nota-se que esse valor está dentro do padrão mínimo especificado pela norma da ABNT.

Segundo a norma técnica ABNT NBR 5356-5, um valor válido e simplificado para a componente de sequência zero é um valor três vezes maior que a componente de sequência positiva, portanto para sequência zero temos uma impedância de 24,36%.

6 Curtos-Circuitos

A simulação dos principais tipos de curtos-circuitos no transformador foi feita considerando-se um gerador ideal, $S=15\text{MVA}$ (ligação estrela aterrada), alimentando o transformador projetado. Será calculado o valor das correntes e tensões nas fases do transformador para a situação de curto-círcuito no primário e no secundário, a partir da metodologia das componentes simétricas apresentadas por Stevenson^[6], com as relações entre componentes de fase e componentes simétricas e com os respectivos modelos de circuitos de curto circuito trifásico, dupla-fase e fase-terra.

O cálculo dos valores de base do transformador referido ao primário e ao secundário do transformador é apresentado na tabela abaixo:

Grandezas de base	Primário (AT)	Secundário (BT)
Potência [MVA]	15	15
Tensão [kV]	138	13,8
Impedância [Ω]	1269,6	12,7
Corrente [A]	62,76	627,56

Tabela 9 - Valores de base

A seguir serão apresentados os circuitos em componentes simétricas e os resultados das tensões e correntes no transformador curto circuitado. Em todos os casos, será considerada com referência de fase a barra em curto circuito.

6.1 Curto Circuito Trifásico

6.1.1 Secundário

Ao aplicarmos um curto circuito trifásico no secundário do transformador, temos:

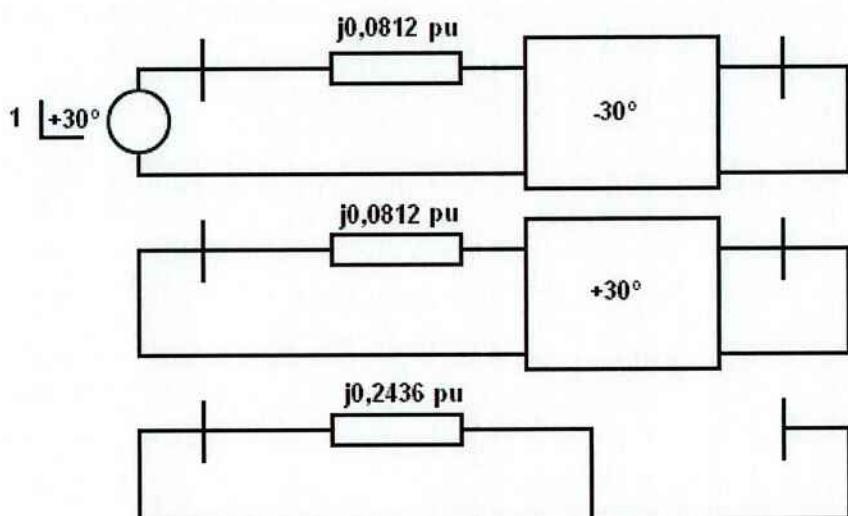


Figura 12 - Curto circuito trifásico no secundário (componentes simétricas)

Logo, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
VA	$1 \angle 30^\circ$	0	V0	0	0
VB	$1 \angle -90^\circ$	0	V1	$1 \angle 30^\circ$	0
VC	$1 \angle 150^\circ$	0	V2	0	0
IA	$12,32 \angle -60^\circ$	$12,32 \angle -60^\circ$	I0	0	$0 \angle 0^\circ$
IB	$12,32 \angle 180^\circ$	$12,32 \angle 180^\circ$	I1	$12,32 \angle -60^\circ$	$12,32 \angle -90^\circ$

I_C	$12,32 \angle 60^\circ$	$12,32 \angle 60^\circ$	I₂	$0 \angle -120^\circ$	$0 \angle -90^\circ$
----------------------	-------------------------	-------------------------	----------------------	-----------------------	----------------------

Tabela 10 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto trifásico no secundário

Podemos notar que no curto circuito trifásico só há componente simétrica de sequência positiva no lado referido ao curto trifásico. Ademais, podemos notar que a corrente em componentes de fase é 12,32 vezes maior que a corrente nominal do transformador.

6.1.2 Primário

Ao aplicarmos um curto circuito trifásico no primário do transformador, temos:

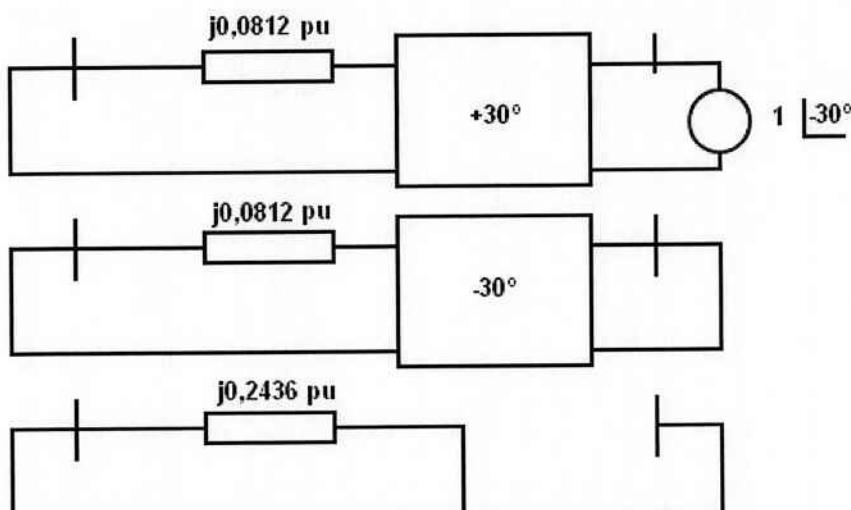


Figura 13 - Curto circuito trifásico no primário (componentes simétricas)

Logo, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
V _A	0	$1 \angle -30^\circ$	V ₀	0	0
V _B	0	$1 \angle -150^\circ$	V ₁	0	$1 \angle -30^\circ$
V _C	0	$1 \angle 90^\circ$	V ₂	0	0
I _A	$12,32 \angle -90^\circ$	$12,32 \angle -120^\circ$	I ₀	0	0

IB	$12,32 \angle 150^\circ$	$12,32 \angle 120^\circ$	I1	$12,32 \angle -90^\circ$	$12,32 \angle -120^\circ$
IC	$12,32 \angle 30^\circ$	$12,32 \angle 0^\circ$	I2	0	0

Tabela 11 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto trifásico no primário

Podemos notar que no curto circuito trifásico só há componente simétrica de sequência positiva no lado referido ao curto trifásico. Ademais, podemos notar que a corrente em componentes de fase é 12,32 vezes maior que a corrente nominal do transformador. Nota-se que os valores obtidos no curto em relação ao primário, em módulo, são iguais em relação ao obtidos no curto trifásico no secundário do transformador, contudo, há uma mudança na fase devido à mudança de referência e a defasagem do transformador devido ao grupo de ligação YnD1.

6.2 Curto Circuito Dupla-Fase

6.2.1 Secundário

Ao aplicarmos um curto circuito dupla-fase no secundário do transformador, temos:

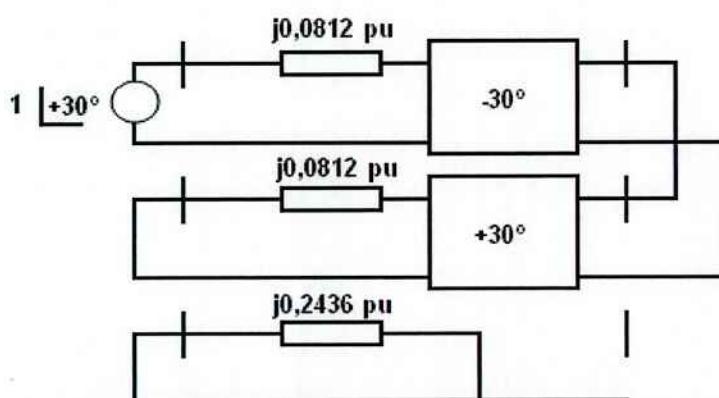


Figura 14 - Curto circuito dupla fase no secundário (componentes simétricas)

Logo, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
VA	$1 \angle 30^\circ$	$1 \angle 0^\circ$	V0	$0 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$
VB	$1 \angle -90^\circ$	$0,5 \angle 180^\circ$	V1	$1 \angle 30^\circ$	$0,5 \angle 0^\circ$
VC	$1 \angle 150^\circ$	$0,5 \angle 180^\circ$	V2	$0 \angle -30^\circ$	$0,5 \angle 0^\circ$
IA	$10,67 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$	I0	$0 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$
IB	$12,32 \angle 180^\circ$	$10,67 \angle 180^\circ$	I1	$6,1576 \angle -60^\circ$	$6,1576 \angle -90^\circ$
IC	$10,67 \angle 0^\circ$	$10,67 \angle 0^\circ$	I2	$6,1576 \angle 60^\circ$	$6,1576 \angle 90^\circ$

Tabela 12 - Sobrecorrentes e sobre tensões para curto dupla-fase no secundário

Um ponto interessante para se notar é que a corrente em componentes de fase apresentou valor 10,67 vezes maior que o nominal, e que na fase B do primário essa corrente foi ainda maior. Na fase B do primário a intensidade da corrente foi igual à 12,32 vezes a corrente nominal, igual em módulo à corrente no primário em relação ao curto trifásico, porém com sentido inverso. Isso se deve ao fato da defasagem do transformador fazer com que as correntes de fase se somem no mesmo grau. Contudo, no secundário onde está sendo aplicado o curto, o valor da sobrecorrente é 10,67 vezes a corrente nominal.

6.2.2 Primário

Ao aplicarmos um curto circuito dupla-fase no primário do transformador, temos:

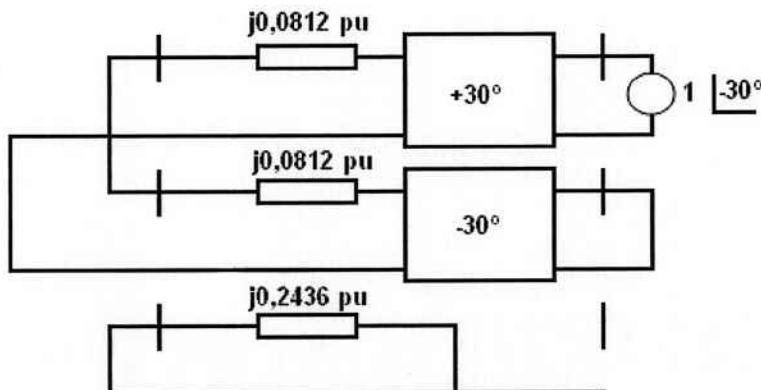


Figura 15 - Curto circuito dupla-fase no primário (componentes simétricas)

Logo, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
V_A	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle -30^\circ$	V₀	$0 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$
V_B	$0,5 \angle 180^\circ$	$1 \angle -150^\circ$	V₁	$0,5 \angle 0^\circ$	$1 \angle -30^\circ$
V_C	$0,5 \angle 180^\circ$	$1 \angle 90^\circ$	V₂	$0,5 \angle 0^\circ$	$0 \angle 30^\circ$
I_A	$0 \angle 0^\circ$	$6,16 \angle 180^\circ$	I₀	$0 \angle 0^\circ$	$0 \angle 0^\circ$
I_B	$10,67 \angle 180^\circ$	$6,16 \angle 180^\circ$	I₁	$6,16 \angle -90^\circ$	$6,16 \angle -120^\circ$
I_C	$10,67 \angle 0^\circ$	$12,32 \angle 0^\circ$	I₂	$6,16 \angle 90^\circ$	$6,16 \angle 120^\circ$

Tabela 13 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto dupla-fase no primário

Nota-se que nesse caso, devido a defasem do transformador não houve coincidência no ângulo de defasagem entre as componentes fasorial de corrente do transformador devido ao curto dupla-fase, dessa forma o valor da corrente no primário devido ao curto é 10,67 vezes a nominal.

6.3 Curto Circuito Fase-Terra

6.3.1 Secundário

Ao aplicarmos um curto circuito fase-terra no secundário do transformador, temos:

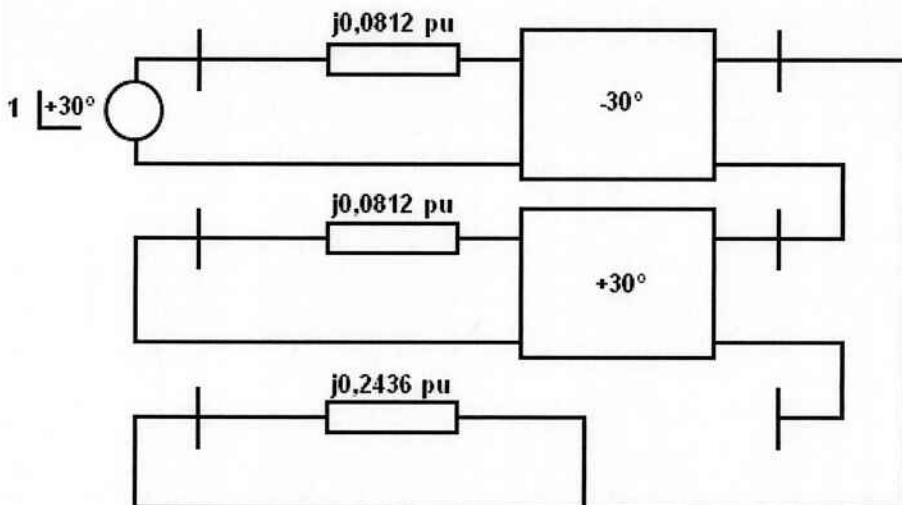


Figura 16 - Curto circuito fase-terra no secundário (componentes simétricas)

Logo, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
V _A	1∠30°	0∠0°	V ₀	0∠0°	0,5∠180°
V _B	1∠-90°	1,5∠-120°	V ₁	1∠30°	1∠0°
V _C	1∠150°	1,5∠120°	V ₂	0∠0°	0,5∠180°
I _A	0∠0°	0∠0°	I ₀	0∠0°	0∠0°
I _B	0∠0°	0∠0°	I ₁	0∠0°	0∠0°
I _C	0∠0°	0∠0°	I ₂	0∠0°	0∠0°

Tabela 14 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto fase-terra no secundário

Nota-se que devido ao grupo de ligação do transformador e ao modelo do curto em componentes simétricas, vemos que não há corrente tanto no primário quanto no secundário.

6.3.2 Primário

Ao aplicarmos um curto circuito fase-terra no primário do transformador, temos:

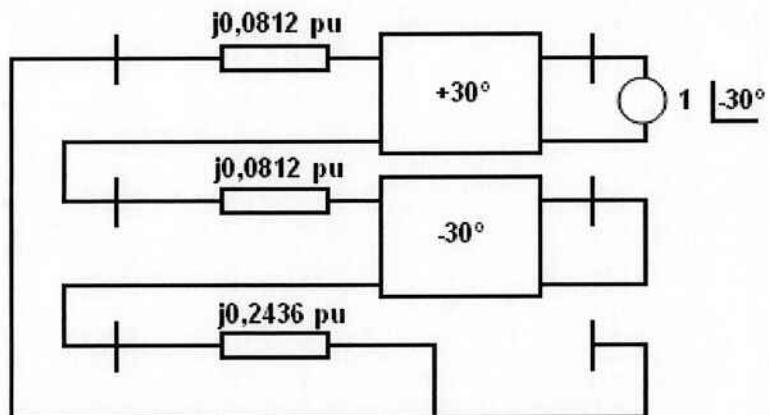


Figura 17 - Curto circuito fase-terra no primário (componentes simétricas)

Portanto, temos:

Componentes de Fase			Componentes Simétricas		
[pu]	Primário	Secundário	[pu]	Primário	Secundário
V _A	0,0∠0°	1∠-30°	V ₀	0,6∠150°	0∠0°
V _B	1,249∠-120°	1∠-150°	V ₁	0,8∠-30°	1∠-30°
V _C	1,249∠120°	1∠90°	V ₂	0,2∠150°	0∠120°
I _A	7,39∠-120°	4,27∠-120°	I ₀	2,4631∠-120°	0∠0°
I _B	0∠0°	4,27∠60°	I ₁	2,4631∠-120°	2,4631∠-150°
I _C	0∠0°	0∠90°	I ₂	2,4631∠-120°	2,4631∠-90°

Tabela 15 - Sobrecorrentes e sobretensões para curto fase-terra no primário

Nota-se que foi apresentado uma elevada sobrecorrente na fase curto circuitada, com intensidade de 7,39 vezes a corrente nominal.

7 Transitórios

O estudo de transitórios no curto circuito é uma etapa muito importante na análise de esforços solicitados no transformador, quando há a ocorrência de uma falta no sistema, em especial no que se refere ao rompimento de isolações.

No item anterior nós analisamos a obtenção da corrente de curto circuito de regime permanente do sistema, que apresenta frequência igual à frequência do gerador. A corrente de regime permanente exprime a corrente que circula na rede, algum tempo depois da ocorrência do curto circuito, quando as componentes transitórias já se extinguiram.

Para o estudo da componente transitória (também chamada de unidirecional), vamos representar o sistema GERADOR-TRANSFORMADOR por um circuito R-L, série, excitado por um gerador ideal de tensão senoidal.

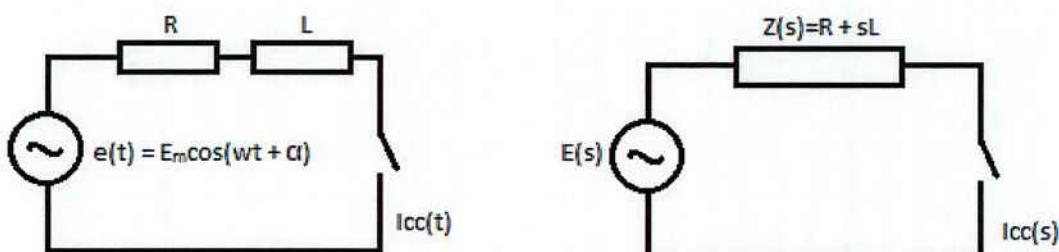


Figura 18 - Circuito R-L série utilizado no estudo do transitório do transformador

Aplicando-se a segunda Lei de Kirchoff ao circuito tem-se:

$$e(t) = R \times i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

A solução completa da equação diferencial é obtida pela superposição das duas soluções (transitória e permanente):

$$i(t) = ih(t) + ip(t) \quad (12)$$

Segundo Kagan^[7], a componente unidirecional é dada por:

$$ih(t) = -\frac{E_m}{z} \times \sin(\alpha - \psi) \times e^{(-\frac{R}{L})t} \quad (13)$$

Onde:

E_m = Valor de pico da tensão aplicada pela fonte

Z = Impedância do transformador

R = Resistência do transformador

L = Indutância do transformador

α = Ângulo de incidência da falta

ψ = Ângulo de rotação de fase entre a tensão e a corrente em regime permanente

O estudo do comportamento do transformador durante o período transitório terá como parâmetros do nosso caso a resistência equivalente do transformador referido ao primário, a impedância de curto circuito do transformador referido ao primário e consequentemente, a partir dessas podemos obter, através de relações geométricas, a reatância do nosso circuito. Dessa forma, obtemos uma indutância equivalente de 0,27 H.

Um ponto importante a ser ressaltado no estudo do transitório é a consideração da utilização do ângulo de incidência da falta (α) no nosso estudo da componente unidirecional. Com esse componente, nosso modelo torna-se mais generalista, permitindo assim uma análise mais específica do instante do acontecimento da falta em relação ao impacto no transformador.

Por outro lado, segundo a lei de Ohm, consideramos a componente em regime da corrente pela expressão apresentada abaixo:

$$i_p(t) = \frac{E_m}{Z} \times \sin(\omega t + \alpha) \quad (14)$$

Dessa forma, a corrente total observada no sistema será a soma das parcelas unidirecional e permanente:

$$i(t) = -\frac{E_m}{Z} \times \sin(\alpha - \psi) \times e^{(-\frac{R}{L})t} + \frac{E_m}{Z} \times \sin(\omega t + \alpha) \quad (15)$$

A partir dessas premissas, e considerando $\psi=0^\circ$ para melhor compreensão das sobrecorrentes e esforços solicitantes de um transformador de potência durante o transitório, apresenta-se uma análise para os curtos trifásico, dupla-fase e fase-terra para diversos valores de incidência da falta.

A característica no nosso circuito R-L série equivalente apresenta-se através de sua condição física, ou seja, temos uma resistência de $9,2026 \Omega$ e uma indutância de $0,27 \text{ H}$, assim a constante de tempo do nosso circuito é dada por:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (16)$$

Assim, a constante de tempo do circuito do referente transformador equivale a $\tau=29,34\text{ms}$. Consequentemente, pode-se observar nas formas de onda da componente unidirecional, apresentadas a seguir, que o circuito começa a se estabilizar em aproximadamente 5τ (como os gráficos plotados a seguir estão sem escala de tempo, pode-se tomar como referência o período da onda, que é de $16,67\text{ms}$, para se analisar visualmente a estabilização da forma de onda após do transitório).

7.1 Transitórios no curto trifásico

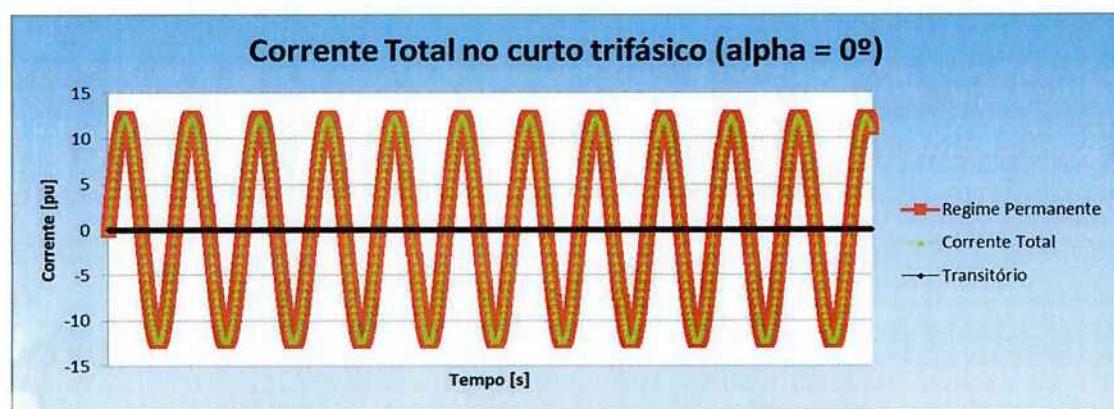


Figura 19 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=0^\circ$)

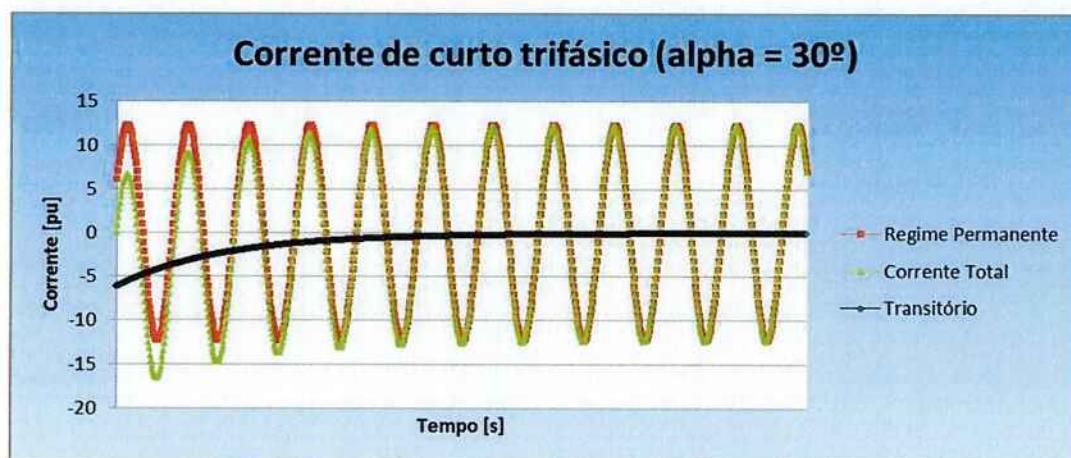


Figura 20 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=30^\circ$)

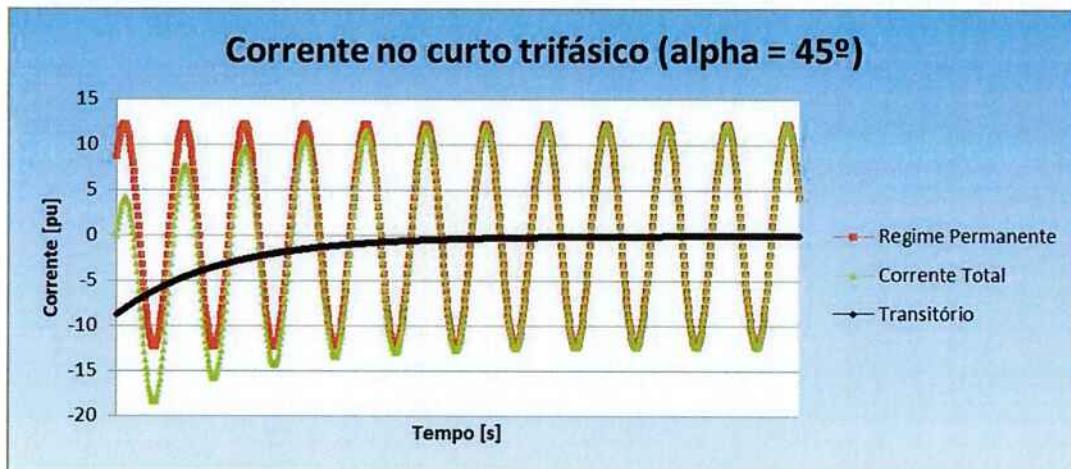


Figure 21 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=45^\circ$)

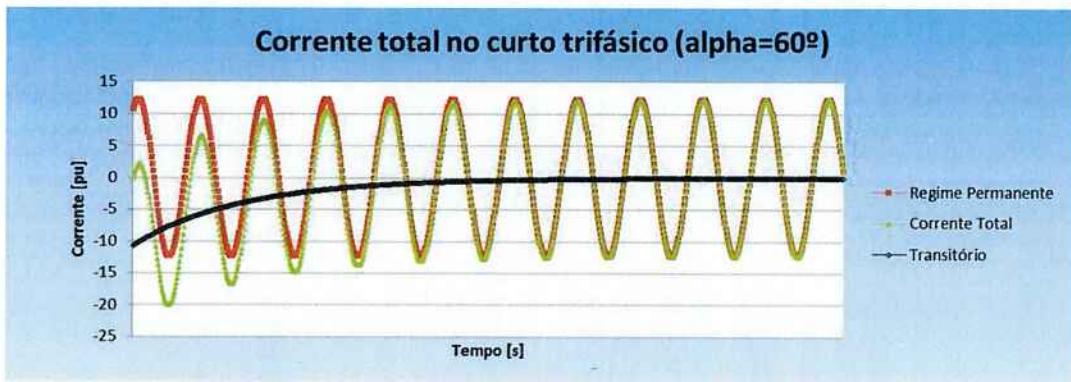


Figura 22 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=60^\circ$)

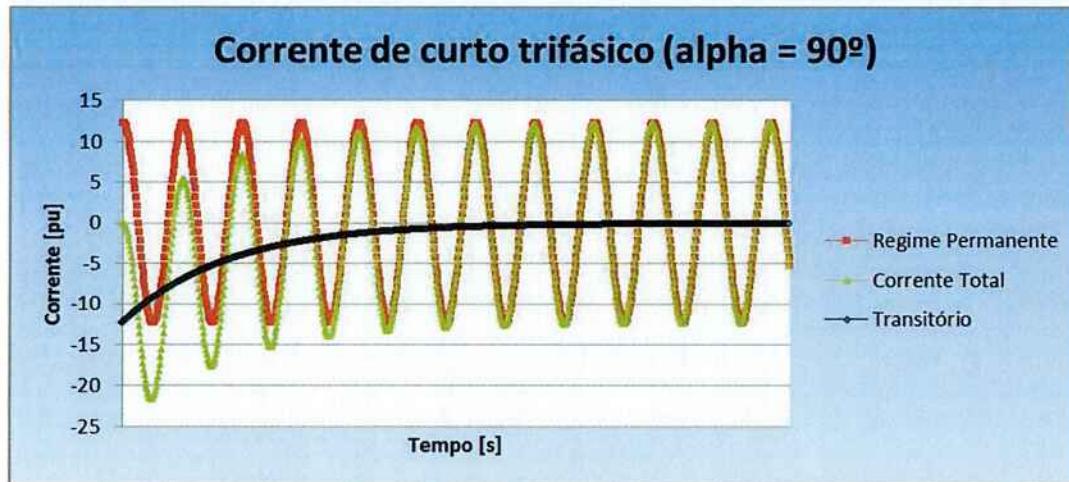


Figura 23 - Forma de onda da corrente de curto trifásico ($\alpha=90^\circ$)

Como pode ser observado, dependendo do ângulo de incidência da falta, a amplitude da corrente de curto é maior, e para α igual a 90° temos o valor máximo de corrente de curto. Pode-se observar que não há alteração na frequência e que o transitório dura de 5 a 6 ciclos.

7.2 Transitórios no curto dupla-fase

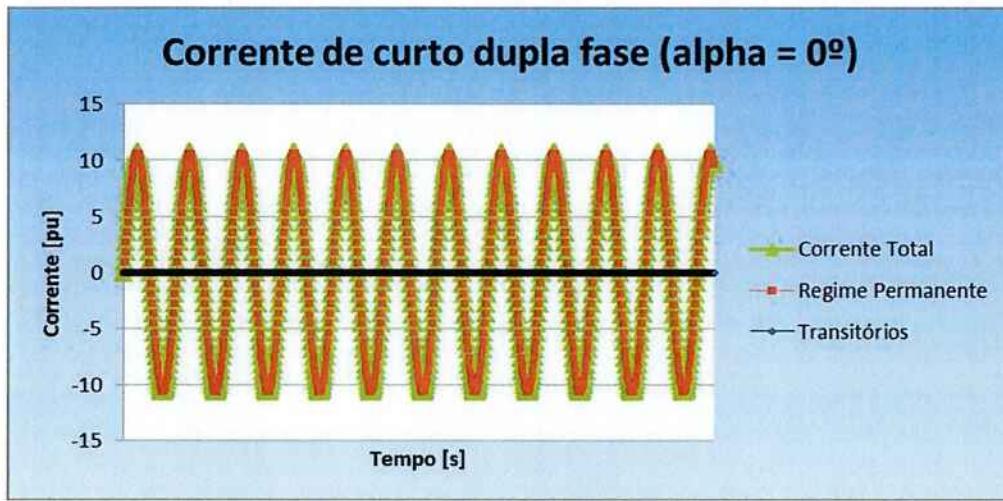


Figura 24 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=0^\circ$)

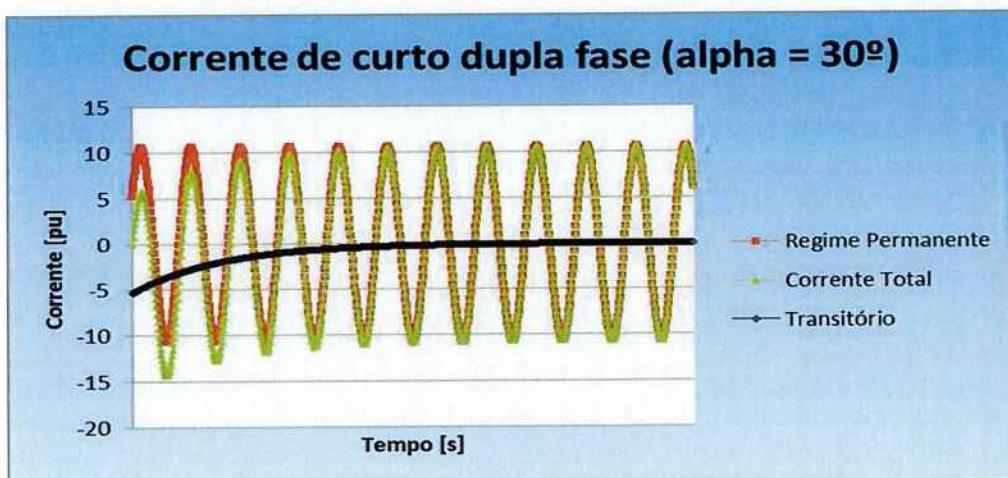


Figura 25 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=30^\circ$)

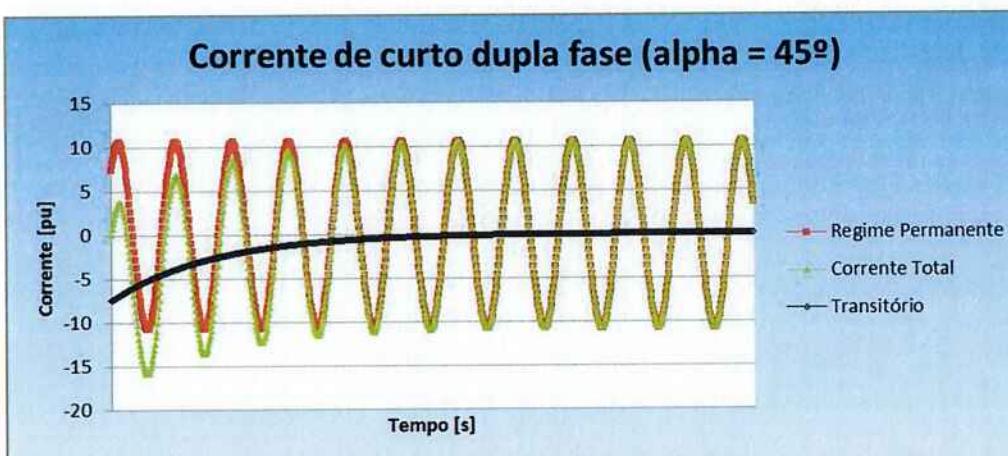


Figura 26 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=45^\circ$)

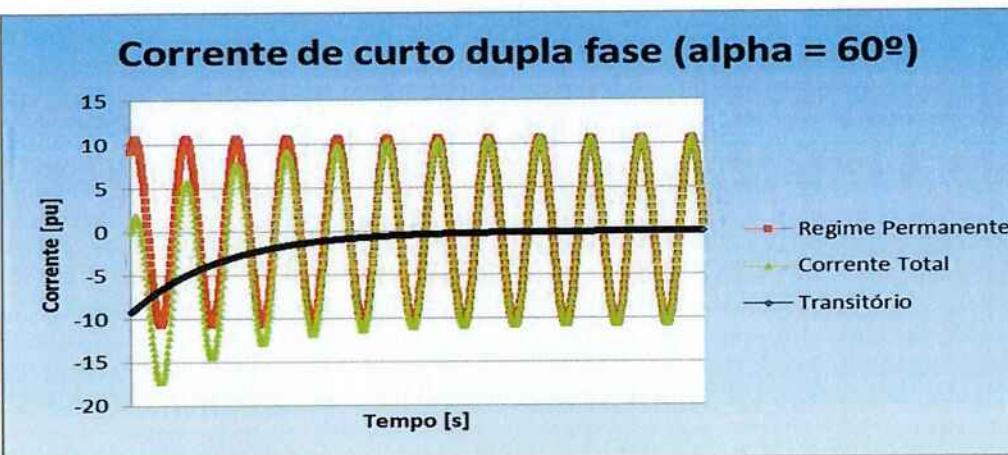


Figura 27 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=60^\circ$)

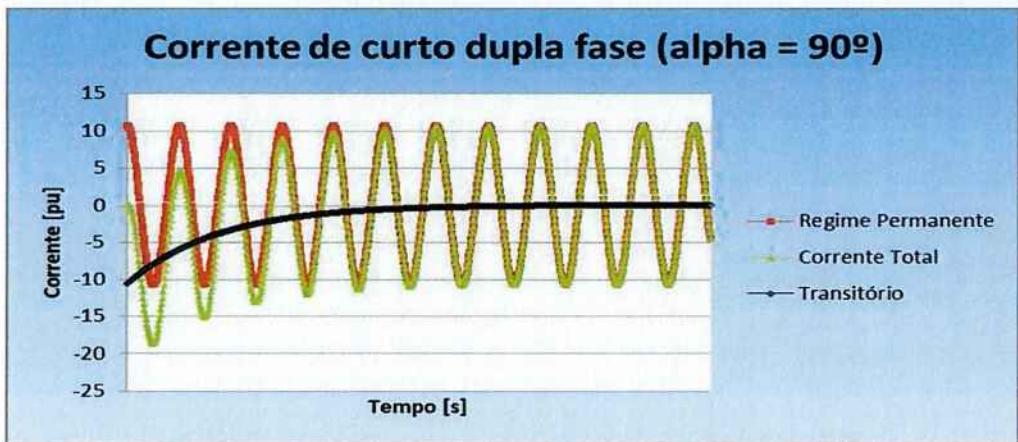


Figura 28 - Forma de onda da corrente de curto dupla fase ($\alpha=90^\circ$)

Como pode ser observado, dependendo do ângulo de incidência da falta, a amplitude da corrente de curto circuito é maior, e que para α igual a 90° , temos o valor máximo de corrente de curto. Pode-se observar que não há alteração na frequência e que o transitório dura de 5 a 6 ciclos.

7.3 Transitórios no curto fase-terra



Figura 29 - Forma de onda da corrente de curto fase terra no secundário ($\alpha=0^\circ$)

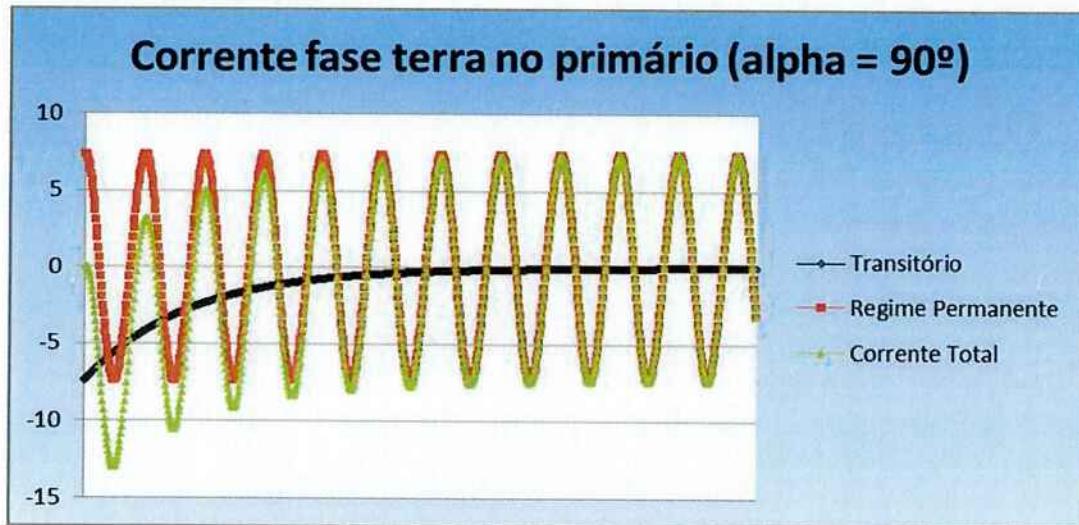


Figura 30 - Forma de onda da corrente de curto fase terra no primário ($\alpha=90^\circ$)

Como pode ser observado, o curto circuito fase terra para esse tipo de ligação do transformador não gera nem corrente e nem tensão, além de possuir componente unidirecional nula. Para via de estudo, pois o caso apresentado é uma exceção, analisando o curto circuito fase terra no primário (que apesar de ser outro sistema, em pu representa a mesma intensidade de valores) para o pior caso, α igual a 90° , assim temos o valor máximo de corrente de curto circuito fase terra. Pode-se observar que não há alteração na frequência e que o transitório dura de 5 a 6 ciclos.

7.4 Análise geral dos curtos circuitos

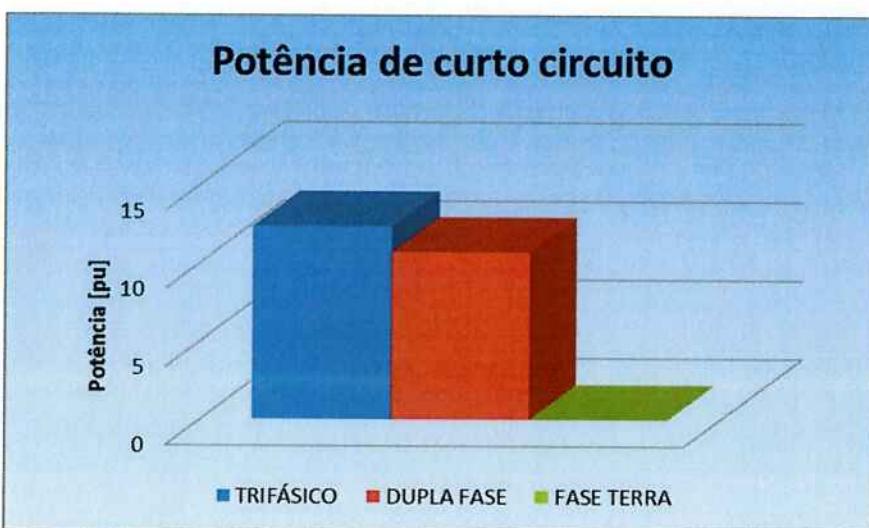


Figura 31 - Potência de curto circuito em regime permanente para cada falta

Potência de Curto Circuito em Regime Permanente		
Tipo de falta	Primário [pu]	Secundário [pu]
Trifásica	12,32	12,32
Dupla Fase	10,67	10,67
Fase Terra	7,39	0

Tabela 16 - Potência de curto circuito em regime permanente para os três tipos de falta

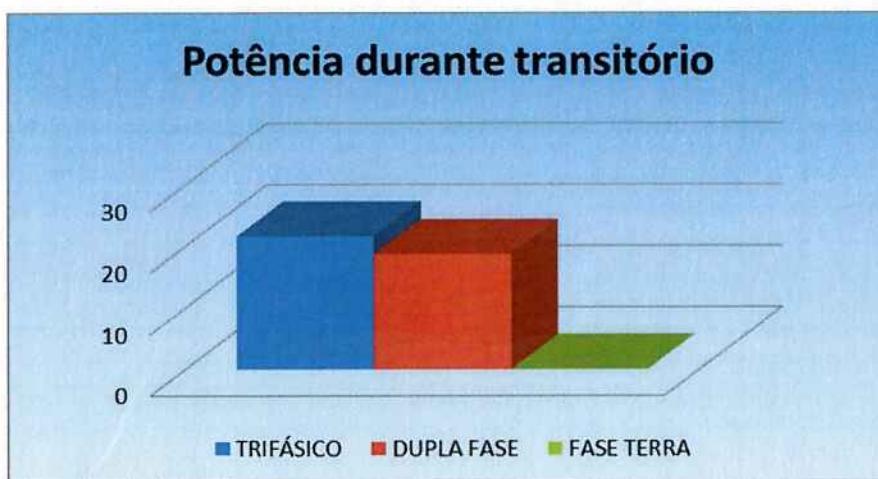


Figura 32 - Potência instantânea máxima de curto circuito no transitório para cada falta

Potência de Curto Circuito durante o transitório		
Tipo de falta	Primário [pu]	Secundário [pu]
Trifásica	21,62	21,62
Dupla Fase	18,73	18,73
Fase Terra	12,97	0

Tabela 17- Potência de curto circuito máxima durante o transitório para os três tipos de falta

8 Software ANSYS Maxwell

O software Maxwell foi desenvolvido pela empresa americana ANSYS Inc. em 2010 com o objetivo de simular de maneira interativa e com alto desempenho, de maneira bidimensional ou tridimensional, qualitativamente e quantitativamente grandezas relevantes às máquinas elétricas de potência pelo método dos elementos finitos. Para tal, o software se utiliza das equações de Maxwell como fundamento para a resolução dos problemas.

Esse software resolve problemas elétricos, magnetostáticos, correntes parasitas e transitórios utilizando as equações de Maxwell, a partir de uma região delimitada no espaço, um modelo ou geometria, condições de contorno apropriadas e as excitações do sistema.

8.1 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell, juntamente com a lei da força de Lorentz compõem toda a base do eletromagnetismo clássico. O software Maxwell utiliza as equações de Maxwell para resolver os problemas que lhe são apresentados, baseados qual o tipo de solução específica que é solicitada.

NOME	EQUAÇÃO
Lei de Gauss	$\oint_V \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_f(V)$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\oint_V \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$
Lei de Faraday	$\oint_S \mathbf{E} \cdot dl = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$
Lei de Ampère	$\oint_S \mathbf{H} \cdot dl = I + \frac{\partial \phi}{\partial t}$

Tabela 18 - Equações de Maxwell na forma integral

8.1.1 Lei de Gauss

A lei de Gauss descreve a relação entre um campo elétrico e as cargas elétricas geradoras do campo. O campo elétrico aponta para fora de cargas positivas em direção a cargas negativas. Mais tecnicamente, a lei de Gauss relaciona o fluxo elétrico através de qualquer superfície gaussiana fechada para as cargas elétricas na superfície. Tal equação é especialmente utilizada no modo de soluções tipo elétrico do software, muito útil para o estudo das características e capacidades dos dielétricos do equipamento.

8.1.2 Lei de Gauss para o magnetismo

Linhos de campo magnético em torno de um magneto: As linhas de campo magnético nunca começam ou terminam, tais linhas têm "trajetórias" fechadas. Em outras palavras qualquer linha de campo magnético que entra em um determinado volume ou material deve de alguma forma sair deste volume ou material. Em uma linguagem mais técnica, o fluxo magnético através de qualquer superfície gaussiana é zero, ou que o campo magnético é um campo vetorial solenoidal. Tal equação é especialmente utilizada no modo de soluções tipo magnética do software, muito útil para a adaptação da malha do circuito e no processo de iteração no cálculo dos campos.

8.1.3 Lei de Faraday

A lei de Faraday descreve como um campo magnético que varia com o tempo cria, ou induz, um campo elétrico. Este aspecto da indução eletromagnética é o princípio operante por trás de muitas máquinas elétricas. Por exemplo, a indução de tensão nos condutores das bobinas de um transformador, devido à indução eletromagnética. Tal equação é especialmente utilizada no modo de soluções tipo magnética do software, muito útil para o estudo das correntes e tensões induzidas do equipamento devido ao fluxo magnético, após estabelecida a força magneto motriz no núcleo magnético.

8.1.4 Lei de Ampère com a correção de Maxwell

A lei de Ampère afirma que campos magnéticos podem ser gerados em duas formas: através de correntes elétricas, que é a lei de Ampère original, e por campos elétricos que variam no tempo, que é a correção proposta por Maxwell.

A correção de Maxwell proposta à lei de Ampère é particularmente importante: significa que um campo magnético que varia no tempo cria um campo elétrico que varia no tempo, e que um campo elétrico que varia no tempo gera um campo magnético que varia no tempo. Portanto, estas equações permitem a existência de "ondas eletromagnéticas" autosustentadas através do espaço vazio.

Tal equação é especialmente utilizada no modo de soluções tipo magnético do software, muito útil para a análise das grandes que atuam no transformador desde o início da operação, passando o transitório e chegando até a condição de regime permanente.

8.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O método dos elementos finitos é um dos métodos numéricos mais aceitos para solucionar problemas de campos complexos, os quais somente uma solução analítica não permite obter solução confiável e satisfatória. O MEF é mundialmente reconhecido por ser muito prático para a resolução de equações diferenciais em análises eletromagnéticas.

A metodologia de resolução do MEF consiste em, a partir de uma geometria arbitrária e complexa, a geometria é partitionada em pequenos pedaços, chamados de elementos finitos. No caso tridimensional, a forma básica do elemento finito é o tetraedro (pirâmide de quatro lados), enquanto no caso bidimensional, a forma básica dos elementos finitos é o triângulo e no caso unidimensional, o elemento finito é um

ponto. O conjunto de tetraedros forma o que é conhecida como malha dos elementos finitos, e sua totalidade deve representar todo o volume do objeto de estudo.

Uma vez que o tetraedro é definido, os elementos finitos são posicionados na matriz de equacionamento, Ferrari^[9]:

$$[A] * [H] = [J] \quad (17)$$

A informação quantitativa dos campos calculados a partir dos elementos finitos é armazenada em posições específicas dos elementos finitos. As componentes de uma determinada grandeza que for tangencial à aresta do elemento finito são armazenadas nos vértices do elemento finito correspondente. As componentes de uma grandeza que é tangencial à face de um elemento e normal à aresta são armazenadas nos pontos médios da aresta correspondente do elemento finito. Os valores de um vetor de uma grandeza estudada são obtidos a partir da interpolação a partir dos valores nodais. A figura abaixo mostra o posicionamento dos pontos de armazenamento de valores de um elemento finito tridimensional.

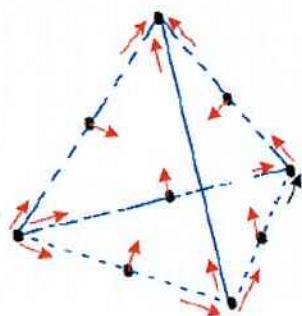


Figura 33 - Armazenamento de valore calculados no elemento finito 3D

A solução do campo a ser estudado é aproximada por uma equação base polinomial quadrática de segundo grau:

$$Hx(x,y,z) = a_0 + a_1 * x + a_2 * y + a_3 * z + a_4 * xy + a_5 * yz + a_6 * xz + a_7 * x^2 + a_8 * y^2 + a_9 * z^2 \quad (18)$$

De modo a se obter essa equação, o software realiza o cálculo de dez pontos para cada elemento finito, o que torna a simulação de formas geométricas complexas muito mais demoradas, pois a capacidade de processamento do software é limitada.

8.3 Funcionamento

O software Maxwell resolve problemas numéricos pelo método dos elementos finitos, dessa forma, a geometria do problema é dividida em pequenos elementos com formato triangular, no caso 2D, a geometria é dividida em pequenos triângulos, enquanto no caso do desenho 3D, a geometria é dividida em pequenos tetraedros.

O processo de operação do Maxwell pode ser explicado da seguinte maneira. Inicialmente, se define no software qual o tipo de análise que irá ser realizada (Magnética: Magnetostática, Correntes Parasitas ou Transitório ou; Elétrica: Eletrostática, Correntes Parasitas ou Transitório Elétrico) cria-se um desenho com a geometria que quer ser estudada. Após o término do desenho devem ser especificadas as condições de contorno do sistema e as excitações. Nessa etapa também deve ser especificado o material de cada peça desenhada. A próxima etapa é a configuração da malha que o software irá gerar. Pode ser especificado para o software que se tem mais interesse em analisar a superfície do desenho, ou então mais o volume, focando mais na seção transversal ou nas beiradas. Após isso, deve-se limitar a região que será estudada e configurar uma solução. A partir desse ponto, o software poderá analisar o sistema e assim calcular os campos e outras grandezas de interesse de estudo. A figura a seguir, obtida do manual do software ANSYS MAXWELL, mostra o organograma do processo:

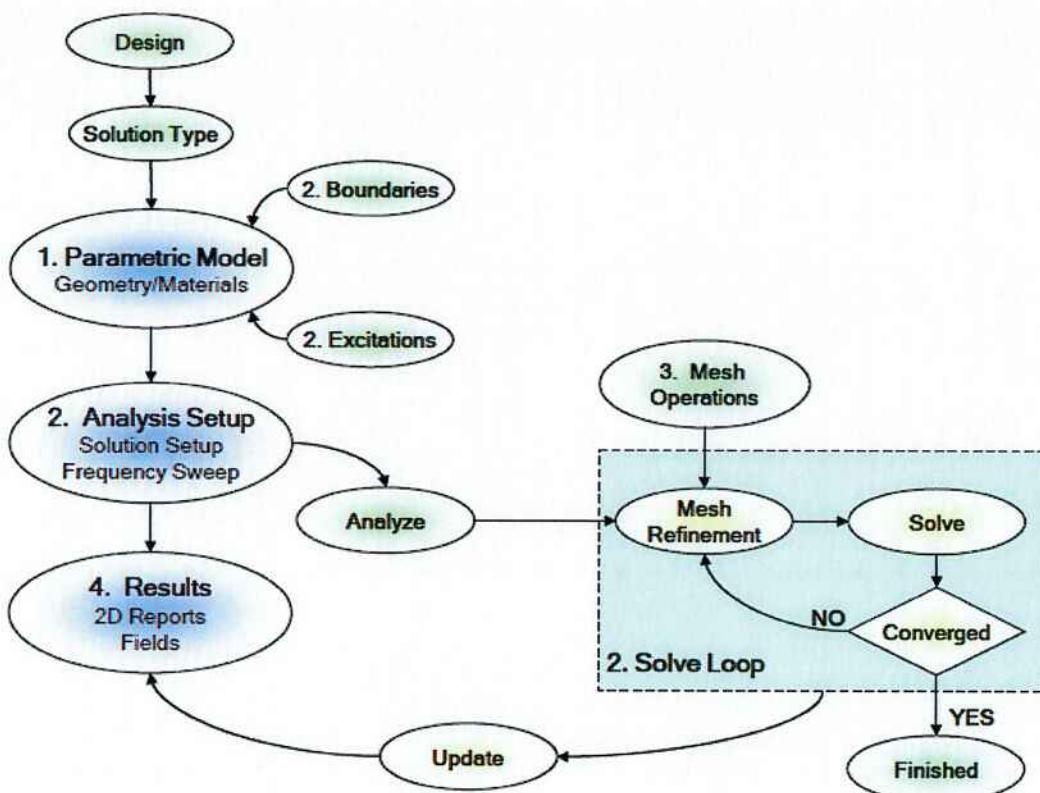


Figura 34 - Organograma de funcionamento do software Maxwell

A ordenação geométrica do modelo em pequenas partes forma uma malha, ou seja, cada parte da geometria do nosso modelo possui uma malha, que será o meio pelo qual o software irá processar as propriedades do material e procurar uma solução. O modelamento das malhas é feito automaticamente pelo software, o que é uma grande vantagem, pois o modelamento das malhas manualmente é um processo extremamente trabalhoso.

A figura a seguir mostra o processo do software Maxwell para adaptar as malhas para que o problema possa ser resolvido pelo método dos elementos finitos.

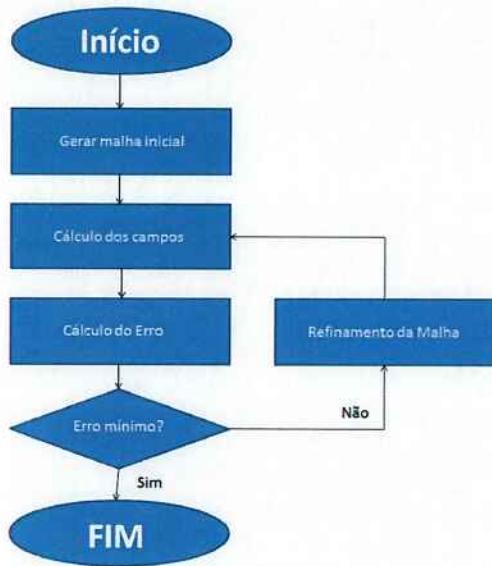


Figura 35 - Processo de cálculo da malha

Na primeira parte do trabalho realizado, foi possível se observar a metodologia para o projeto de um transformador de potência trifásico dentro das determinações da norma ABNT, apesar das simplificações consideradas. Para complementar o projeto foi apresentado alguns desenhos de fabricação do transformador. Esses desenhos serão muito úteis na continuação do projeto, na qual serão necessários dados detalhados de projeto para a simulação em software do curto circuito, pelo método dos elementos finitos.

O estudo de curto circuito, complementando o projeto do transformador, constatou o impacto de diferentes tipos de curtos circuitos no transformador através do estudo de um sistema de potência simplificado para que fosse possível o estudo de curtos circuitos através das componentes simétricas. Com esses dados será possível fazer uma confrontação com os dados obtidos por simulação para que seja possível dimensionar a isolação do transformador através uma classe de tensão adequada. Ademais foi realizado o estudo das componentes transitórias, já apresentado anteriormente.

A próxima etapa se baseia na simulação do transformador projetado, de modo a se observar a operação do mesmo em condição de operação e em condição de curto circuito.

9 Simulações

9.1 Introdução

O estudo de curtos circuitos em transformadores é um estudo no qual é muito difícil se analisar de maneira detalhada, uma vez que o curto circuito em transformadores de médio porte, como é o caso do transformador projeto e analisado nesse estudo, independentemente de qual curto for, é extremamente arriscado em termos de segurança no trabalho. Mesmo com todos os E.P.I's necessários, há grande risco de explosão e danos graves ao ambiente. Isso impossibilita uma simulação real, isto é, uma simulação prática de curto circuito do transformador.

O software MAXWELL, juntamente com seus recursos de solução de equações diferenciais e, com a ampla gama de opções para se analisar o comportamento de máquinas elétricas quando submetidas a determinadas excitações e condições de operação, permitiu que fossem simulados os curtos circuitos fase-terra, dupla fase e trifásico no transformador projetado.

Nessas condições podem-se analisar todos os esforços elétricos, magnéticos e mecânicos que sofre o transformador em cada uma das faltas citadas anteriormente. Tal fato nos permite entender melhor o fenômeno dos curto-circuitos nos transformadores, e consequentemente prevenir o equipamento de danos permanentes e que possam colocar em risco a vida humana.

O foco das simulações foram as condições magnéticas de operação, isto é, as consequências da operação do transformador durante e após o transitório do curto circuito, para a cada uma das situações de curto circuito.

Nos próximos itens serão apresentadas as condições e resultados de cada tipo de curto para as situações magnetostáticas e transitórias.

9.2 Simulação Operação Nominal

O estudo da situação de operação do transformador na condição nominal de operação visa a confrontar as características especificadas no projeto do transformador com sua real operação. A importância dessa simulação está no fato de que o cliente espera ter um equipamento de acordo com as especificações que ele comprou. O não atendimento das especificações do projeto, ou do cliente, é passível de multa ou, em casos extremos, a rejeição do transformador por parte do cliente.

A simulação da operação nominal do transformador se baseou no projeto do transformador. O resultado do projeto, em interface gráfica de entrada para o software é apresentado abaixo:

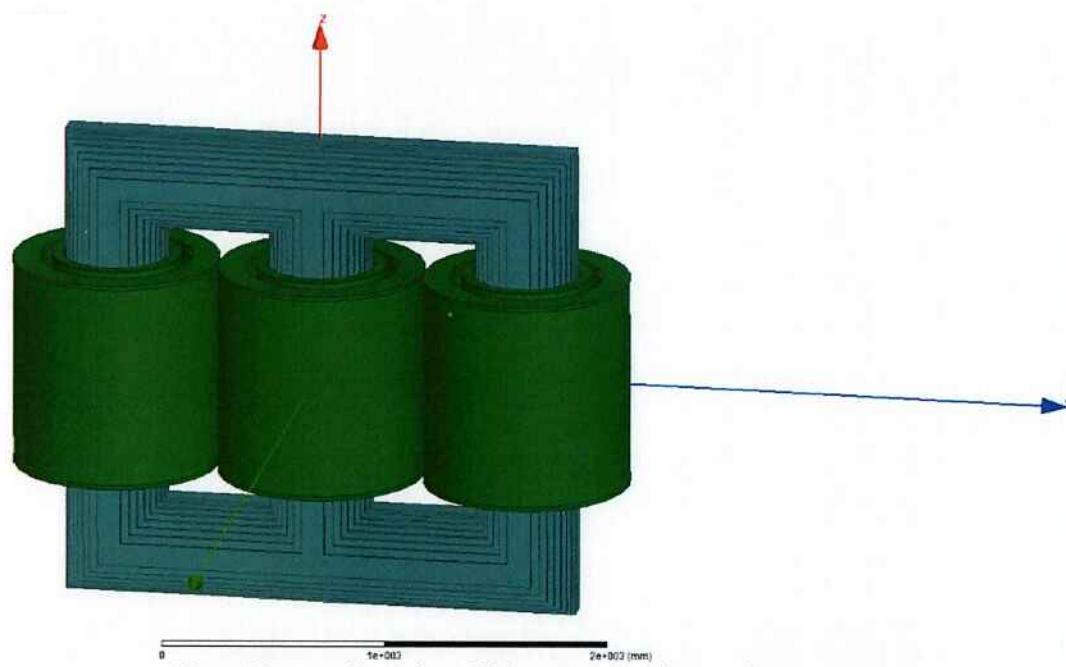


Figura 36 - Transformador trifásico 3D projetado no software Maxwell

Para efeito de simulação, algumas simplificações foram exigidas. A capacidade computacional do computador utilizado na simulação impôs algumas restrições, pois o software Maxwell exige muito do sistema operacional do computador. Dessa forma, os detalhes dos enrolamentos (vide figuras 37 e 38) foram simplificados por condições de contorno, sem grandes perdas de valor de simulação, isto é, as simplificações realizadas não implicaram em invalidação dos resultados da simulação.

O enrolamento de alta tensão foi calculado para ser uma bobina tipo disco contínuo. Na figura abaixo pode ver claramente os 16 condutores por discos especificados no cálculo elétrico, além das isolações de papel (nos condutores) e de celulose (lateral e superior na bobina). Além disso, pode-se observar um excesso de papel externamente na bobina. Isso se deve a uma imperfeição da forma geométrica utilizada para se representar o papel, pois na vista em corte (plano $y=0$) é evidenciado o excesso de papel, porém a vista em corte (plano $x + y = 1$) mostra o papel exatamente simétrico como projetado.

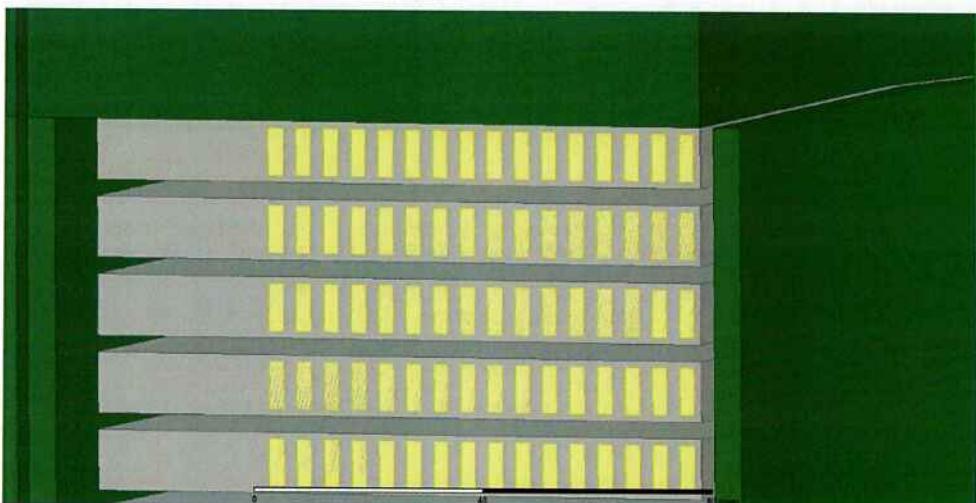


Figura 37 - Detalhe da fase C da bobina de Alta Tensão

A bobina de baixa tensão apresentada é uma bobina tipo hélice. Pode ser observado o feixe de condutores isolados por papel em cada espira. O enrolamento de baixa tensão, assim como no enrolamento de alta tensão, teve suas isolações especificadas em papel e celulose. As isolações de papel (nos condutores) e de celulose (lateral e superior na bobina) são mostradas abaixo. Vale ressaltar que o gap entre as esperas de baixa tensão foram especificados em 2 milímetros, enquanto para o enrolamento de alta tensão, os gaps foram especificados em 3 milímetros.

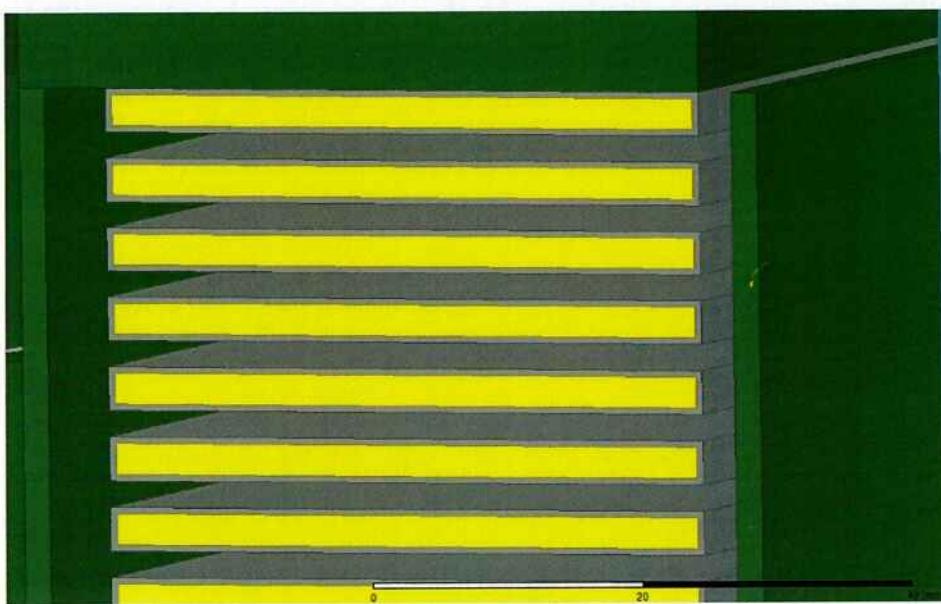


Figura 38 - Detalhe da fase C da bobina de Baixa Tensão

Para melhor visualização do projeto, é apresentada uma vista tridimensional explodida, assim a visualização do detalhamento da bobina fica mais fácil e assim pode se entender melhor a configuração geral do projeto.

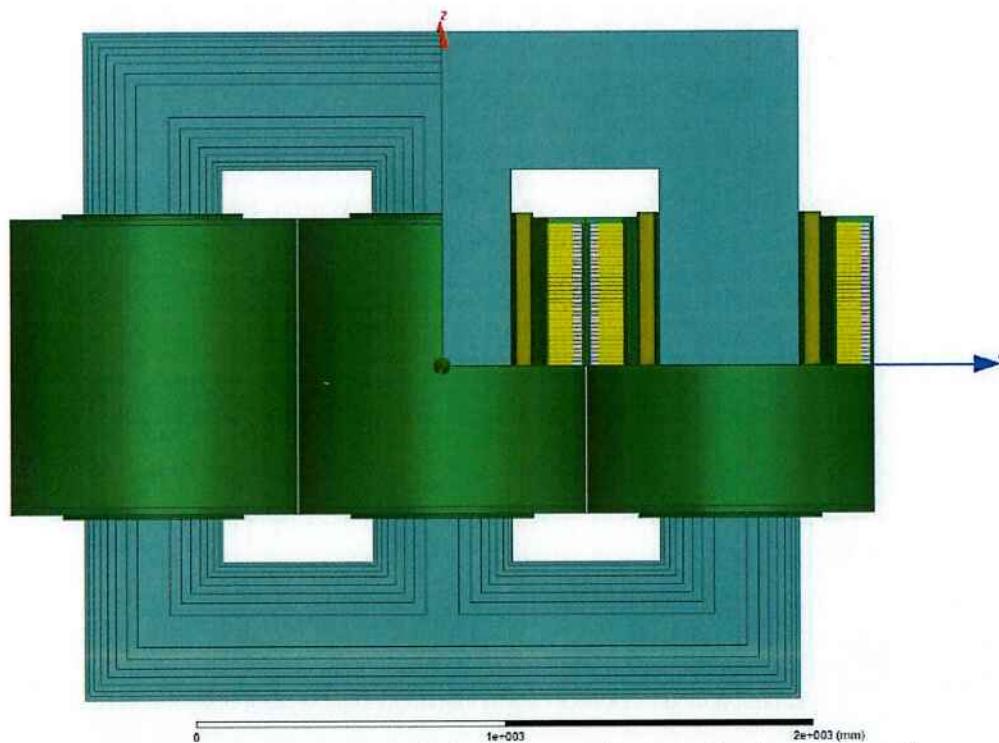


Figura 39 - Vista Frontal do detalhamento da parte ativa do transformador

Em comparação com as condições reais do transformador, a simulação da operação nominal tem como objetivo simular se as especificações do projeto do transformador correspondem à realidade do protótipo. Na prática, após a montagem do transformador, são feitos alguns ensaios no transformador, como teste de relação de espiras (relação de transformação), teste da polaridade das ligações do transformador e a sequência das fases. Na simulação, o transformador é excitado com suas condições nominais de excitação e alimentado pela carga nominal, e pela análise das correntes e tensões é verificada a fidelidade do projeto com a fabricação.

A figura a seguir mostra a malha de elementos finitos analisada numa região finita para o transformador de potência no software Maxwell.

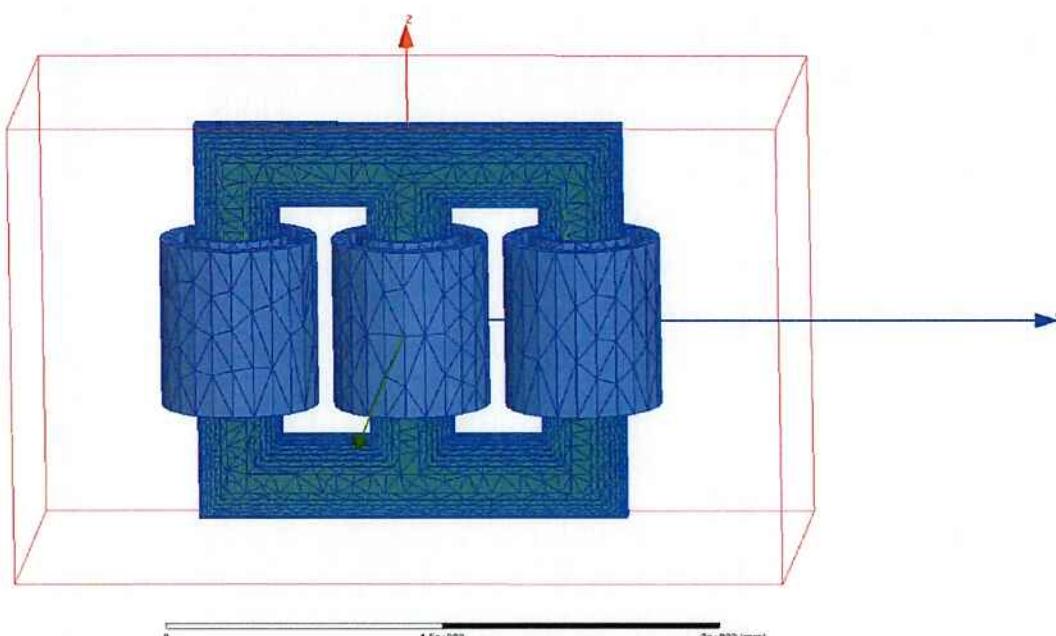


Figure 40 - Malha do protótipo do Transformador

A tabela 9 especifica as condições para qual o transformador foi projetado para operar em condição nominal. Mais detalhes podem ser observados no Anexo A e no Anexo B na folha de cálculo e placa de identificação respectivamente.

Os dados detalhados da simulação da operação nominal podem ser observados no Anexo I. A tabela abaixo sintetiza os dados da operação nominal na condição de regime permanente.

Parâmetro	Projeto	Simulação	Desvio [%]
Potência [MVA]	15	15	-
Tensão AT [kV]	138	137,37	-0,4565
Tensão BT [kV]	13,8	13,74	-0,4349
Relação de Transformação	10	9,98	-0,2
Indução Magnética [T]	1,7	1,6	-5,8
Perdas em Vazio [kW]	17,32	21,17	+22,22
Perdas em Carga [kW]	56,39	54,14	-3,99
Perdas Totais [kW]	73,71	75,31	+2,17

Tabela 19 - Dados simulados de operação nominal do transformador

A tabela 18 nos mostra que o transformador possui níveis de tensão dentro dos limites especificados pela norma técnica ABNT NBR 5380, aonde os limites de tensão não devem ultrapassar $\pm 0,5\%$ para a AT e para a BT. Também podemos notar que as perdas em carga se mostraram próximas, em relação às calculadas. Contudo a perda em vazio se mostrou um pouco diferente das perdas em carga. Isso se deve ao fato de que a característica isotrópica do material utilizado para simulação do núcleo magnético requereu dimensionamento especial do material magnético do núcleo. A característica isotrópica requereu que para se compensar a perda da capacidade magnética do núcleo, fosse aumentada a permeabilidade magnética do núcleo e fosse selecionadas para a simulação que não se considerasse perdas no material do núcleo. Ademais, para realizar uma coleta de dados menos distorcidos, foi realizada uma simulação em 2D ao invés de 3D. Assim sendo, as perdas em vazio “simuladas” foram calculadas a partir da metodologia utilizada no cálculo das perdas do projeto. Isso explica o grande desvio entre o valor projetado e o valor simulado. Esse desvio é carregado para as perdas totais.

Com base nos resultados da simulação nominal, pode garantir para o cliente perdas em vazio da ordem de 25kW e perdas em carga da ordem de 60kW. A garantia de perdas é muito importante, pois o não cumprimento da especificação das perdas do transformador através de medição pode ocasionar multa para o fabricante de transformadores de potência.

Os gráficos apresentados no Anexo I mostram a evolução dos parâmetros elétricos do transformador ao longo do tempo para a operação nominal do transformador de potência trifásico. Pode-se observar a evolução dos parâmetros desde o instante da excitação até o transformador tender para o regime permanente.

A seguir é apresentada a distribuição de campo magnético no transformador durante o regime permanente.

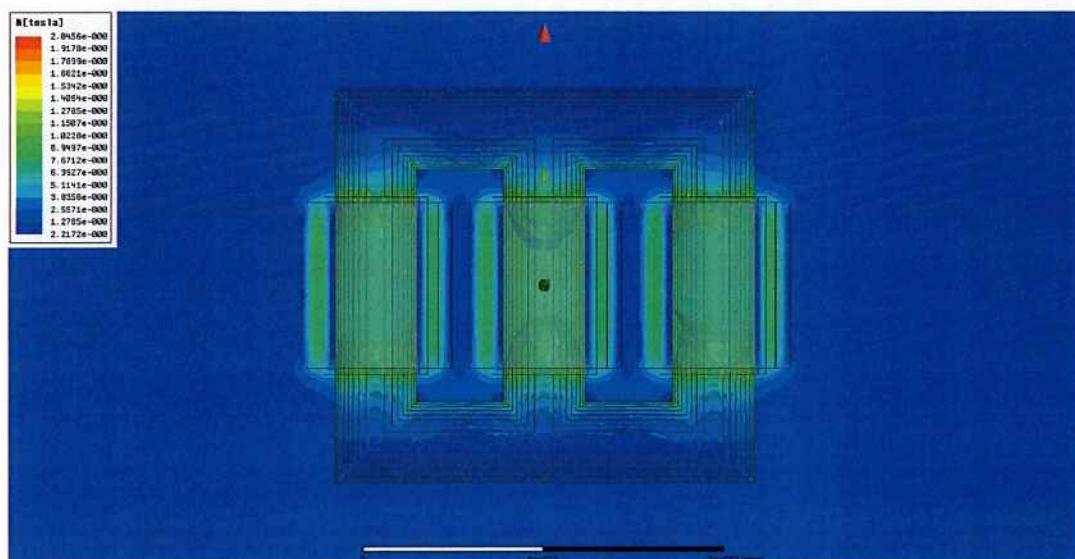


Figura 41 - Distribuição de Campo Magnético durante Operação Nominal

Ao se analisar a figura 40, podemos perceber que na seção transversal à meia altura do enrolamento, obteve-se o valor de indução magnética de 1,6T. Ademais, pode-se notar que nas quinas internas das janelas do núcleo do transformador houve uma maior concentração de fluxo magnético, esse fluxo magnético causa saturamento local, dessa forma o incremento da perda no ferro é esperado, mas não é preocupante, pois são saturações localizadas em área relativamente pequena.

Um fato inesperado foi a ausência de fluxo de dispersão. Como esse transformador possui baixa impedância, não era esperado que houvesse muito fluxo de dispersão, porém por outro lado, também não era esperado que não houvesse nada de fluxo de dispersão.

A seguir é apresentado o sentido e magnitude das correntes nos enrolamentos dos durante o regime permanente.

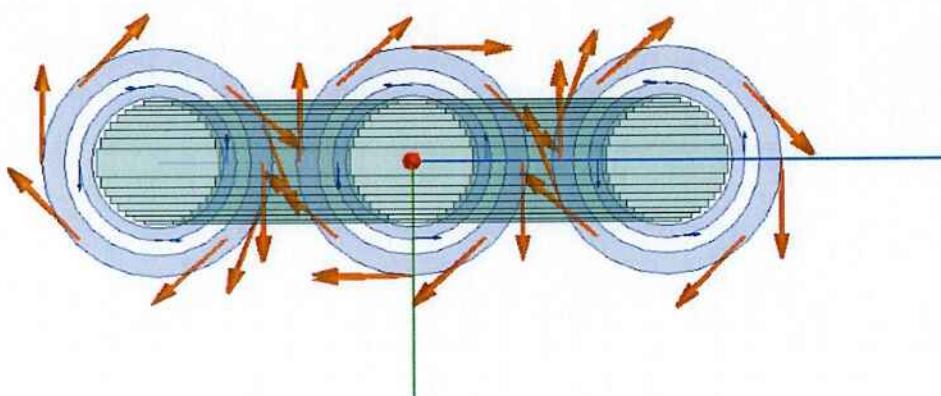


Figura 42 - Sentido das correntes de excitação na operação nominal

O sentido das correntes nos enrolamentos é oposto, pois as bobinas são enroladas no mesmo sentido, dessa forma, com a polaridade entre bobinas positivas enquanto entra corrente no ponto da bobina AT, a corrente saí pelo ponto da bobina BT.

A seguir é apresentada a intensidade e distribuição das forças magnéticas nos enrolamentos durante o regime permanente.

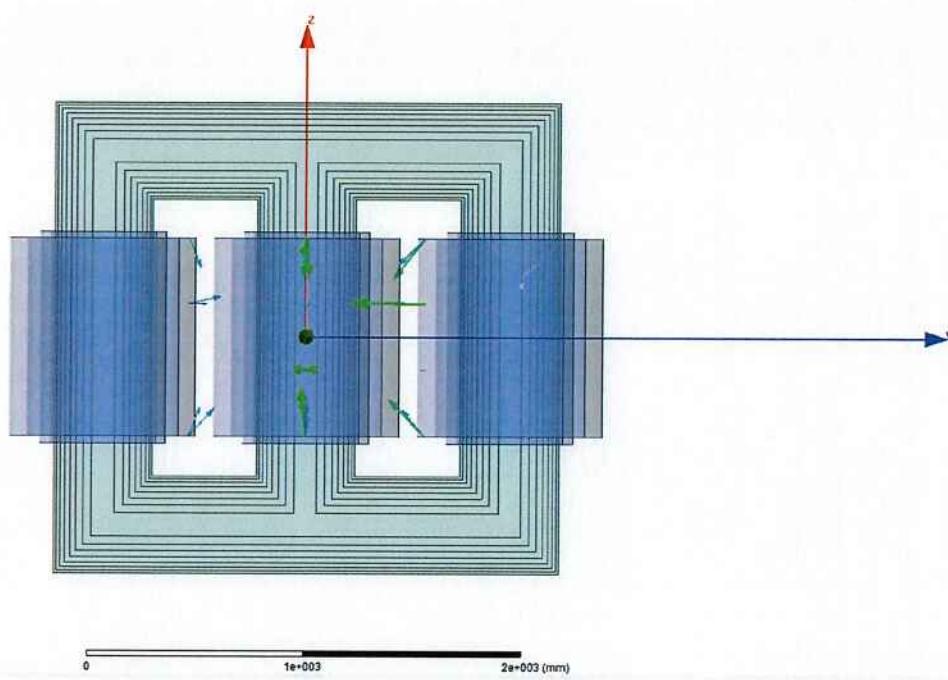


Figura 43 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante operação nominal

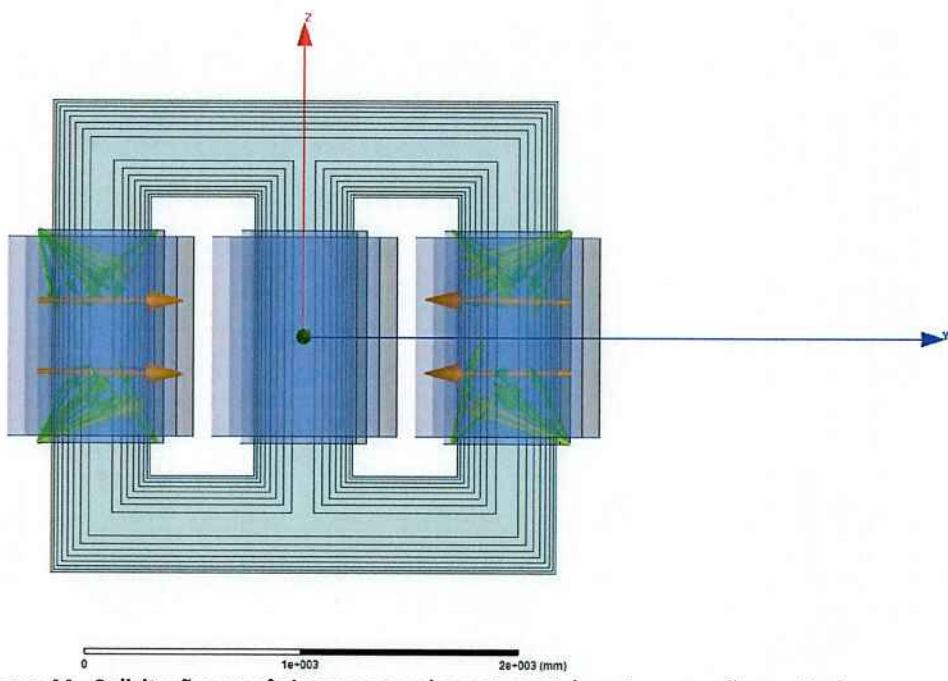


Figura 44 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante operação nominal

A partir da análise das solicitações mecânicas, podemos perceber que tanto para BT, quanto para a AT, possui relativa baixa intensidade. O enrolamento AT, como

esperado, apresenta forças de compressão, enquanto o enrolamento BT apresenta forças de tração.

A partir da análise da operação nominal ao longo do tempo, foram obtidos todos os parâmetros do transformador em todos os instantes de tempo, desde o início da excitação, até o entrar em regime permanente. Nas condições críticas de operação do transformador foram solicitadas as seguintes grandezas:

Parâmetro	Alta Tensão	Baixa Tensão
Força Radial [kN]	35	3,5
Força Axial [kN]	37	7,5

Tabela 20 - Esforço mecânico no enrolamento durante operação nominal em regime

9.3 Simulação Curto Circuito Fase-Terra

A simulação da operação curto fase terra tem como objetivo simular se as solicitações máximas na qual o transformador pode vir a operar na situação desse curto, porém unicamente com objetivo didático, pois a isolação será toda dimensionada a partir da condição de operação nominal e curto trifásico. Os dados detalhados da simulação da operação nominal podem ser observados no Anexo J.

A tabela 20 especifica as condições calculadas e simuladas para qual o transformador opera em curto circuito tipo fase terra.

		Teórico	Simulado	Desvio [%]
Transitório	Corrente no primário [A]	-1151,01	-1085,42	-5,70
Regime	Corrente no primário [A]	464,09	452,44	-2,51

Tabela 21 - Corrente de curto fase terra do transformador

Os gráficos apresentados no Anexo J mostram a evolução dos parâmetros elétricos do transformador ao longo do tempo para a situação de curto circuito fase terra. Pode-

se observar a evolução dos parâmetros desde o instante da excitação até o transformador tender para o regime permanente.

A seguir é apresentada a distribuição de campo magnético no transformador durante o instante de maior solicitação do transitório.

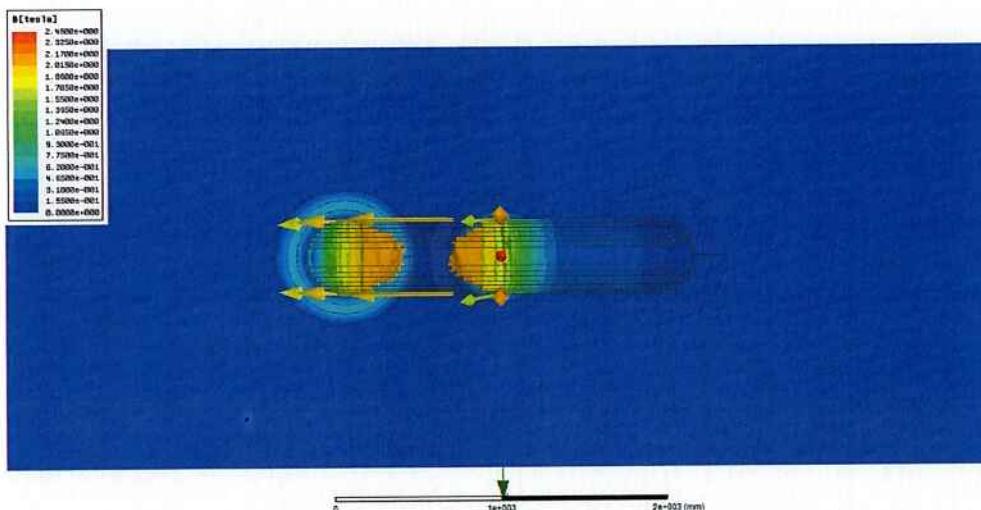


Figure 45 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Fase Terra (Vista Superior)

A figura acima nos mostra que ocorre saturação do núcleo na perna em que houve o curto circuito. A corrente na alta tensão (curto circuito), uma vez que não consegue induzir corrente na baixa tensão equivalente, gera uma força magneto motriz que faz com que sejam induzidas correntes no núcleo e aumentando a indução. Para essa simulação não foi considerado o tanque do transformador. Se caso esse tivesse sido considerado, seriam induzidas correntes no mesmo.

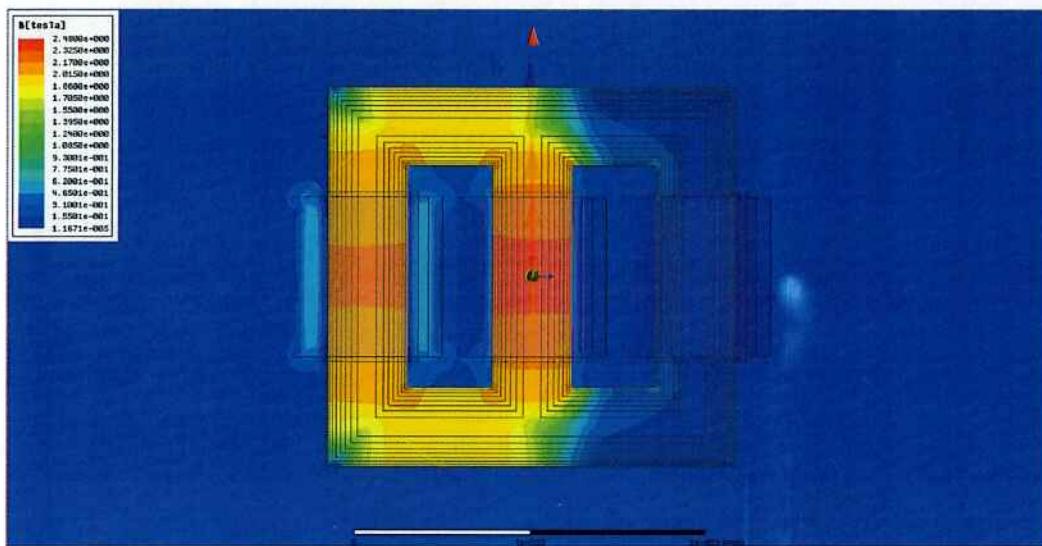


Figura 46 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Fase Terra (Vista Frontal)

Ao analisar a figura acima, podemos constatar que há um aumento do fluxo de dispersão do transformador, isto é, da quantidade de fluxo que passa por fora do núcleo.

A seguir é apresentado o sentido e magnitude das correntes nos enrolamentos dos durante o instante de maior solicitação do transitório.

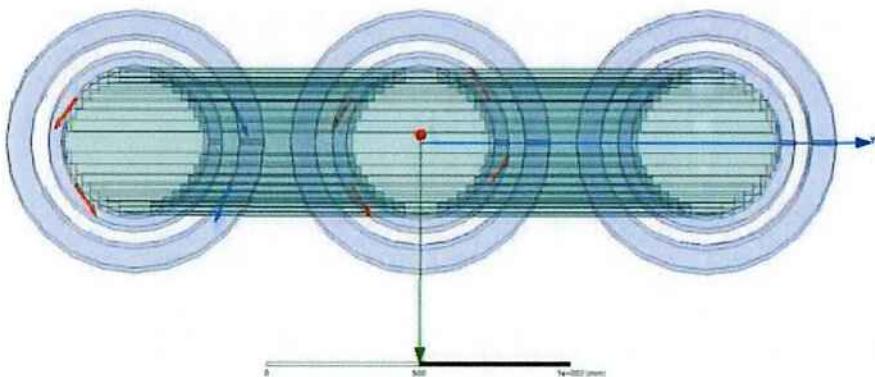


Figura 47 - Sentido das correntes de excitação no curto fase terra

A seguir é apresentada a intensidade e distribuição das forças magnéticas nos enrolamentos durante o instante de maior solicitação do transitório.

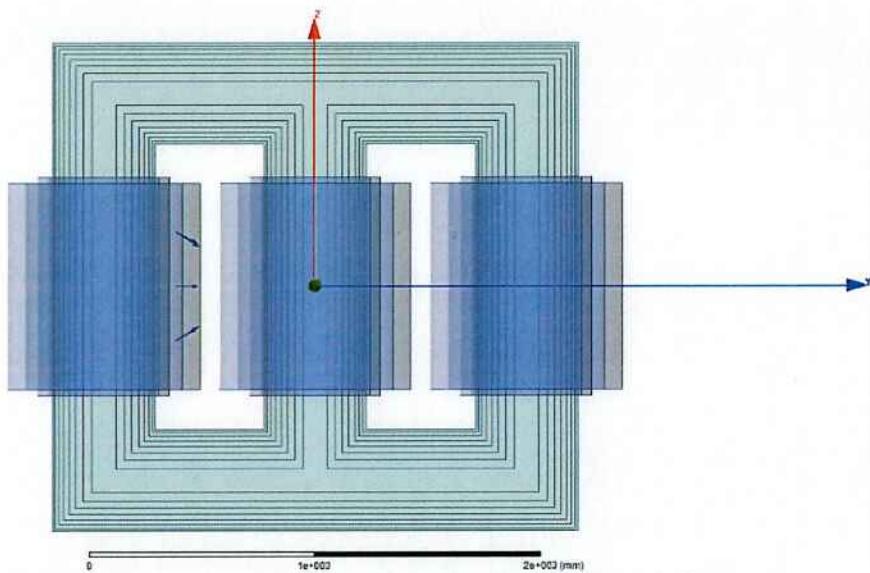


Figura 48 - Solicitações mecânicas no enrolamento AT durante curto fase terra

Como pode se observar na figura acima, a bobina de alta tensão é submetida a esforços de tração radialmente e de compressão axialmente. Esse comportamento era esperado, conforme a regra da mão direita e o sentido da corrente.

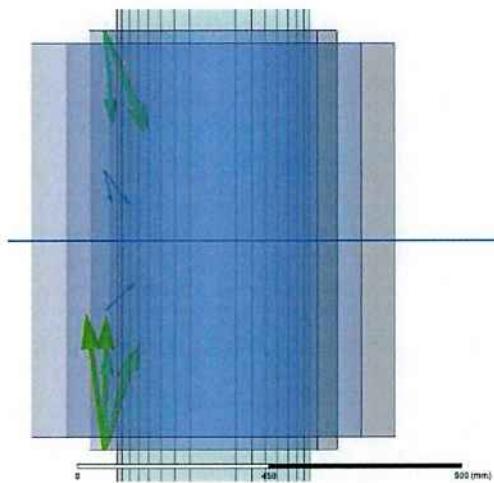


Figura 49 - Solicitações mecânicas no enrolamento BT durante curto fase terra

Como pode se observar na figura acima, a bobina de baixa tensão é submetida a esforços de compressão radialmente e axialmente. Esse comportamento era esperado, conforme a regra da mão direita e o sentido da corrente.

A partir da análise do curto circuito ao longo do tempo, foram obtidos todos os parâmetros do transformador em todos os instantes de tempo, desde o início da excitação, até o entrar em regime permanente. Nas condições críticas de operação do transformador foram solicitadas as seguintes grandezas:

Parâmetro	Alta Tensão	Baixa Tensão
Força Radial [kN]	250	30
Força Axial [kN]	40,63	631

Tabela 22 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto fase terra

9.4 Simulação Curto Circuito Dupla Fase

A simulação da operação curto dupla fase tem como objetivo simular se as solicitações máximas na qual o transformador pode vir a operar na situação desse curto, porém unicamente com objetivo didático, pois a isolação será toda dimensionada a partir da condição de operação nominal e curto trifásico. Os dados detalhados da simulação da operação nominal podem ser observados no Anexo K.

A tabela 22 especifica as condições calculadas e simuladas para qual o transformador opera em curto circuito tipo dupla fase.

		Teórico	Simulado	Desvio [%]
Transitório	Corrente no secundário [A]	-11754,95	-10935,32	-6,97
Regime	Corrente no secundário [A]	6698,63	7224,75	+7,85

Tabela 23 - Corrente de curto dupla fase do transformador

Os gráficos apresentados no Anexo K mostram a evolução dos parâmetros elétricos do transformador ao longo do tempo para a situação de curto circuito dupla fase. Pode-se observar a evolução dos parâmetros desde o instante da excitação até o transformador tender para o regime permanente.

A seguir é apresentada a distribuição de campo magnético no transformador durante o instante de maior solicitação do transitório.

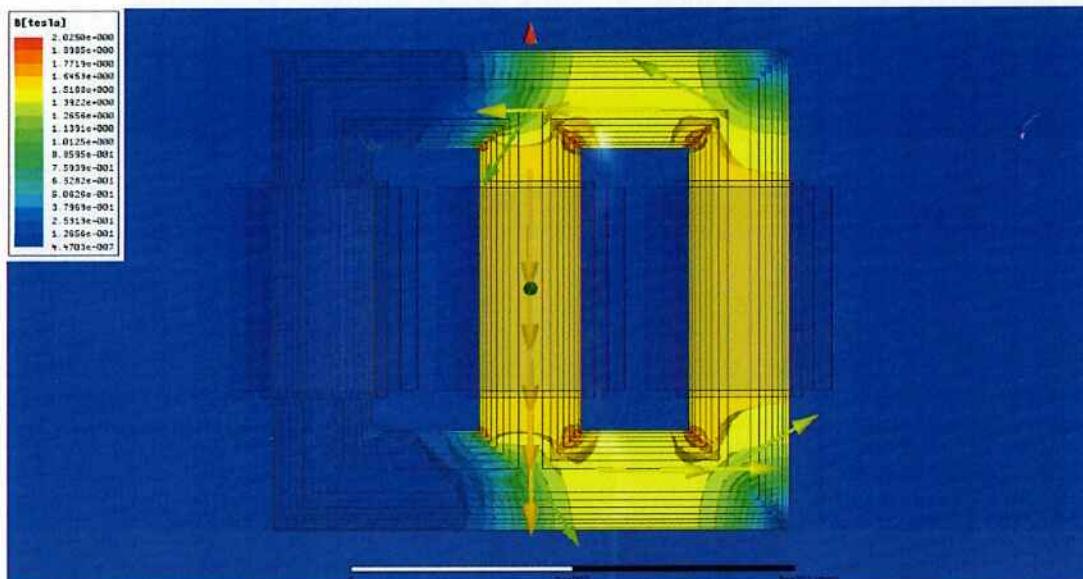


Figura 50 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Dupla Fase

A análise da distribuição de Campo Magnético durante o curto circuito dupla fase nos mostra que a indução magnética se concentrou nas pernas que ocorreram o curto circuito. Contudo a indução magnética na perna da fase A, se mostrou muito baixa. Dessa forma, baseado nas formas de onda obtidas apresentadas no Anexo K, aonde os valores de correntes se mostraram dentro dos valores esperados, podemos concluir que a escala da distribuição de campo magnético apresentada para o curto dupla fase não esteja representando fielmente a indução magnética do núcleo do transformador.

A seguir é apresentado o sentido e magnitude das correntes nos enrolamentos dos durante o instante de maior solicitação do transitório.

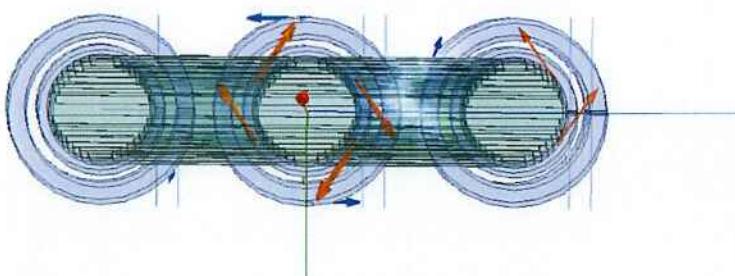


Figura 51 - Sentido das correntes de excitação no curto dupla fase

A análise do sentido das correntes no curto dupla fase mostra a inversão da corrente da fase B, tanto da alta tensão quanto da baixa tensão. Esse comportamento era esperado de acordo com a teoria.

A seguir é apresentada a intensidade e distribuição das forças magnéticas nos enrolamentos durante o instante de maior solicitação do transitório.

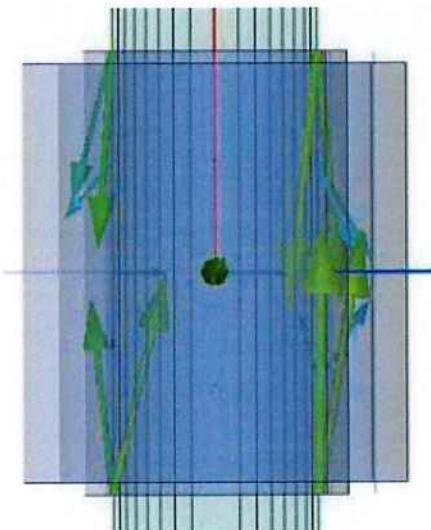


Figura 52 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos durante curto dupla fase

A partir da análise do curto circuito ao longo do tempo, foram obtidos todos os parâmetros do transformador em todos os instantes de tempo, desde o início da excitação, até o entrar em regime permanente. Nas condições críticas de operação do transformador foram solicitadas as seguintes grandezas:

Parâmetro	Alta Tensão	Baixa Tensão
Força Radial [kN]	979,2	28,2
Força Axial [kN]	217,6	678,68

Tabela 24 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto dupla fase

9.5 Simulação Curto Circuito Trifásico

A simulação da operação curto trifásico tem como objetivo simular se as solicitações máximas na qual o transformador pode vir a operar. Essa é a simulação principal para a especificação dos parâmetros a ser utilizados como base no dimensionamento da isolação do transformador. Os dados detalhados da simulação da operação nominal podem ser observados no Anexo L.

A tabela 25 especifica as condições calculadas e simuladas para qual o transformador opera em curto circuito tipo trifásico.

		Teórico	Simulado	Desvio [%]
Transitório	Corrente no secundário [A]	-13568,71	-12620,00	-6,99
Regime	Corrente no secundário [A]	7.732,03	8014,45	+3,66

Tabela 25 - Corrente de curto trifásico do transformador

Os gráficos apresentados no Anexo L mostram a evolução dos parâmetros elétricos do transformador ao longo do tempo para a situação de curto circuito trifásico. Pode-se observar a evolução dos parâmetros desde o instante da excitação até o transformador tender para o regime permanente.

A seguir é apresentada a distribuição de campo magnético no transformador durante o instante de maior solicitação do transitório.

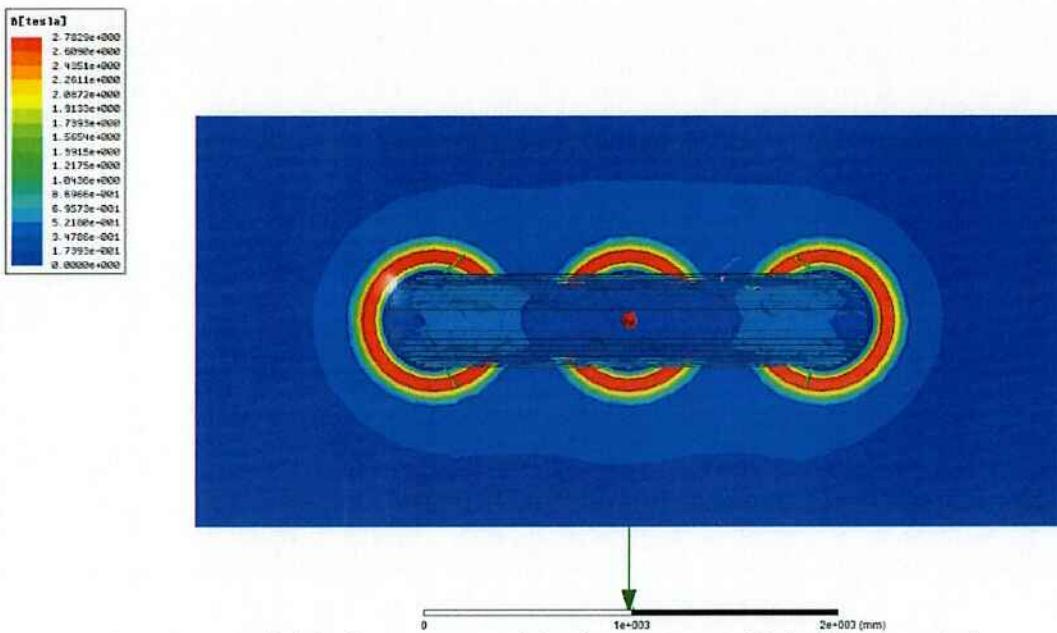


Figure 53 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Trifásico (vista superior)

O curto trifásico, por ser o curto circuito de maior potência possível para transformadores do grupo de ligação YnD1, provoca o maior fluxo de dispersão possível. Ao analisarmos a figura acima, podemos ver que o fluxo de dispersão não chega às paredes do tanque do transformador, dessa forma, não se faz necessária a necessidade de blindagem magnética nas paredes do tanque do transformador.

Ademais, pode-se notar o elevado valor de dispersão entre os enrolamentos, causando os pontos vermelhos apresentados na figura acima. Esse comportamento se mostrou inesperado, pois o valor do campo magnético entre as bobinas, isto é, em meio isolante, se apresentou com valor mais elevado do que a indução no núcleo do transformador.

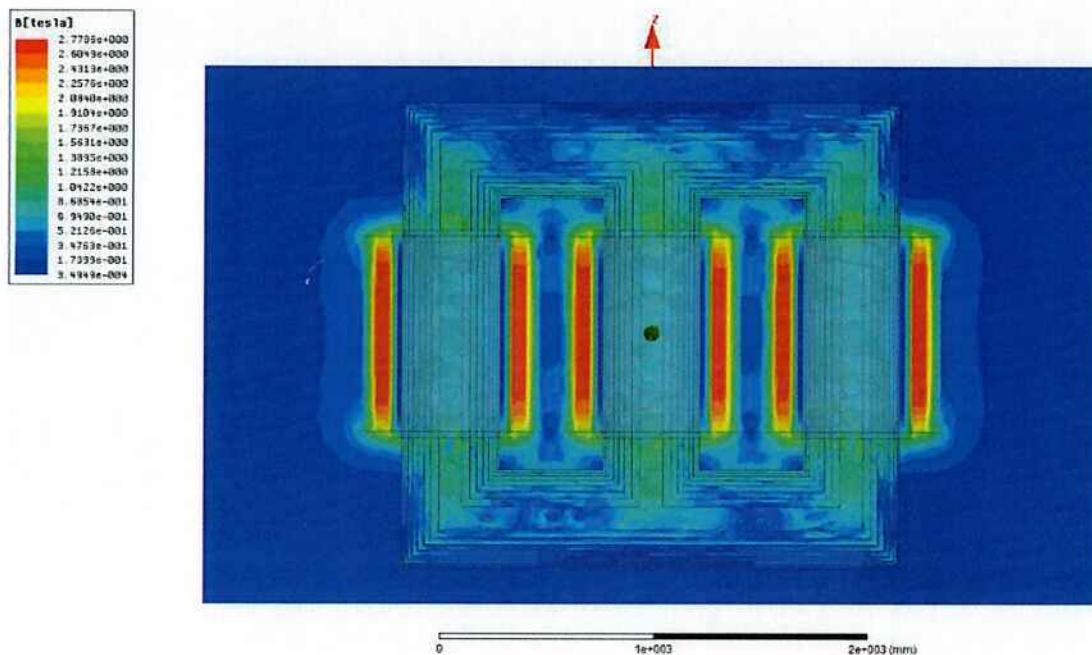


Figure 54 - Distribuição de Campo Magnético durante Curto Trifásico (vista frontal)

O comportamento geral da indução magnética no curto circuito trifásico se mostra como o esperado. A indução na seção transversal do núcleo, no meio dos enrolamentos se mostra em valor próximo de 1,57T. Com o elevado fluxo de dispersão, é esperado pontos de saturação nas quinas interiores das janelas do núcleo magnético.

A seguir é apresentado o sentido e magnitude das correntes nos enrolamentos dos durante o instante de maior solicitação do transitório.

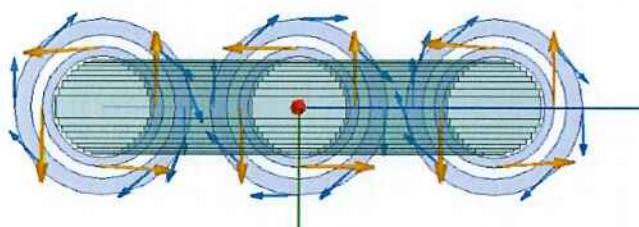


Figura 55 - Sentido das correntes de excitação no curto trifásico (vista superior)

A figura acima mostra que o comportamento das correntes elétricas durante o curto circuito trifásico se mostraram como o esperado, isto é, a corrente da alta tensão possuiu sentido contrário à corrente da baixa tensão.

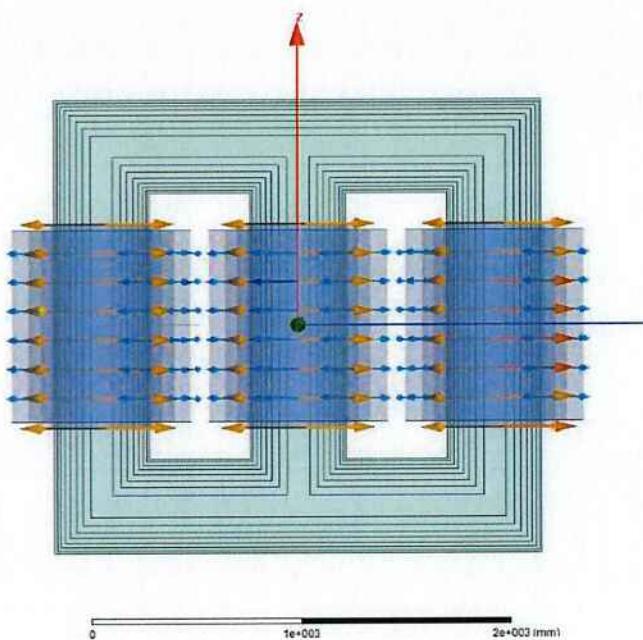


Figura 56 - Sentido das correntes de excitação no curto trifásico (vista frontal)

A seguir é apresentada a intensidade e distribuição das forças magnéticas nos enrolamentos durante o instante de maior solicitação do transitório.

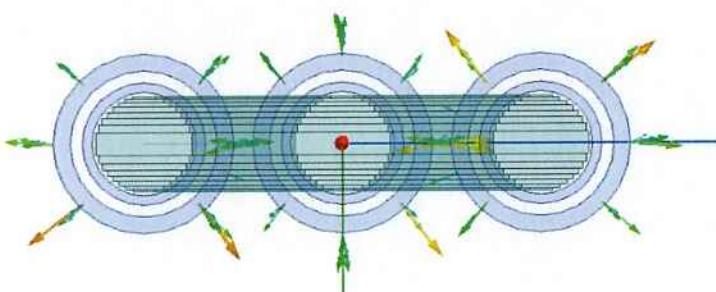


Figura 57 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante curto trifásico (vista superior)

A figura acima mostra a ação das forças radiais no enrolamento de alta tensão durante o curto circuito trifásico. O comportamento das forças provocam solicitações de tração nas bobinas.

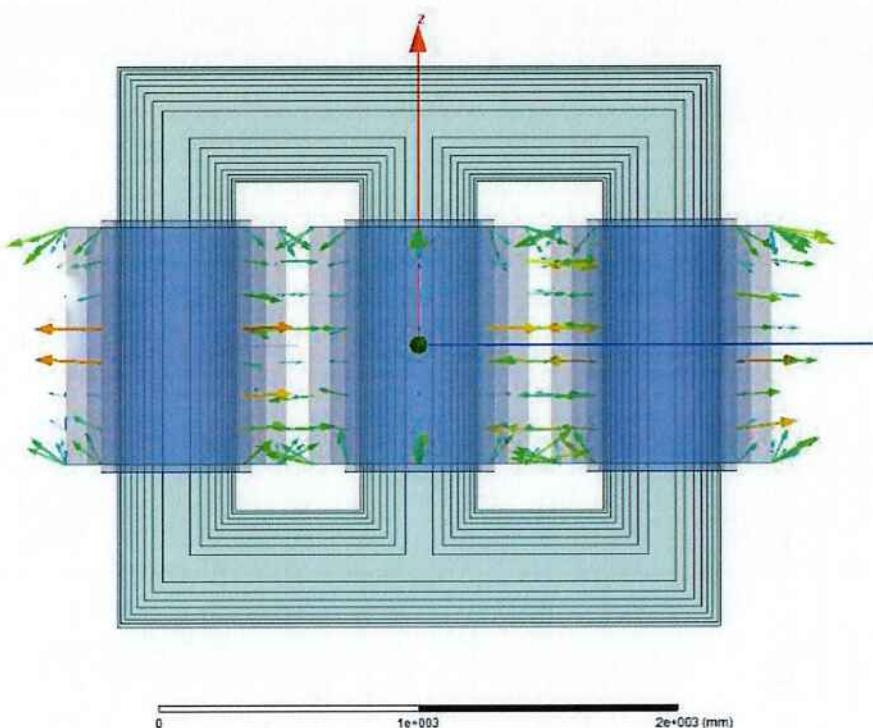


Figura 58 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos AT durante curto trifásico (vista frontal)

A figura acima mostra a ação das forças no enrolamento de alta tensão durante o curto circuito trifásico. O comportamento das forças provocam solicitações de tração nas bobinas radialmente e solicitações de compressão nas bobinas axialmente. Esse comportamento era esperado para essa situação, conforme a regra da mão direita.

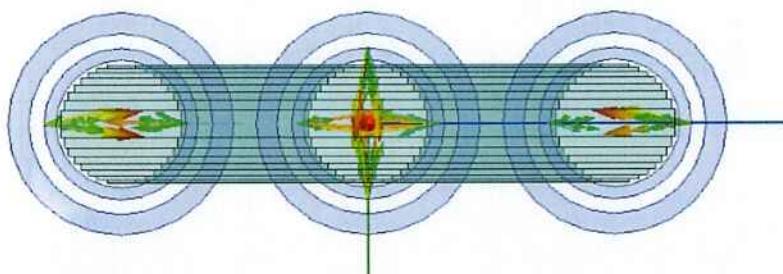


Figura 59 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante curto trifásico (vista superior)

A figura acima mostra a ação das forças radiais no enrolamento de baixa tensão durante o curto circuito trifásico. O comportamento das forças provocam solicitações de compressão nas bobinas.

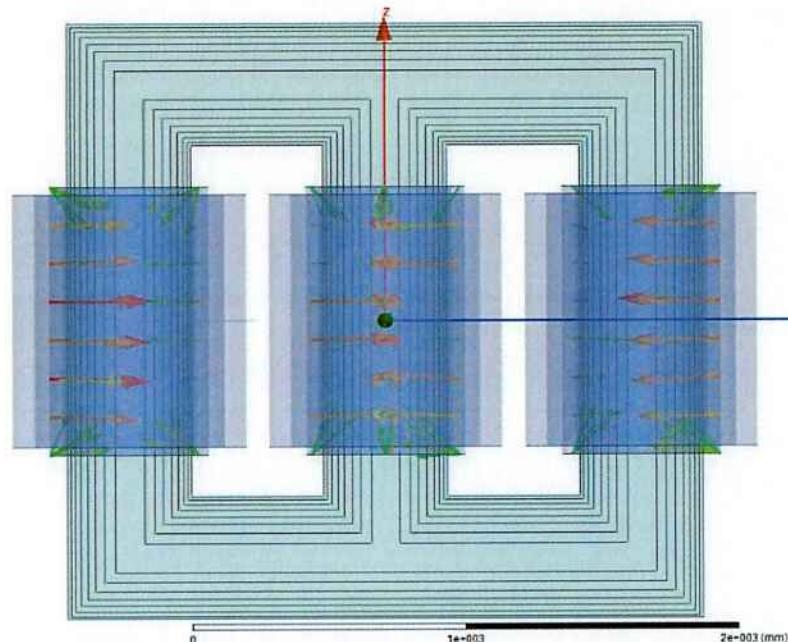


Figura 60 - Solicitações mecânicas nos enrolamentos BT durante curto trifásico (vista frontal)

A figura acima mostra a ação das forças no enrolamento de baixa tensão durante o curto circuito trifásico. O comportamento das forças provocam solicitações de compressão nas bobinas radialmente e axialmente. Esse comportamento era esperado para essa situação, assim como no caso simétrico da operação nominal do transformador, conforme a regra da mão direita.

Nas condições críticas de operação do transformador foram solicitadas as seguintes grandezas:

Parâmetro	Alta Tensão	Baixa Tensão
Força Radial [kN]	750000	812500
Força Axial [kN]	204000	450000

Tabela 26 - Máximo esforço mecânico no enrolamento durante curto trifásico

10 Dimensionamento da Isolação

O projeto de um transformador de potência, somente considerando apenas o dimensionamento dos parâmetros elétricos do transformador não possui validade prática. O transformador deve suportar mecanicamente todos os esforços internos que ocorrem tanto de sua operação normal, quanto de rápidas exigências de grande intensidade, como forças consequentes de curto-circuitos.

Segundo a norma técnica ABNT NBR5356-5, transformadores, junto com todos os equipamentos e acessórios, devem ser projetados e construídos para resistir sem danos, aos efeitos térmicos e dinâmicos das correntes de curto circuito externo nas condições de sobrecorrentes. Ainda pela NBR5356-5, temos que para transformadores de dois enrolamentos separados, normalmente só a corrente de curto circuito trifásico é levada em conta, pois esse caso cobre todos os outros possíveis casos de falha.

O dimensionamento da isolação de um transformador é feita, durante o projeto do transformador, na etapa do cálculo elétrico. O dimensionamento da isolação requer um grande conhecimento do calculista, pois o transformador deve possuir as características elétricas especificadas para suportar mecanicamente todas as solicitações oriundas de qualquer tipo de força consequente de faltas internas ou externas ao transformador e, por fim, contar com um bom sistema de refrigeração, aonde para tal o transformador possuir um dimensionamento no qual o enrolamento possua espaço a circulação de óleo, para que assim o óleo isolante possa resfriar o enrolamento fazendo com que a isolação se degrade menos com o tempo.

O que podemos considerar como isolação no transformador? A isolação no transformador pode ser separada em três grupos: papel, calços e óleo. A seguir será explicada qual a função de cada tipo de isolação no transformador.

O papel é uma isolação sólida de baixa densidade, feita a partir de um polímero de celulose que na prática pode ser papel Kraft, papel termoestabilizado ou papel de composição aramidica. O papel é o isolante elétrico dos condutores, e possui a função

de minimizar os campos elétricos entre os condutores adjacentes, para que não ocorram descargas parciais entre condutores.

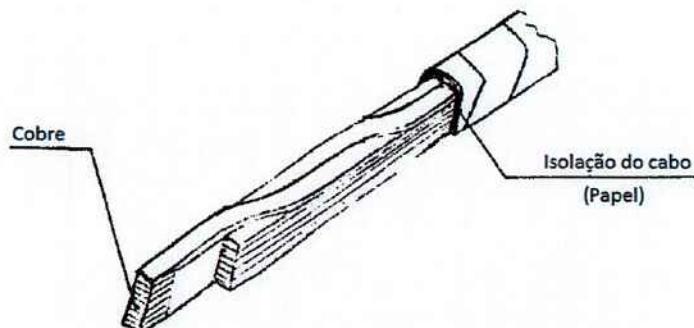


Figura 61 - Condutor de cobre e isolamento de papel

	Isolação Kraft (55°C)	Isolação Aramida (95°C)
Resistência ao Rasgamento [N/mm]	2,5	5,0
Elongamento [%]	12	10
Resistência à Tração [N/mm ²]	70	100
Tensão de Ruptura [kV/mm]	60	65

Tabela 27 - Propriedades de papeis isolantes

Os calços e tiras são geralmente feitos com o mesmo material do papel, porém com alta densidade. Os calços isolam as espiras (ou discos, dependendo do tipo de bobina) entre si, enquanto as tiras fazem exclusivamente o suporte mecânico interno das bobinas. A função elétrica dos calços é minimizar campo elétrico entre as espiras. Após o dimensionamento elétrico, os calços devem ser dimensionados para suportar mecanicamente as solicitações nos enrolamentos. Dessa forma, caso o calço dimensionado necessite de maiores dimensões, além do que foi dimensionada eletricamente, essa deverá adequada nessa etapa. Ademais, após o dimensionamento mecânico, o calço deve atender as exigências térmicas, para que a circulação de óleo interna à bobina refirgere o sistema de isolamento do transformador. Por isso, pode haver um redimensionamento dos calços para aperfeiçoar a refrigeração.

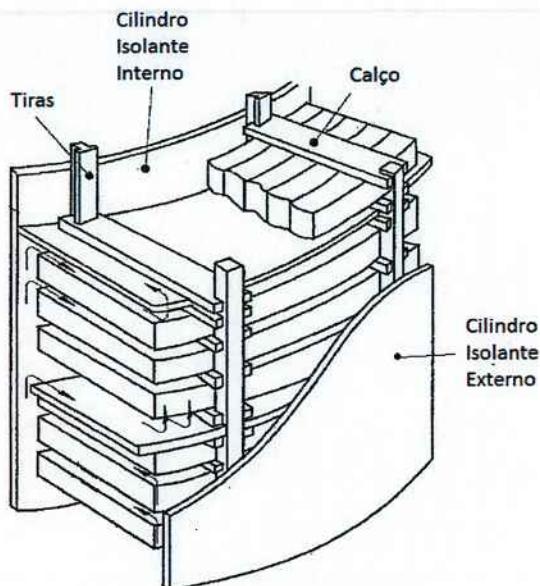


Figura 62 - Isolação da bobina

	Chapa Presspahn (65°C)	Chapa Aramida (95°C)
Resistência à Flexão [N/mm ²]	230	250
Resistência à Tração [N/mm ²]	300	430
Resistência à Compressão [N/mm ²]	275	414
Capacidade Dielétrica [kV/mm]	40	58,2

Tabela 28 - Propriedades de polímeros de alta densidade isolantes

O óleo do transformador possui finalidade de refrigerar o núcleo e os enrolamentos, além de funcionar como isolante dielétrico. Usualmente, há basicamente diversos tipos de óleos isolantes como alternativa para se refrigerar transformadores de potência. Entre eles podemos citar o óleo mineral, o óleo vegetal e o silicone. Contudo, como o software Maxwell não apresenta dados térmicos da operação do transformador, não será abordada quantitativamente a questão da refrigeração desse transformador.

Características	Unidade	Óleo Vegetal	Óleo Mineral
Viscosidade 20°C	cst	150 máximo	25 máximo
Ponto de Fulgor	°C	275 mínimo	140 mínimo
Ponto de Combustão	°C	300 mínimo	160 mínimo
Ponto de Fluidez	°C	-10 máximo	-39 máximo
Rigidez Dielétrica	kV	42 mínimo	42 mínimo

Rigidez Dielétrica ²	kV	30 mínimo	30 mínimo
Fator de Perdas 25°C	%	0,20 máximo	0,05 máximo
Teor de Água	mL/Kg	200	35

Tabela 29 - Propriedades de óleos isolantes

Um ponto importante a ser analisado é a suportabilidade mecânica do cobre durante os esforços de curtos circuitos. O cobre é um metal, que pertence ao grupo 11 (1B) da Tabela Periódica dos Elementos. É um material de coloração avermelhada, bom condutor de eletricidade e, mecanicamente falando, é dúctil e maleável. Devido a essas propriedades mecânicas, a dureza do cobre deve ser levada em consideração no dimensionamento da isolação. Isto é, os esforços de curtos circuitos podem deformar o cobre, e como existe uma variedade de composições de cobre no mercado, a dureza do cobre deve ser dimensionada durante o cálculo elétrico para que o transformador suporte mecanicamente os eventos de curtos circuitos.

Em suma, o dimensionamento da isolação de um transformador deve primeiramente contemplar os requisitos elétricos, ou seja, a principal prioridade do projeto do transformador é o fator elétrico, podemos dizer que basicamente o objetivo do dimensionamento elétrico é minimizar o campo elétrico entre as espiras para que não ocorram descargas parciais. O segundo item na prioridade do dimensionamento da isolação é a suportabilidade mecânica, pois tanto a isolação quanto o condutor devem suportar as solicitações mecânicas provenientes de curtos circuitos. Por fim, deve se projetar o transformador para que ele suporte termicamente o carregamento que lhe é imposto, de modo que o óleo possa circular de maneira que o núcleo e os enrolamentos sejam refrigerados, e assim, haja menor perda de vida do transformador.

10.1 Capacidade Elétrica de isolamento

O estudo do dimensionamento elétrico da isolação de transformadores de potência deve ser realizado de modo a minimizar campos elétricos entre enrolamentos e núcleo do transformador.

No projeto do transformador de potência estudado nesse trabalho, foi considerado campo elétrico admissível de 2,43 kV/mm entre enrolamentos e jugo, e foi considerado campo elétrico admissível de 6,90 kV/mm entre núcleo-enrolamentos e enrolamentos-enrolamentos. Os valores considerados consideram isolação de celulose e óleo isolante, contudo, durante a simulação esses valores não puderam ser analisados devido à limitação de processamento do computador utilizado para se considerar o óleo isolante. O software Maxwell permite que o usuário especifique o material óleo para simulação, porém, como o óleo ficaria com forma geométrica muito complexa, o computador utilizado não possuia capacidade suficiente para se considerar o óleo isolante. Como a principal função do óleo é a refrigeração do transformador (e nesse trabalho não é analisada a capacidade térmica desse transformador), foram consideradas apenas as condições teóricas de campo elétrico admissível.

Na prática, a capacidade elétrica de isolamento do transformador é verificada através dos ensaios dielétricos. Segundo a norma ABNT NBR 5380, os ensaios dielétricos em transformadores de potência devem ser realizados de acordo com as especificações das seguintes normas técnicas ABNT: NBR 5389, NBR 6936 e NBR 6937. A figura a seguir mostra a característica dos ensaios elétricos especificados pela norma ABNT.

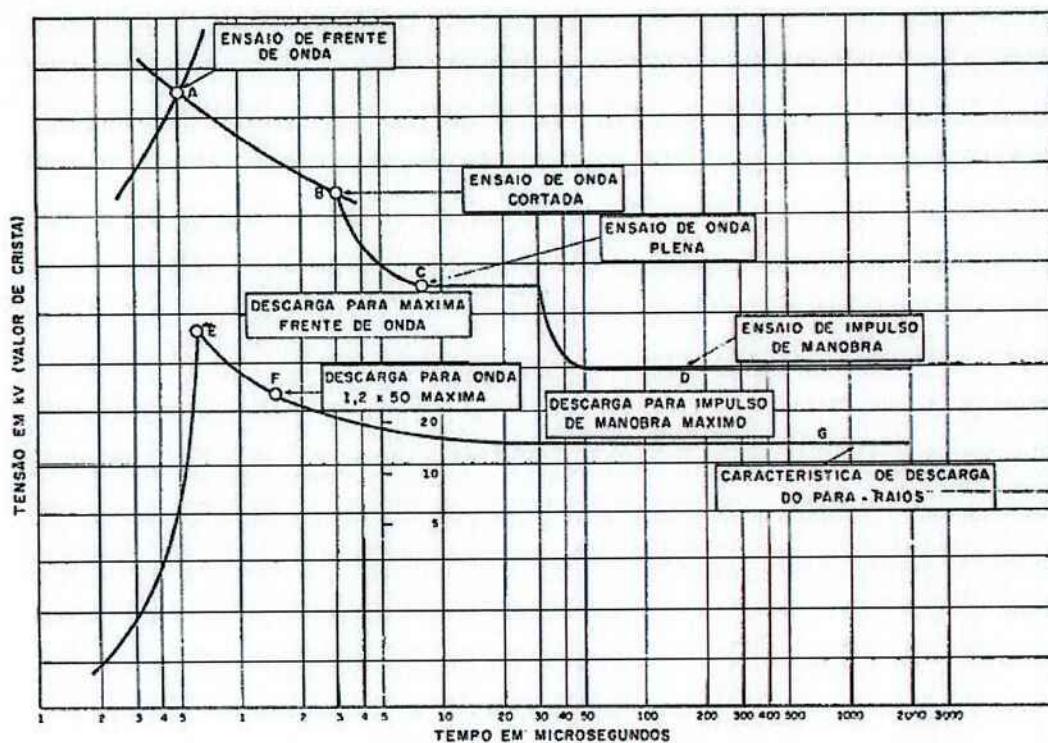


Figura 63 - Curva Típica Tensão versus Tempo para coordenação da proteção.

Outro fator que deve ser considerado é a questão da impedância do transformador. A impedância do transformador de potência é especificada durante a etapa do cálculo elétrico. A norma especifica que transformador de potência de 15MVA deve ter impedância mínima de 8%. A figura a seguir mostra os limites de impedância para transformadores de potência segundo a norma IEC 60076-5, que é igual à norma técnica ABNT NBR 5356-5.

Short-circuit impedance at rated current		
Rated power kVA		Minimum short-circuit impedance %
25	to	630
631	to	1 250
1 251	to	2 500
2 501	to	6 300
6 301	to	25 000
25 001	to	40 000
40 001	to	63 000
63 001	to	100 000
above		>12,5

NOTE 1 Values for rated power greater than 100 000 kVA are generally subject to agreement between manufacturer and purchaser.
 NOTE 2 In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating.

Figura 64 - Valores mínimos de impedância

Pela Lei de Ohm, quanto menor for a impedância, maior deve ser a corrente, para um mesmo valor de tensão. Quanto maior a corrente, maiores as forças de curto circuitos. Portanto, a impedância do transformador é responsável pelas solicitações mecânicas que o transformador será sujeito a ser solicitado. Quanto maior a impedância, menor as exigências mecânicas no interior do transformador.

O transformador desse trabalho foi projetado com o mínimo valor especificado pela norma técnica ABNT 5380, ou seja, a impedância é de 8%, portanto ele estará sujeito à máxima solicitação mecânica para transformadores de 15MVA.

Highest voltage for equipment, U_m kV	Short-circuit apparent power MVA	
	Current European practice	Current North American practice
7,2; 12; 17,5 and 24	500	500
36	1 000	1 500
52 and 72,5	3 000	5 000
100 and 123	6 000	15 000
145 and 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
382	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTE If not specified, a value between 1 and 3 should be considered for the ratio of zero-sequence to positive-sequence impedance of the system.

Figura 65 - Máxima potência de curto circuito admissível

Em transformadores de potência a isolação magnética não é considerada para condutores. Porém o valor a indução magnética máxima pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$B = 1,78 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{N \cdot I}{h_w} \quad [T] \quad (19)$$

Onde:

Hw: Altura do enrolamento

10.2 Capacidade Mecânica de isolamento

A circulação de corrente elétrica nas espiras da bobina, na presença de campo magnético concatenado com o núcleo do transformador, faz com que as espiras da bobina fiquem sujeitas a forças eletromagnéticas.

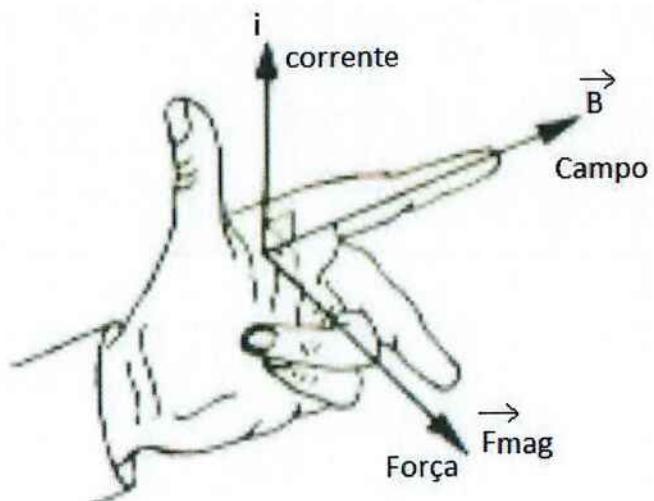


Figura 66 - Regra da mão direita

Em termos gerais, um elemento de volume sujeito a uma densidade de corrente em um campo magnético gera uma força magnética:

$$dF = J \times B \, dv \quad (20)$$

A força eletromagnética é proporcional ao quadrado da corrente elétrica, pois ao aumentar a corrente elétrica, o campo elétrico induzido aumenta. Decompondo a equação 20, considerando campo magnético e densidade de corrente constante, obtemos a seguinte força eletromagnética:

$$F = Bil \sin \theta \quad (21)$$

A equação geral da força eletromagnética, considerando o transitório e a condição de regime permanente é apresentada pela equação 22.

$$F(t) = F_m \left(\frac{1}{2} + e^{-\frac{wt}{\tau}} - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos wt + \frac{1}{2} \cos 2wt \right)$$

(22)

Onde:

F_m : Força máxima

τ : Constante de tempo

A equação temporal da força eletromagnética apresenta quatro componentes bem definidas. Pode ser observada duas componentes unidireccionais, uma constante e outra decrescente exponencialmente com o tempo, e duas componentes alternadas, uma com a componente fundamental e outra com a segunda harmônica com menor amplitude.

Uma forma simplificada de se definir a força por comprimento radial, segundo a fabricante de transformadores ABB, para dimensionamento da proteção mecânica das forças oriundas de curto circuito é dada pela expressão:

$$F = -6,9241 \times 10^{-7} \times I_{máx}^2 \times \frac{(N_2^2 - N_1^2)}{AB} \quad [\text{N/mm}] \quad (23)$$

Onde:

$I_{máx}$: Valor de pico da corrente de curto em regime

N_2 : Número de espiras do secundário

N_1 : Número de espiras da bobina do primário

AB: altura da bobina

A partir das fórmulas apresentadas acima, pode-se calcular qual a força eletromagnética que irá atuar no transformador em casos de curtos circuitos. A partir das formas obtidas em cálculo, a isolamento e proteção do transformador podem ser dimensionadas.

A isolação do transformador que deve ser dimensionada para suportabilidade mecânica dos enrolamentos do transformador são os calços e as tiras. Ademais, o condutor também deve ser dimensionado para suportar os esforços mecânicos.

Os valores típicos do material do qual são feitos os calços e as tiras são apresentados na tabela 27. A propriedade que deve ser analisada do material para se avaliar a suportabilidade mecânica do enrolamento para materiais isolantes são a tensão normal do material, isto é, a resistência a forças de tração e compressão [N/mm²]. Dessa forma, ao se calcular as forças no transformador deve-se especificar o material, considerando-se que o dimensionamento elétrico dos calços já foi feito e não podem ser diminuído.

Em geral, as propriedades dos materiais isolantes já são definidas para que suportem as solicitações mecânicas. Contudo, a suportabilidade mecânica do cobre deve ser especificada para que o fornecedor de cobre possa fabricar o condutor especialmente para resistir às exigências mecânicas dos enrolamentos.

O dimensionamento do condutor é outra etapa fundamental para que os enrolamentos sejam capazes de suportar os esforços mecânicos oriundos da operação do transformador e de curtos circuitos. Na teoria, forças mecânicas da operação nominal do transformador são praticamente desprezíveis em relação às forças de curto circuito. Em especial, as forças de curto circuito trifásico se apresentam como as mais elevadas exigências que o transformador pode vir ter de suportar. Por isso, na prática é considerado apenas o curto circuito trifásico para dimensionamento da isolação e do condutor.

No dimensionamento do condutor, deve ser especificada a tensão de produção ($\sigma_{0,2}$) para o fornecedor de condutores elétricos. Para o cobre, existem basicamente dois tipos de condutores que podem ser especificados: O cobre recocido (macio) ou o cobre endurecido (duro). A principal diferença entre esses dois tipos de cobre é a capacidade de suportar forças. Além disso, o cobre endurecido, como possui um processo de fabricação a frio, é um material que necessita ser mais trabalhado, por isso apresenta custo mais elevado que o cobre recocido. A tabela 29 mostra as principais

propriedades dos tipos de cobre para que o mesmo possa ser dimensionado e suportar as forças de curtos circuitos.

Propriedade	Unidade	Cobre recozido	Cobre endurecido
Tensão de Produção ($\sigma_{0,2}$)	N/mm ²	90	110 a 340
Tensão Máxima (σ_m)	N/mm ²	240	240 a 400
Módulo de Elasticidade	N/mm ²	$1,1 \times 10^5$	$1,1 \times 10^5$

Tabela 30 - Propriedades físicas do cobre para fabricação

A importância do bom dimensionamento do cobre é que tanto para forças radiais, quanto para forças axiais, o condutor fique bem dimensionado para suportar as forças de curtos circuitos.

A figura abaixo exemplifica o fenômeno da flambagem, que é o que pode ocorrer com um enrolamento no qual o condutor não foi bem especificado, e a bobina não suporta as forças radiais.

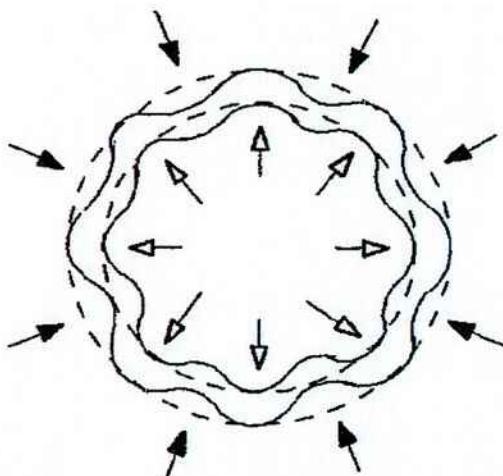


Figura 67 - Bobina sucumbindo ante as forças radiais

Quando o valor máximo de suportabilidade contra forças axiais é excedido, pode ocorrer o efeito chamado “tilt” na bobina. Durante o *tilt*, os condutores cedem de maneira zig-zague. A figura a seguir mostra a consequencia de os condutores de uma bobina não estarem dimensionados para suportar forças axiais.

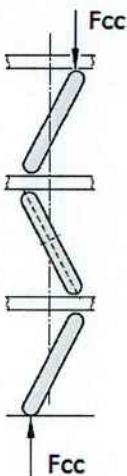


Figura 68 - Tilt nos condutores

O dimensionamento da “dureza” do cobre pode ser feito através de estudos de distribuição de forças para se analisar a resistência de materiais. A partir do modelo da situação real, pode-se definir a tensão normal do cobre em relação às forças que lhe são aplicadas.

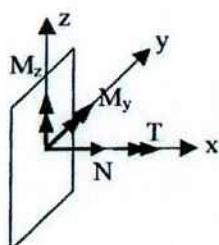


Figura 69 - Forças e momentos na seção transversal do condutor

Dessa forma, a partir da distribuição de forças nos condutores dos enrolamentos, pode-se calcular a tensão normal teórica resultante no condutor. A equação 24 mostra a forma genérica da tensão normal.

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad [\text{N/mm}^2] \quad (24)$$

Onde:

N: Força Normal à seção transversal

A: Área da seção transversal

M_z : Momento Linear em relação ao eixo z

M_y : Momento Linear em relação ao eixo y

I_z : Momento de Inércia em relação ao eixo z

I_y : Momento de Inércia em relação ao eixo y

A partir de estudos específicos em enrolamentos cilíndricos, a fabricante de transformadores ABB padronizou o cálculo da tensão normal para enrolamentos, considerando-se um transformador de dois enrolamentos e um segmento de condutor, como é mostrado na figura abaixo.

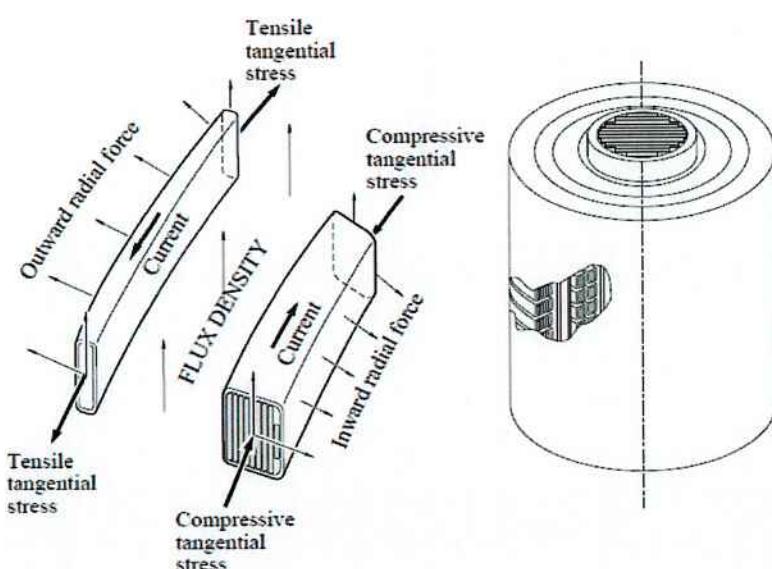


Figura 70 - Distribuição de forças em segmentos de condutores

Pela regra da mão direita, pode ser observado que a aplicação de forças em transformadores de dois enrolamentos sempre vai causar forças radiais centrípetas no enrolamento interno e forças radiais contrárias para enrolamentos externos. Ademais, há uma simetria da aplicação de forças nos condutores, como é mostrado na figura acima. Isso se deve ao fato da orientação do sentido das correntes, de modo que pela regra da mão direita, sempre o enrolamento interno terá forças centrípetas e o enrolamento externo terá forças invertidas. O diagrama Ampère-Espira abaixo mostra o comportamento genérico da força magneto-motriz nos enrolamentos nessa condição.

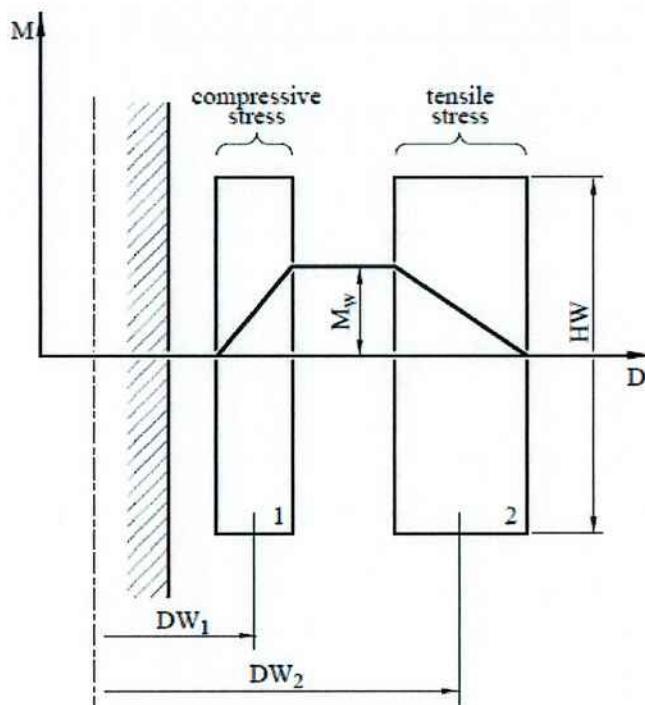


Figura 71 - Diagrama Ampère-Espira

Com base nesse modelo, a equação 24 pode ser substituída pela equação 25.

$$|\sigma_t| = 0,314 \cdot \frac{M_w}{H_{cr}} \cdot J_w \cdot D_W \cdot I_{\max}^2 \cdot 10^{-6} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (25)$$

Onde:

M_w : Módulo da força magneto-motriz [A·espira]

J_w : Densidade de Corrente (RMS) [A/mm^2]

D_W : Diâmetro médio da bobina [mm]

H_u : Altura do enrolamento [mm]

I_{\max} : Corrente de Pico [A]

Definida a tensão normal do condutor, deve-se especificar qual deve ser a tensão de produção ($\sigma_{0,2}$) do cobre, que deve ser especificada ao fornecedor. Para isso deve-se relacionar a tensão normal do condutor com a tensão de produção. A norma técnica IEC 60076-5 especifica as relações para os tipos de forças de tração, compressão e tangencial.

Forças de Tração: $\sigma_t \leq 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$

$$\sigma_t \leq 160 \text{N/mm}^2$$

Forças de Compressão: $\sigma_t \leq 0,8 \cdot \sigma_{cr}$

$$\sigma_t \leq 160 \text{N/mm}^2$$

Forças Tangenciais: $\sigma_t \leq 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$

$$\sigma_t \leq 160 \text{N/mm}^2$$

Dessa forma, a partir da análise das solicitações do condutor na condição de tração, compressão e forças tangenciais, deve-se escolher qual dentre esses é o fator de maior solicitação para o condutor da bobina e assim, pode-se obter a tensão normal de produção $\sigma_{0,2}$ e solicitar ao fabricante como deve ser fabricado o condutor a ser utilizado. O gráfico abaixo mostra a relação da tensão normal com o comprimento do condutor, mostrando as curvas típicas de alguns valores padrões de tensão normal de produção do cobre.

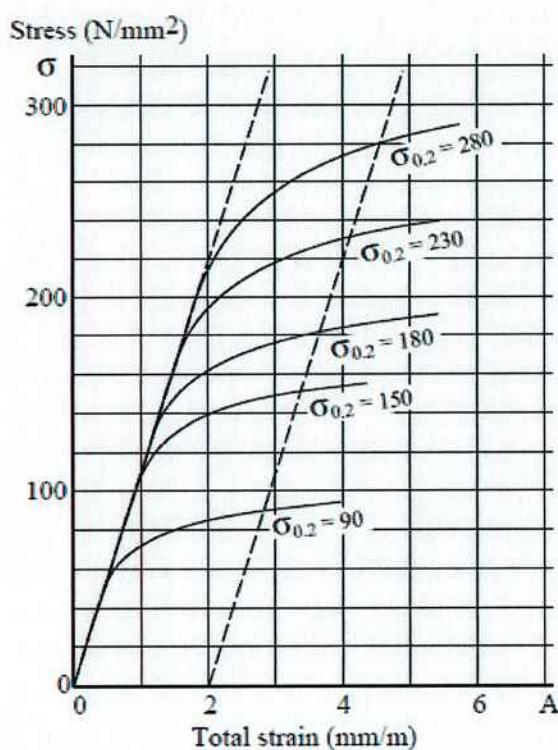


Figura 72 - Suportabilidade do cobre

10.3 Resultados

As forças magnéticas de maior intensidade são as forças de curto circuito trifásico durante a maior solicitação durante o transitório. O gráfico a seguir mostra o comportamento da força nos enrolamentos segundo a equação 22. Como se pode notar, durante o transitório, o pico da força atinge o valor de 3,0797 pu.

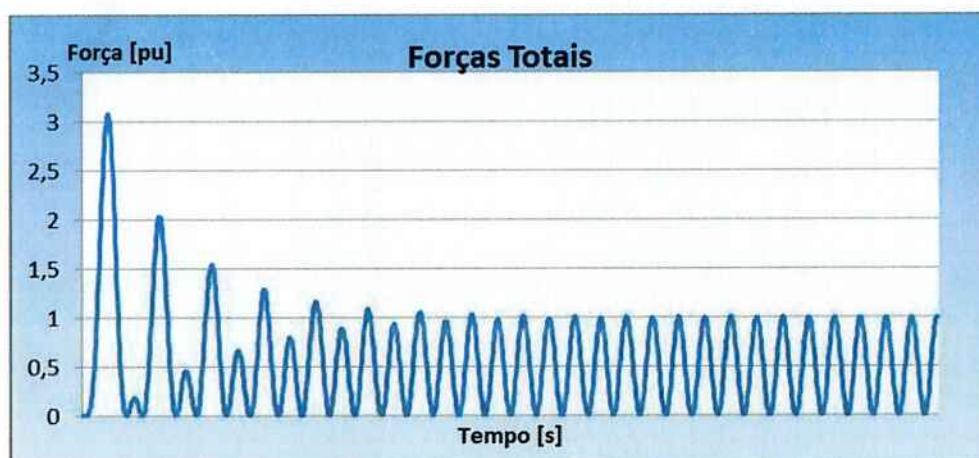


Figura 73 - Força nos enrolamentos

Por conveniência, é comum resolver as forças de curtos circuitos analisando as forças radiais e axiais, uma vez que elas produzem stressses de diferentes tipos nos enrolamentos.

A tabela abaixo mostra as forças máximas teóricas e as forças máximas simuladas para os enrolamentos de AT e BT, durante o transitório:

Tensão Normal	Teórico		Simulado	
	Axial	Radial	Axial	Radial
Enrolamento AT [N/mm ²]	13,33	39,45	8,39	30,83
Enrolamento BT [N/mm ²]	2,04	52,00	23,12	41,75
Isolação AT [N/mm ²]	25,34	112,39	15,94	87,82
Isolação BT [N/mm ²]	6,19	90,19	70,31	72,41

Tabela 31 - Dimensionamento da isolação

Com base nos valores calculados, a isolação pode ser dimensionada de acordo com as propriedades do cobre apresentadas na tabela 29 e as propriedades da isolação apresentadas na tabela 27 e na figura abaixo.

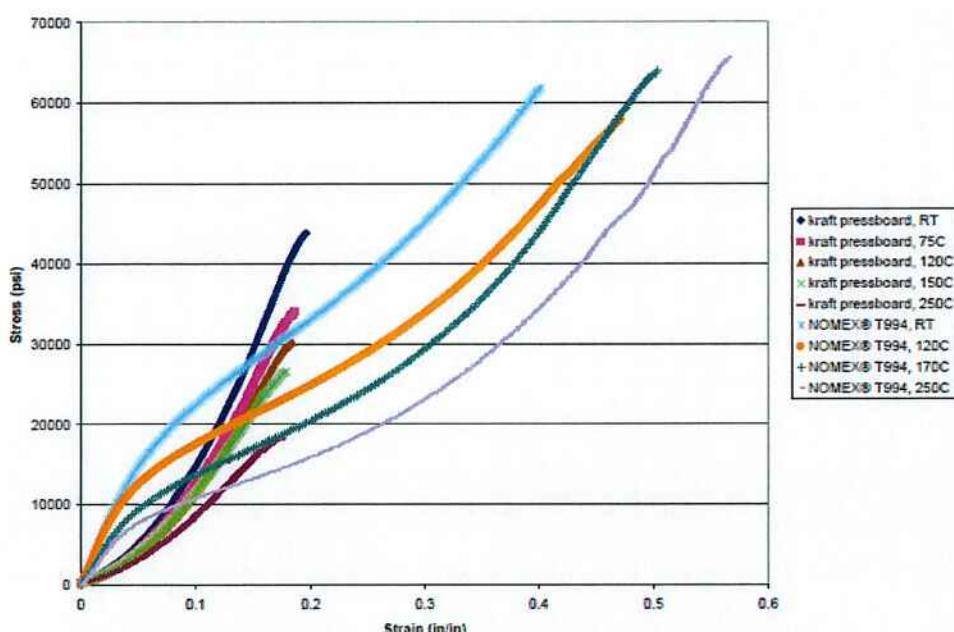


Figura 74 - Propriedades mecânicas de materiais isolantes

Assim, o cobre utilizado para a fabricação do transformador pode ser o cobre recozido, pois os condutores apresentaram tensão normal máxima de fabricação ($\sigma_{0,2}$) de 65 N/mm².

A isolação utilizada para fabricação dos calços e das tiras do transformador pode ser a isolação de alta densidade de presspahn, kraft pressboard 150C, conforme dados técnicos apresentados na tabela 27, pois a tensão normal da isolação se apresentou com tensão normal (σ_t) de 140 N/mm² (considerando fator de segurança de 0,8) enquanto a isolação de presspahn de alta densidade possui tensão normal (σ_t) de 180 N/mm².

11 Conclusão

Na primeira parte do trabalho realizado, foi possível se observar a metodologia para o projeto de um transformador de potência trifásico dentro das determinações da norma ABNT. Para complementar o projeto foi realizado alguns desenhos de fabricação do transformador. Esses desenhos foram muito úteis na continuação do projeto, na qual se fizeram necessários dados detalhados de projeto para a simulação em software do curto circuito, pelo método dos elementos finitos. Posteriormente constatou-se o impacto de diferentes tipos de curtos circuitos no transformador através do estudo de um sistema de potência simplificado para que fosse possível o estudo de curtos circuitos através das componentes simétricas para a condição de regime permanente. Além disso, foi analisada a componente transitória de curto circuito e, assim, foi possível analisar as máximas exigências teóricas durante os diferentes tipos de curtos circuitos. Com esses dados foi possível fazer uma confrontação com os dados obtidos por simulação para que seja possível dimensionar a isolação do transformador através uma classe de tensão adequada.

Na segunda parte, iniciou-se a familiarização com o software Maxwell. Após estar totalmente familiarizado com o software Maxwell, se iniciou o modelamento do

transformador no software, considerando todas as condições de contorno necessárias e todas as especificações utilizadas no projeto. Com o modelamento do transformador na interface do software, deu-se início à etapa das simulações. O transformador de potência foi simulado nos modos transitório e magnetostático. As simulações se mostraram confiáveis, apesar do material magnético do núcleo que foi utilizado nas simulações não ser anisotrópico, para a simulação foi considerado material magnético isotrópico com curva BH real. Com base nas simulações, pode-se analisar e compreender o comportamento da corrente, tensão, indução magnética e solicitações mecânicas em um transformador de potência para os curtos circuitos fase-terra, dupla-fase e trifásico. E assim, com base nas simulações, foi possível validar os valores teóricos já calculados. Ademais, com os resultados das simulações, foi realizado o dimensionamento da isolação e do condutor do transformador com base na Teoria da Resistência dos Materiais e na Teoria da Elasticidade, aplicada em transformadores de potência.

Em suma, foi projetado um transformador de potência de 15MVA, trifásico, 60Hz, grupo de ligação Ynd1 de acordo com as normas ABNT NBR 5380 e NBR5356, o funcionamento do transformador foi comprovado pelo software Maxwell, e então foram simuladas as condições dos curtos circuitos mais comuns, para que fosse possível realizar o dimensionamento da isolação para resistir às forças de curtos circuitos.

12 Propostas para continuação dos estudos

Tendo em vista a validação da metodologia empregada no projeto do transformador de potência através das simulações realizadas, podem-se estender os estudos realizados para uma análise do desempenho do transformador de potência com o uso de comutadores de tensão. Assim, poderão ser estudadas todas as condições reais de um transformador para as variações de carga de seu carregamento.

Ademais, pode-se realizar uma análise do comportamento térmico do transformador de potência, para que assim, seu sistema de refrigeração possa ser dimensionado com critério, e acrescentar essa variável no dimensionamento da isolação. Vale ressaltar que o software Maxwell não realiza a simulação dos efeitos térmicos.

13 Referências bibliográficas

- [¹] ABNT NBR 5356-1/2007 Transformadores de potência– Parte 1: Generalidades.
- [²] ABNT NBR 5356-3/2007 Transformadores de potência – Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar.
- [³] ABNT NBR 5380/1993 Transformador de Potência.
- [⁴] Harlow, J. (2007), “Electric Power Transformer Engineering”, CRC Press, 2nd edition.
- [⁵] Blackburn, J. Lewis. “Symmetrical Components For Power Systems Engineering”, Marcel Dekker, 1st edition.
- [⁶] Grainger, J., Jr., William Stevenson (1994) “Power System Analysis”. McGraw-Hill, 1st edition.
- [⁷] Kagan, N., de Oliveira, C. C. B., Robba, E. J., (2005) “Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”, Editora Edgar Blücher, 1^a edição.
- [⁸] Kagan, N., Robba, J. e Schmidt, H. (2008), “Indicadores de qualidade de energia elétrica”
- [⁹] Silvester, P. and Ferrari, R. (1983), “Finite elements for electrical engineers”, Cambridge University Press, Ed.1983
- [¹⁰] IEC 60076-5/2007 “Ability to withstand short circuits”
- [¹¹] L. E. Feather and P. Voytik, “Application of Polyamide Paper in Liquid-Cooled Transformers”, Proceedings of the IEEE 10th Electrical Insulation Conference, pp. 24-27, 1971

[¹²] IEC 60076-14/2011 “Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials”

[¹³] H. P. Moser et al “Influence of Transformerboard and Nomexboard on the Electrification of Power Transformers”, EPRI Workshop on Static Electrification in Power Transformers, 1992

[¹⁴] W. T. Shugg “Handbook of Electrical and Insulating Materials” Van Nostrand Reinhold, 1986

14 Anexos

A seguir são apresentados os anexos do projeto do transformador. Nos anexos são apresentados os desenhos de fabricação do projeto. Os anexos são separados da seguinte forma:

14.1 Anexo A – Dados Elétricos

14.2 Anexo B – Placa de Identificação

14.3 Anexo C – Ensaios Dielétricos

14.4 Anexo D – Tanque

14.5 Anexo E – Núcleo

14.6 Anexo F – Parte Ativa

14.7 Anexo G – Enrolamentos

14.8 Anexo H – Esquema de ligação

14.9 Anexo I – Dados e Formas de Ondas da Operação Nominal da Simulação

14.10 Anexo J – Simulação do Curto Circuito Fase Terra

14.11 Anexo K – Simulação do Curto Circuito Dupla Fase

14.12 Anexo L – Simulação do Curto Circuito Trifásico

Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo A
Dados Elétricos

Remark: 1) Calços da AT: 3 mm
2) Calços da BT: 2 mm

Não há comutador de taps

	Calculated by	Checked by
Date:	1/Jun/11	Date:
Name:	Marcos Pioltine	Name:
Signature:		Signature:

Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

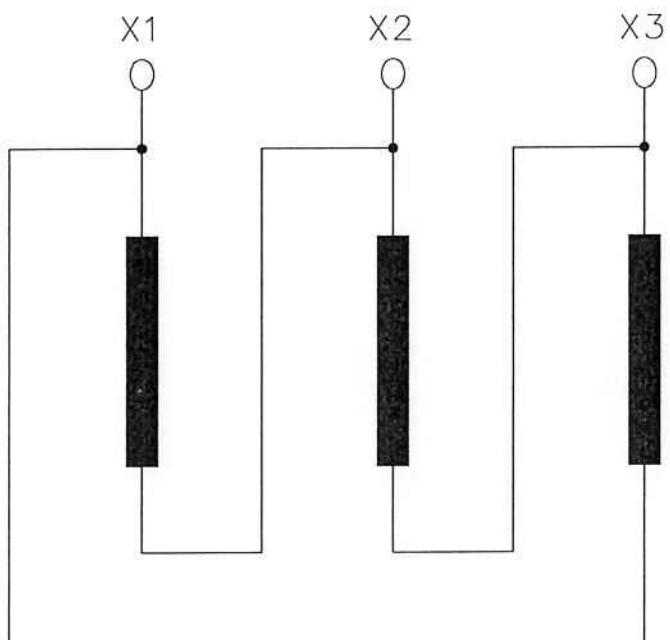
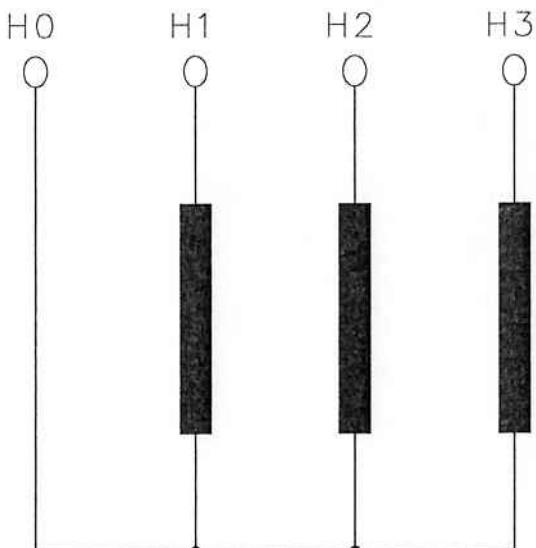
Anexo B
Placa de Identificação

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
 PEA2500 – PROJETO DE FORMATURA
 TRANSFORMADOR

ANO DE PROJETO	NORMAS	FREQUENCIA	POTENCIA CONTINUA (kVA)
2011	ABNT 5356/5380-1993	60 Hz	15000
SISTEMA DE RESFRIAMENTO	MASSA EM Kg	FASES	RELACAO DE TENSÃO KV
ONAN	PARTE ATIVA: 11900	TRIFASICO	138 / 13.8
ÓLEO NAFTÉNICO	ELEVACAO DE TEMPERATURA	IMPEDÂNCIA PORCENTUAL	
TIPO A/ABNT-NBR 5356	ÓLEO: 65°C	P/ 15000kVA 75°C 60Hz: 8,12	
CNP 18/85 TIPO A	ENROLAMENTO: 65°C		
VOLUME : 30000			

NIVEIS DE ISOLAMENTO		
TENSÃO SUPORTÁVEL	AT	BT E NEUTRO
FREQUÊNCIA INDUSTRIAL (KV EFICAZ)	275	34,5
IMPULSO ATMOSFÉRICO (KV CRISTA)	650	110

TERMINAIS	VOLTS	AMPERES
AT	13800	62,76
BT	13800	627,56



Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo C
Ensaios Dielétricos

ENSAIOS DIELÉTRICOS:

ÍNDICE GERAL:

- 1) ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO
- 2) ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

OBJETO DE ENSAIO:

TRANSFORMADOR TRIFÁSICO; 15 MVA;
138 / 13.8 kV; 60Hz; ONAN;

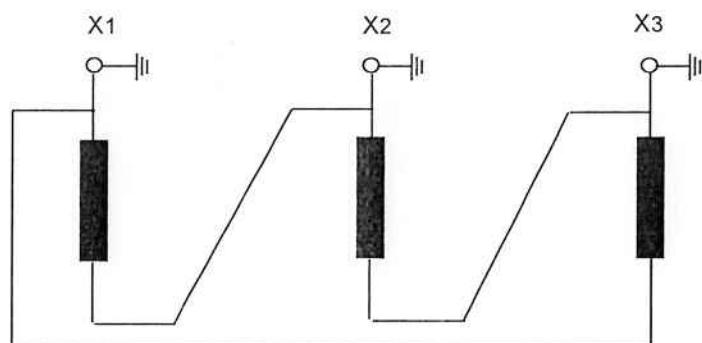
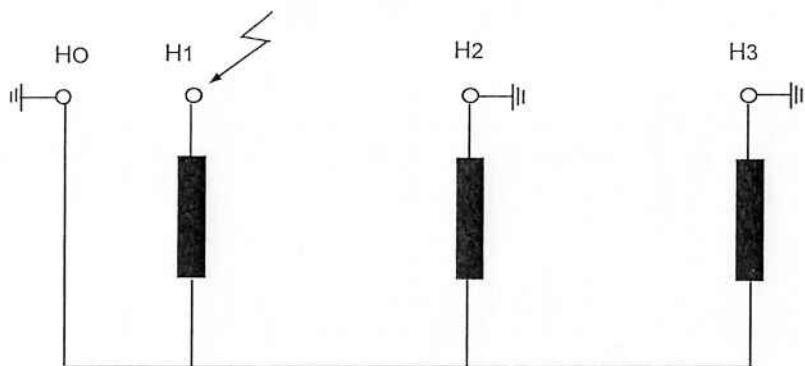
REFERÊNCIAS ABB: O.V. 129032 - 010

CLIENTE: Projeto de Formatura Marcos Pioltine

ATENÇÃO: Os ensaios apresentados a seguir são realizados de acordo com a norma técnica ABNT: NBR 5356/2008.

Alt. Nº	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	Ref.		
Projeto conf. por	Des. por	Marcos Pioltine	Descrição	ESQUEMA DE ENSAIOS				
Des. conf. por	Ano Sem. 2010 30					Alt. Nº		
						Cont. 2		

1) ENSAIO DE IMPULSO ATMOSFÉRICO
 1.1) IMPULSO ATMOSFÉRICO NA ALTA TENSÃO
 (TERMINAIS H1, H2, H3)

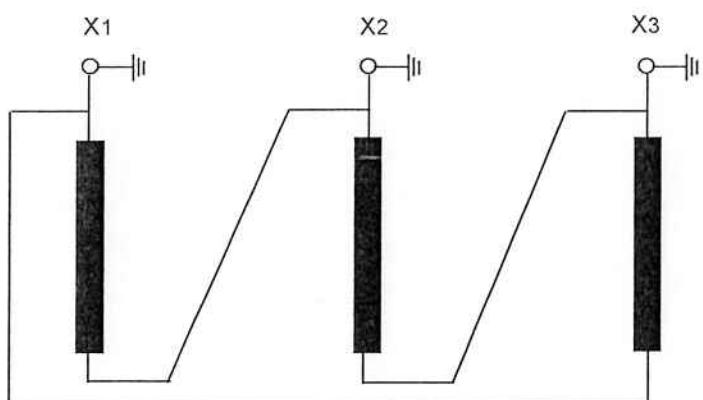
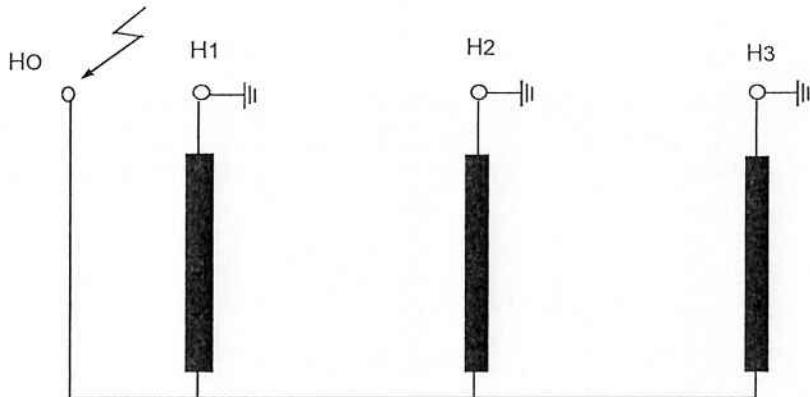


TENSÕES DE ENSAIO:
 ONDA PLENA: 650 kV (pico)

NORMAS: ABNT - NBR 5356 / 2008

Alt. Nº	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	
Projeto conf. por		Des. por	Descrição			Ref.
		Marcos Pioltine	ESQUEMA DE ENSAIOS			
Des. conf. por		Ano Sem.				Alt. Nº
		2010 30				Folha 2
						Cont. 3

1.2) IMPULSO ATMOSFÉRICO NO NEUTRO (HO)

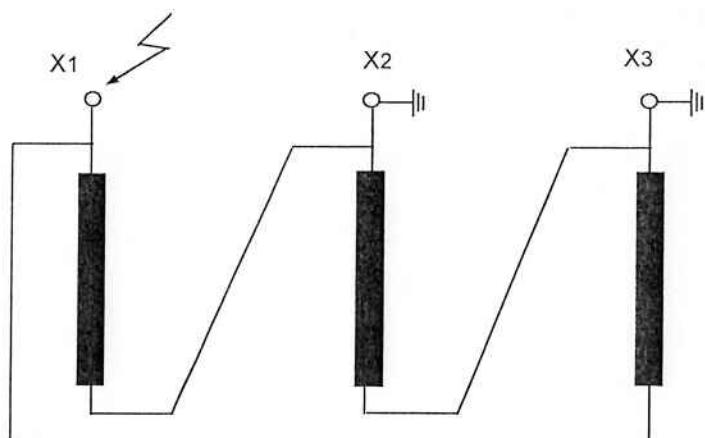
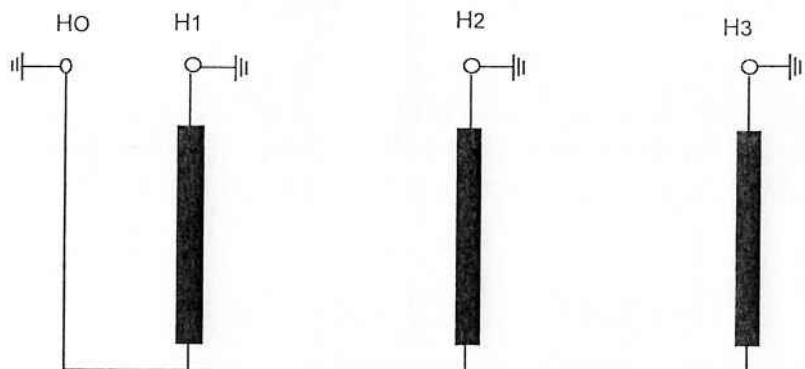


TENSÃO DE ENSAIO:
ONDA PLENA: 110 kV (pico)

NORMAS: ABNT - NBR 5356 / 2008

Alt. Nº	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	
Projeto conf. por		Des. por	Descrição			Ref.
		Marcos Pioltine	ESQUEMA DE ENSAIOS			
Des. conf. por		Ano Sem.				Alt. Nº
		2010 30				Folha 3
						Cont. 4

1.3) IMPULSO ATMOSFÉRICO NA BAIXA TENSÃO
 (TERMINAIS X1, X2, X3)



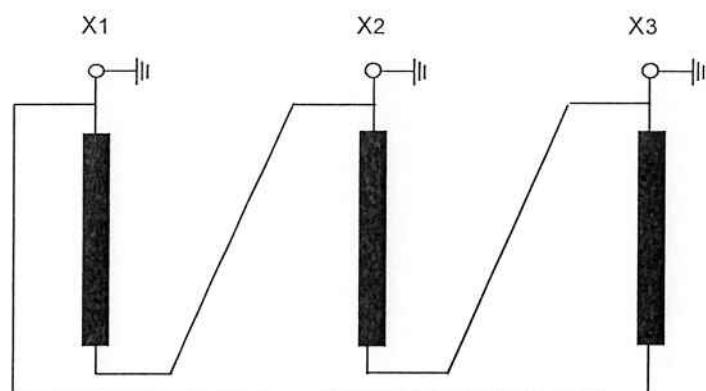
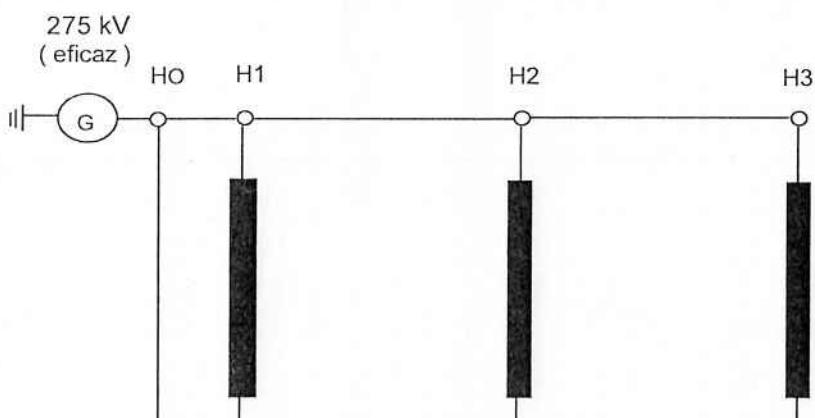
TENSÕES DE ENSAIO:
 ONDA PLENA: 110 kV (pico)

NORMAS: ABNT - NBR 5356 / 2008

Alt. N°	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	
Projeto conf. por		Des. por	Descrição			Ref.
		Marcos Pioltine	ESQUEMA DE ENSAIOS			
Des. conf. por			Ano Sem.			Alt. N°
			2010 30			Folha 4
						Cont. 5

3) ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

3.1) TENSÃO APLICADA NA ALTA TENSÃO



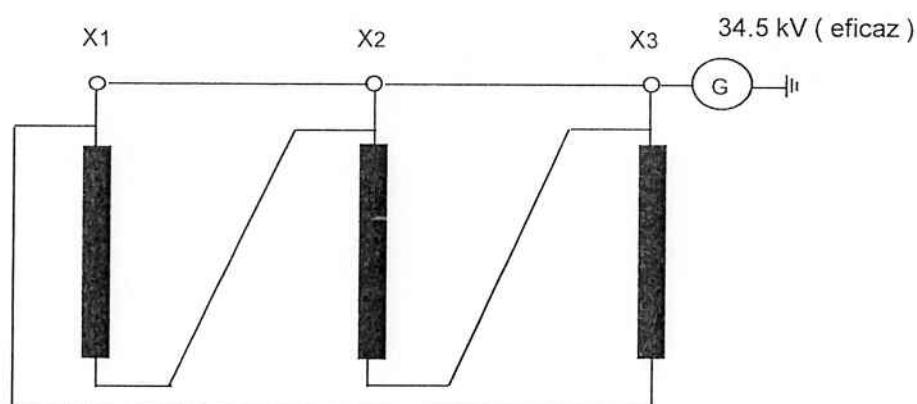
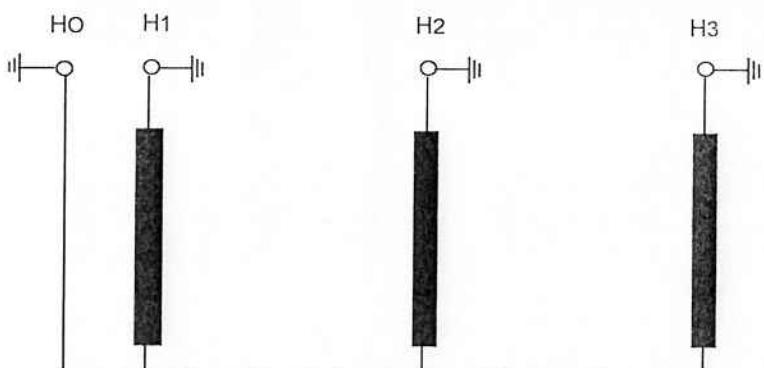
FREQUÊNCIA DE ENSAIO: 60 Hz

DURAÇÃO DO ENSAIO: 1 MINUTO

NORMAS: ABNT - NBR 5356 / 2008

Alt. Nº	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	Ref.
Projeto conf. por	Des. por	Marcos Pioltine	Descrição	ESQUEMA DE ENSAIOS		
Des. conf. por		Ano Sem. 2010 30				Alt. Nº
						Folha 5
						Cont. 6

3.2) TENSÃO APLICADA NA BAIXA TENSÃO



FREQUÊNCIA DE ENSAIO: 60 Hz

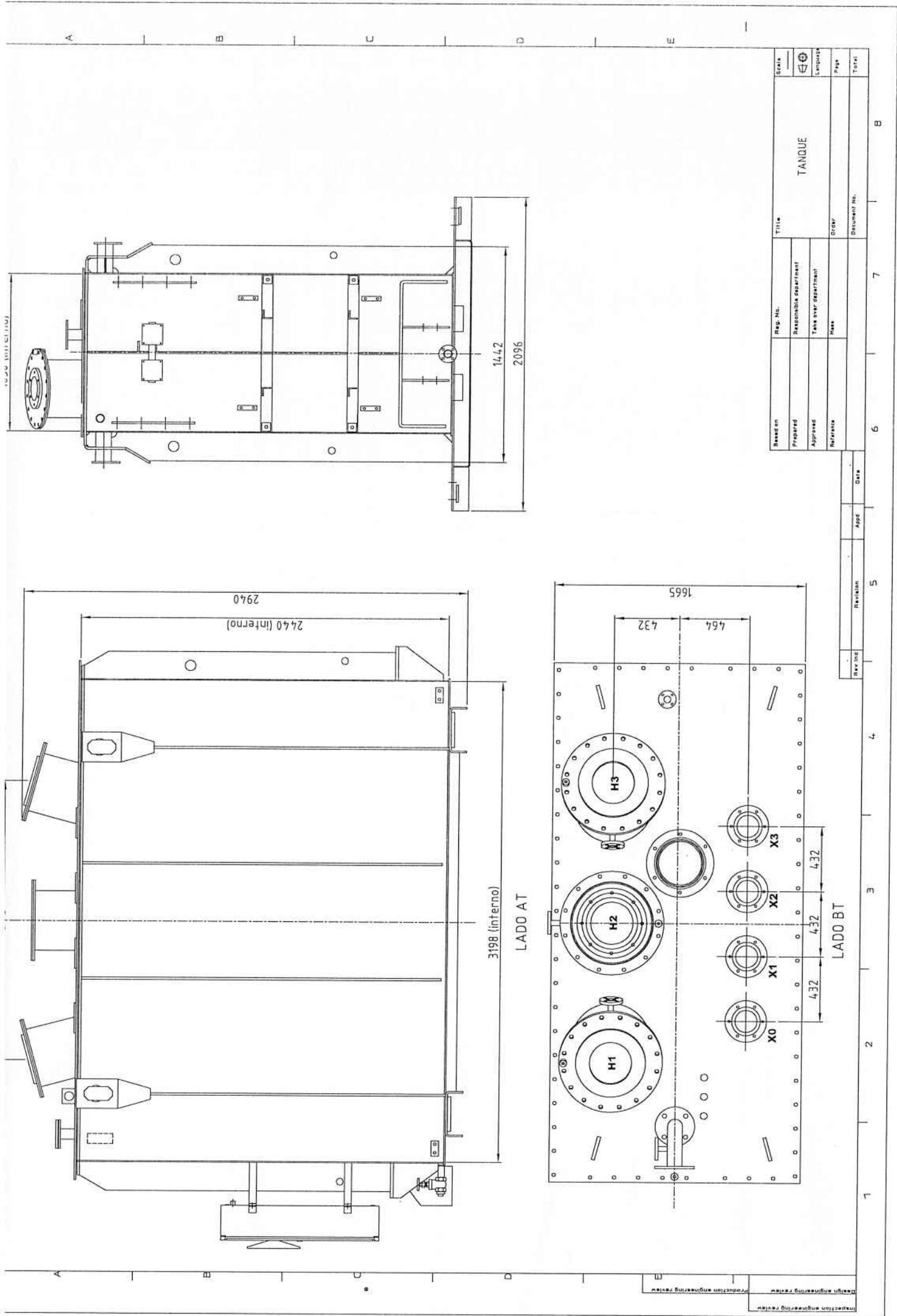
DURAÇÃO DO ENSAIO: 1 MINUTO

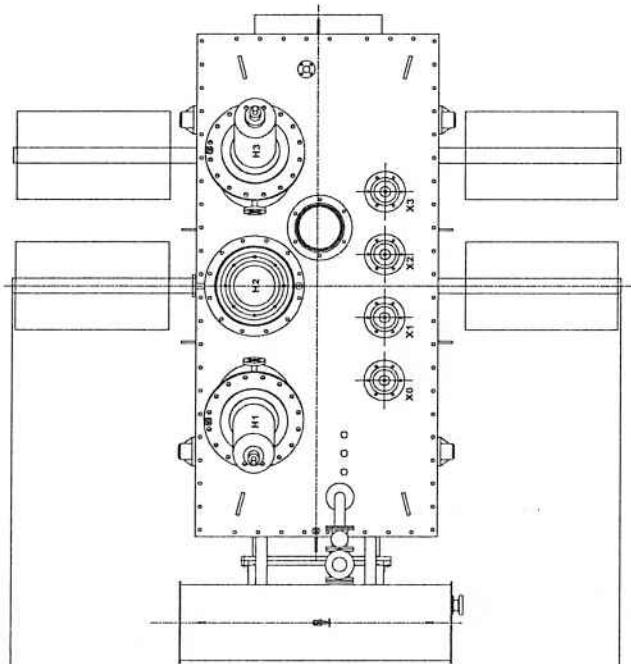
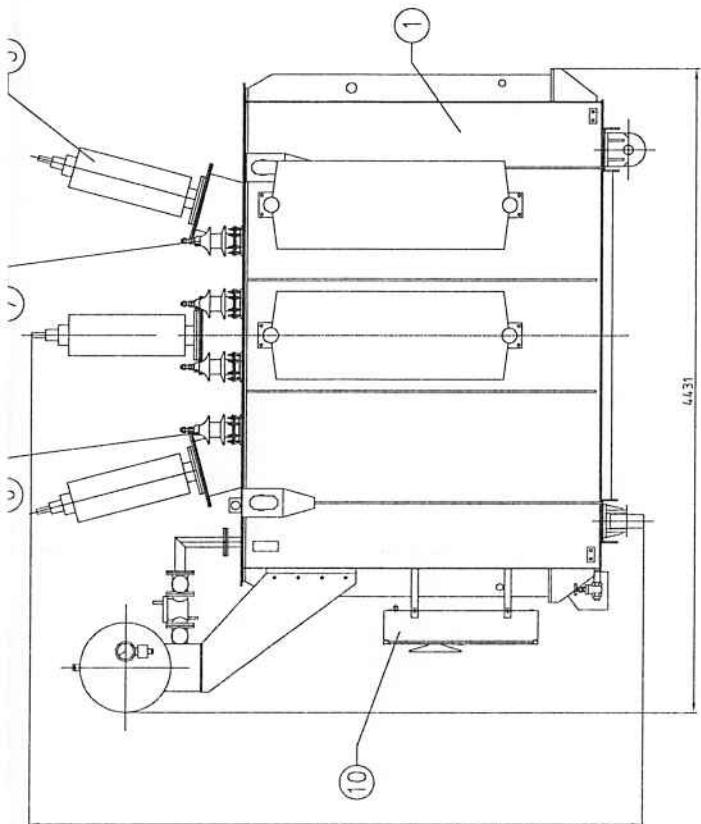
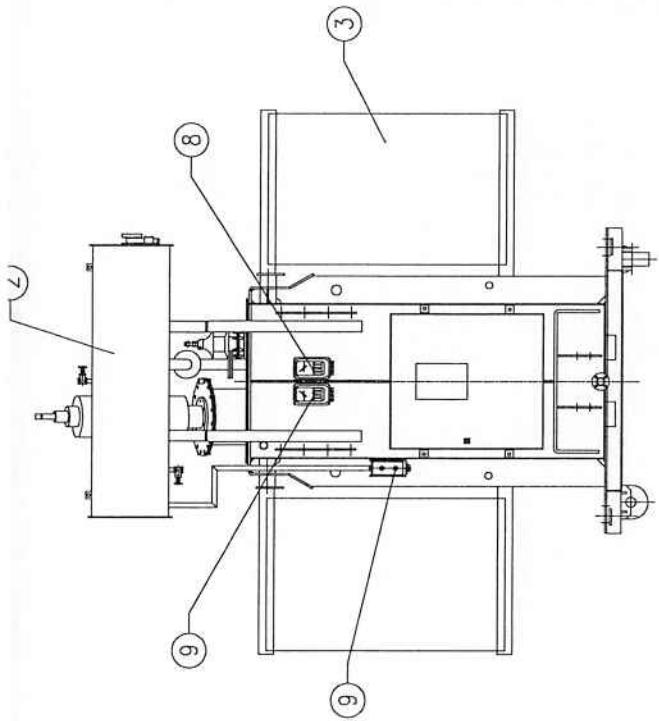
NORMAS: ABNT - NBR 5356 / 2008

Alt. Nº	Alteração		Aprov.	Ano	Sem.	
Projeto conf. por		Des. por	Descrição			Ref.
		Marcos Pioltine	ESQUEMA DE ENSAIOS			
Des. conf. por		Ano Sem.				Alt. Nº
		2010 30				Folha 6
						Cont. 7

Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

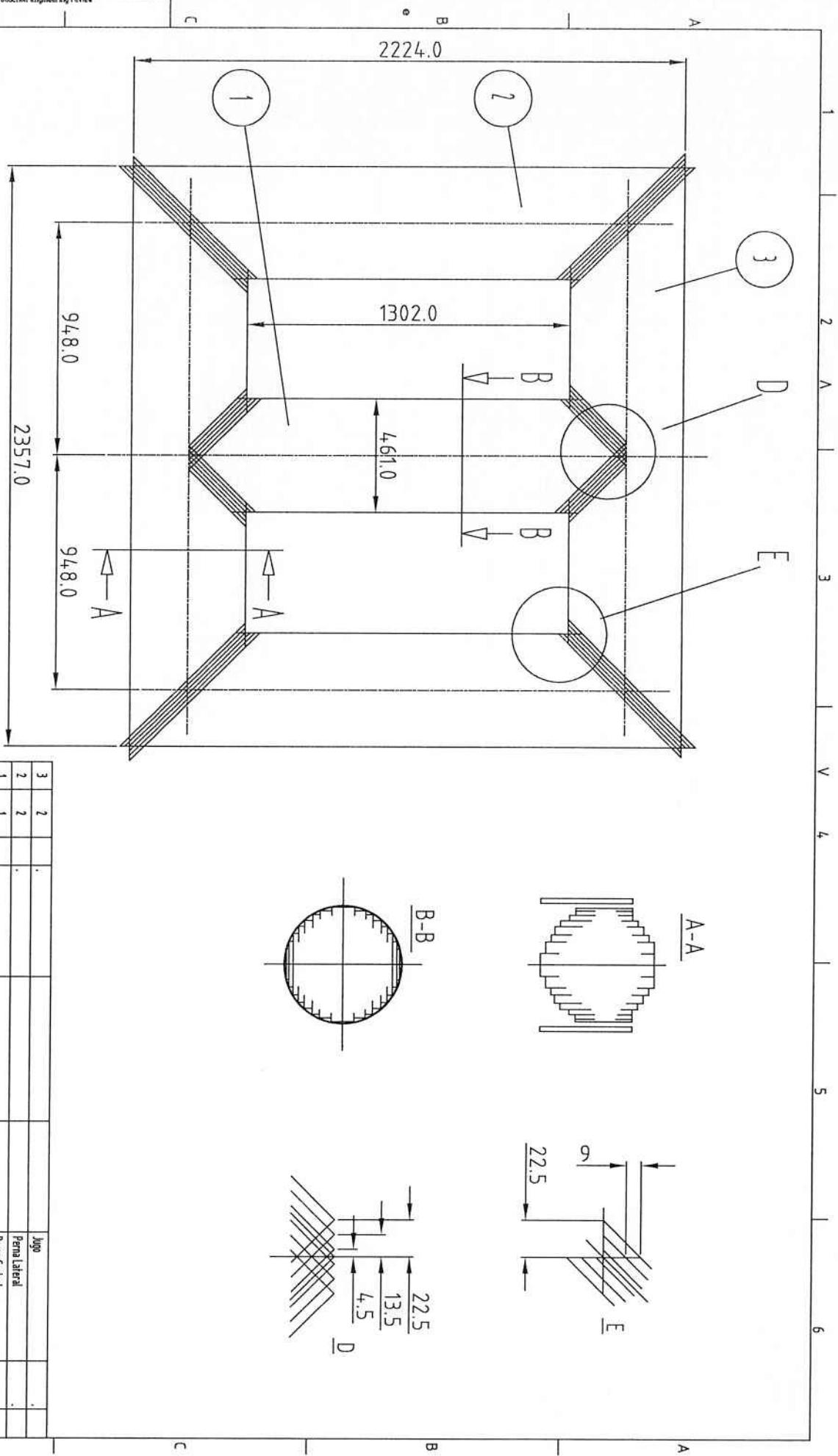
Anexo D
Tanque





Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo E
Núcleo



Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo F
Parte Ativa

1

2

3

REV.

DESCRIÇÃO

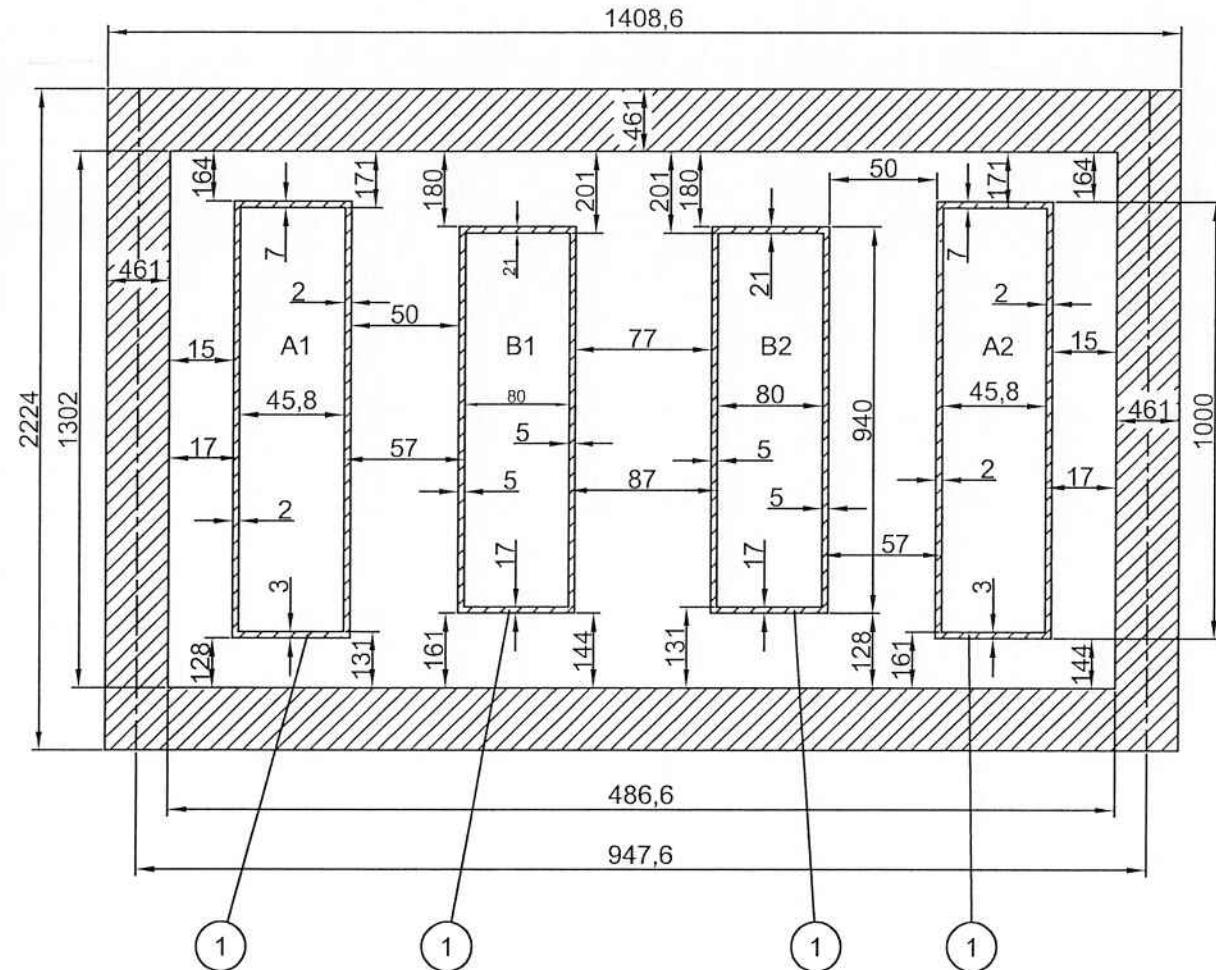
APROVADO

DATA

A

A

VISTA EM CORTE DE UMA JANELA



B

B

C

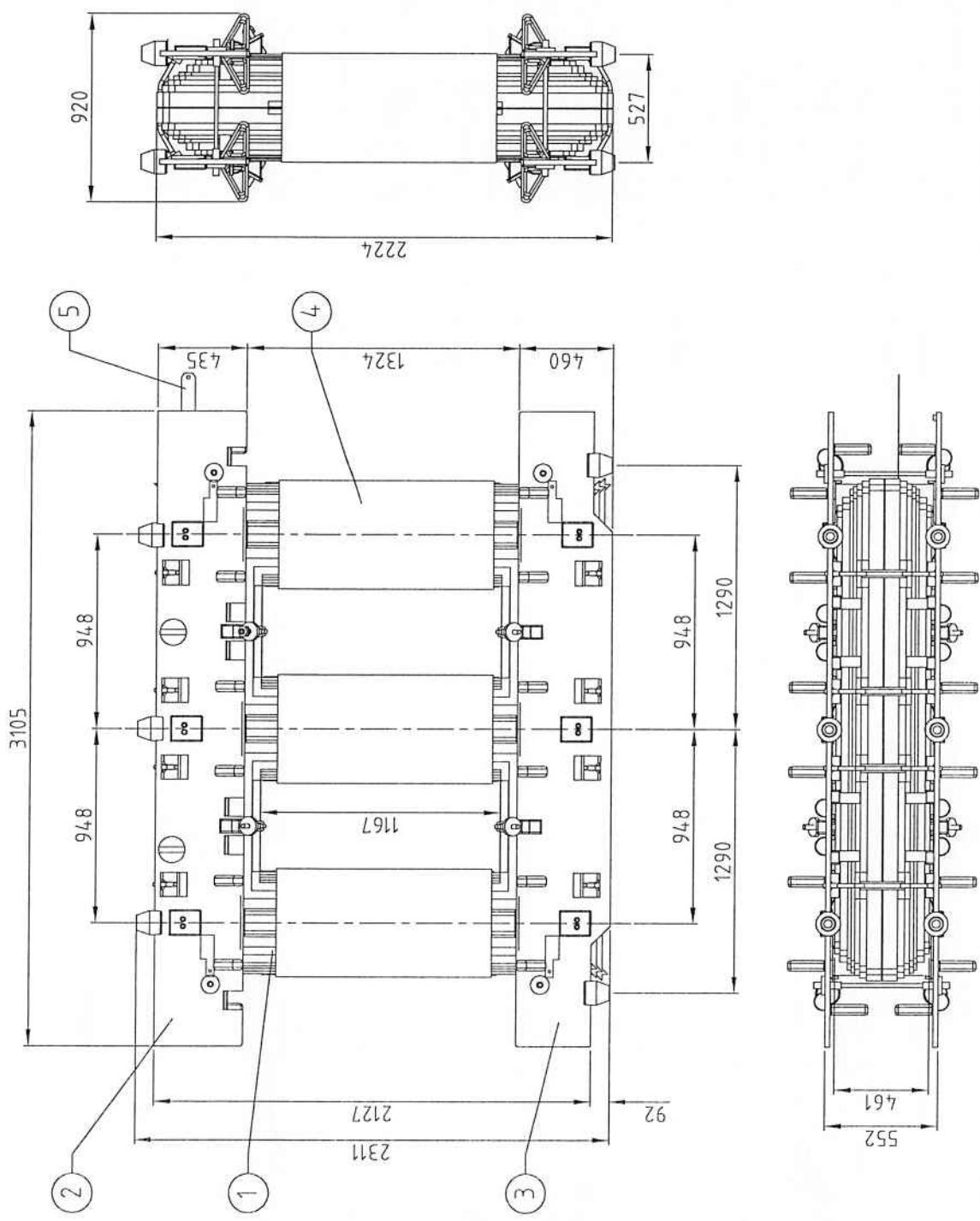
C

D

D

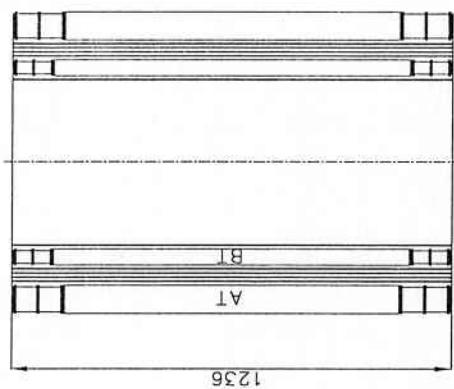
ITEM	QUANT.	Nº DO ARTIGO	DIMENSÃO	PRESSPAHN	ISOLAÇÃO	
DESENHADO		Marcos Pioltine	CLIENTE	MATERIAL	DESCRIÇÃO	MASSA
VERIFICADO		.	DEPARTAMENTO RESPONSÁVEL	.		ESCALA S/E
APROVADO		.	REFERÊNCIA	.		IDIOMA PT
SEMANA	ANO	REVISÃO	MASSA	O.V.	000.000-000	FOLHA 1
.	.	.	.kg		000000000-XXX	TOTAL 1
				Nº DOCUMENTO		

NUCLEO MONTADO	
Altura	920
Largo	2224
Alto	527
Base	461
Alto	552
Base	2311
Alto	2127
Base	1167
Alto	92
Base	948
Alto	1290
Base	948
Alto	1290
Base	948
Alto	1324
Base	460
Alto	435
Base	527

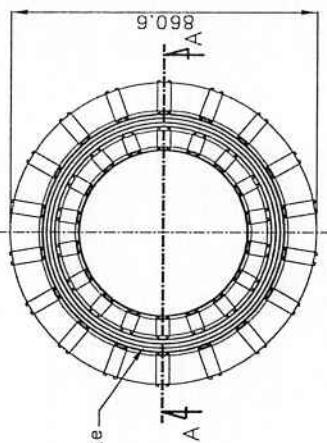


Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

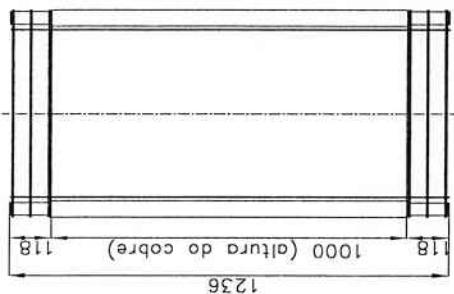
Anexo G
Enrolamentos



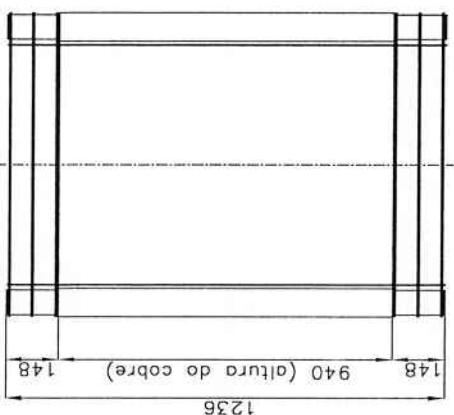
Corte A-A



Enrolamentos Montados



Enrolamento BT
Tipo: Hélice
Qt. Espiras: 188



Enrolamento AT
Tipo: Disco Contínuo
Qt. Espiras: 1080

Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo H
Esquema de Ligação

1

2

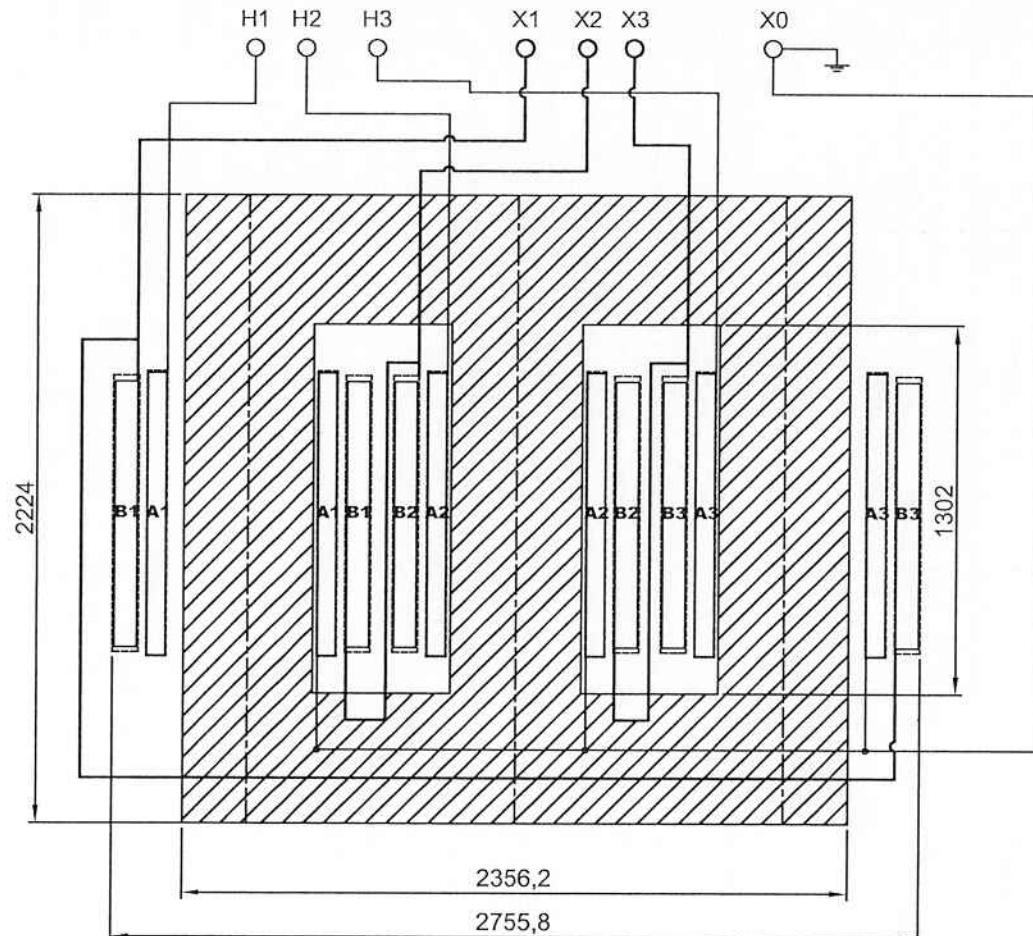
3

REV.

DESCRIÇÃO

APROVADO

DATA

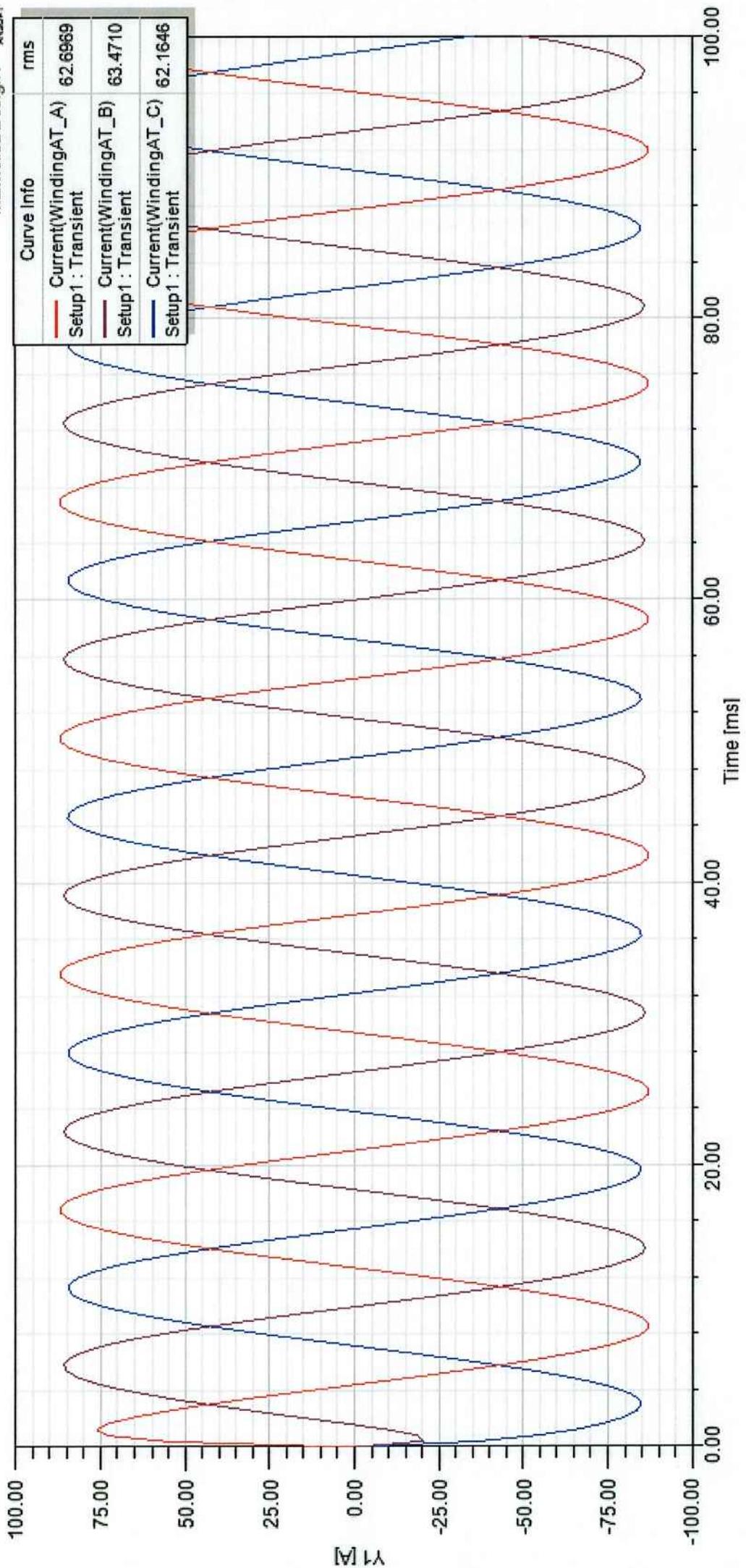


ITEM	QUANT.	Nº DO ARTIGO	DIMENSÃO		MATERIAL	DESCRIÇÃO	MASSA
DESENHADO			CLIENTE				
Marcos Pioltine							
VERIFICADO			DEPARTAMENTO RESPONSÁVEL				
APROVADO			REFERÊNCIA				
SEMANA	ANO		REVISÃO	MASSA	O.V.	000.000-000	FOLHA
.	.		.	.kg			1
					Nº DOCUMENTO	0000000000-000	TOTAL
							1

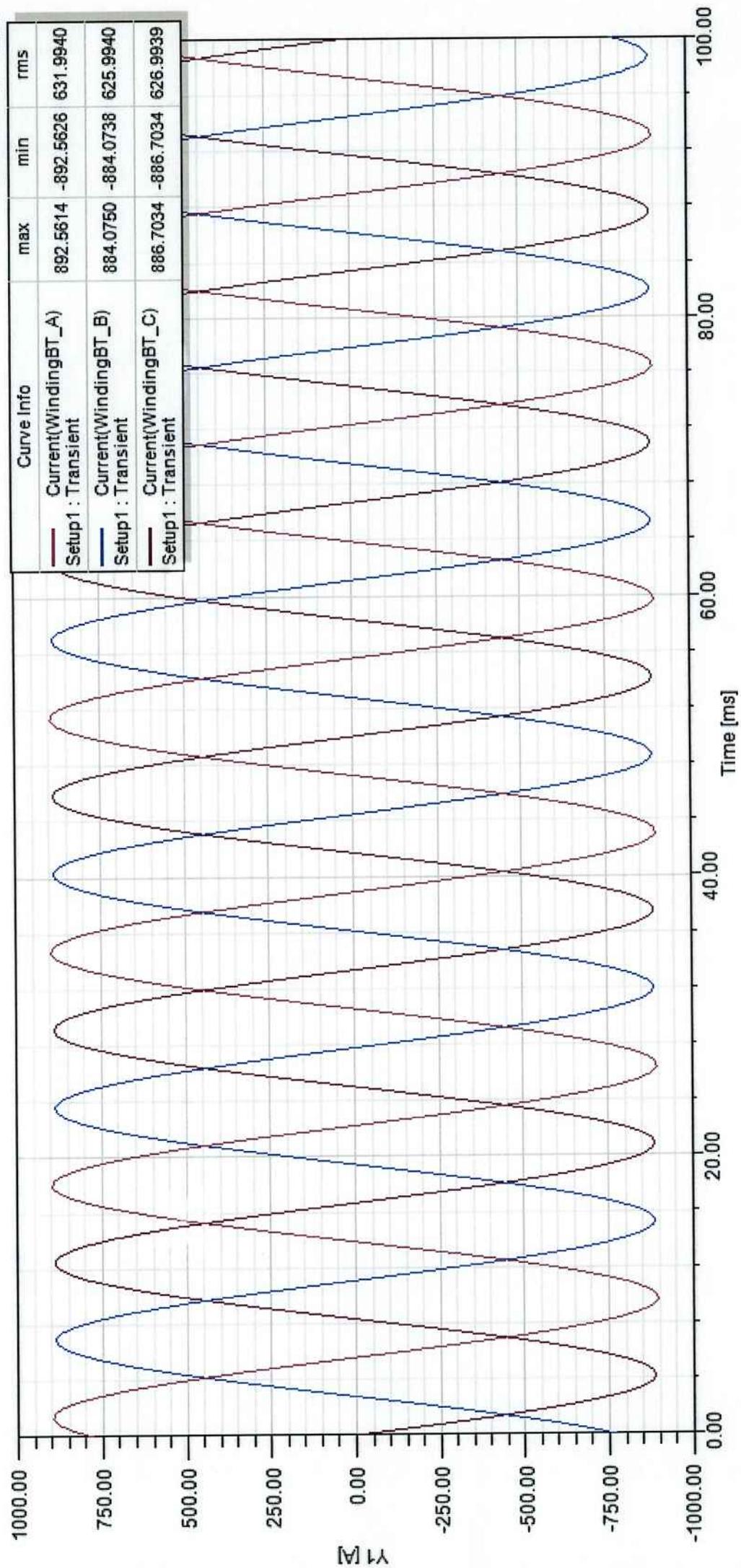
Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo I

Dados e Formas de Ondas da Operação
Nominal da Simulação

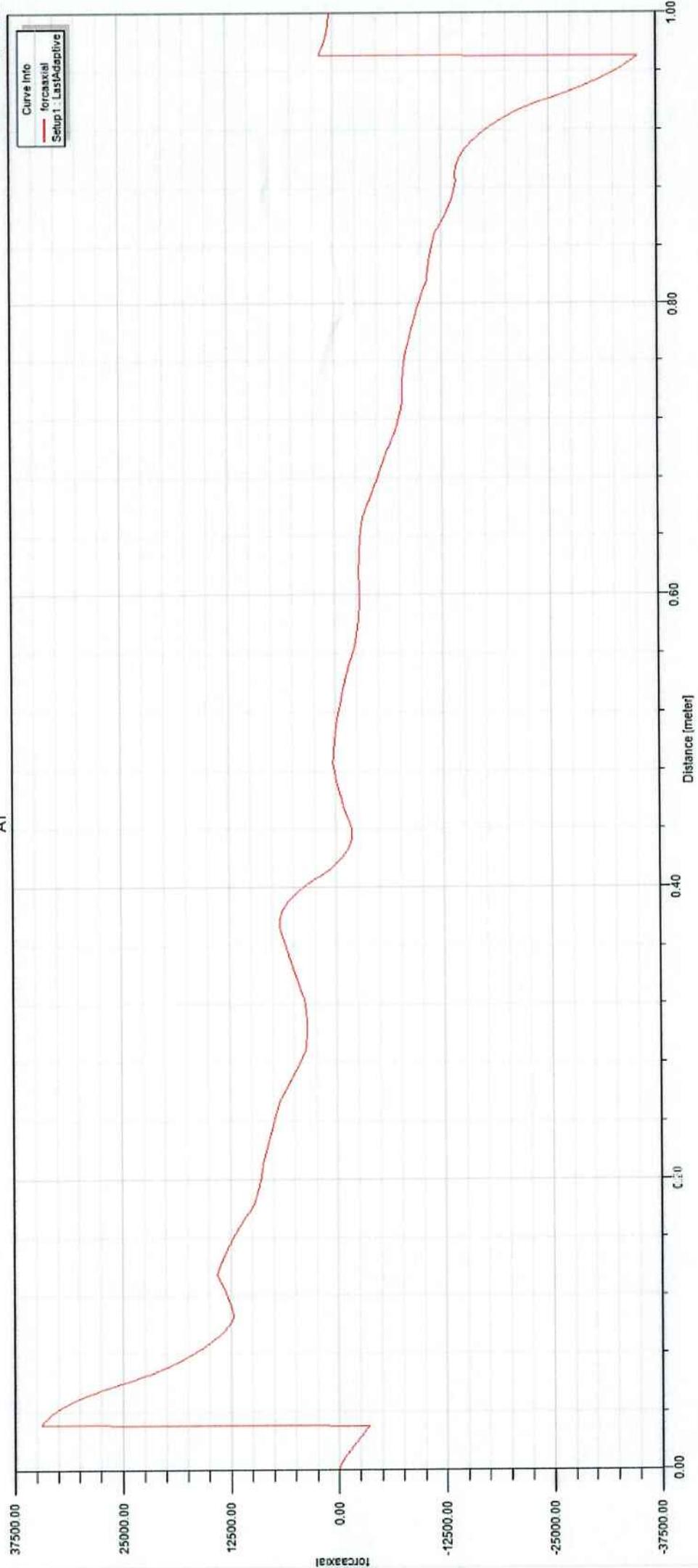


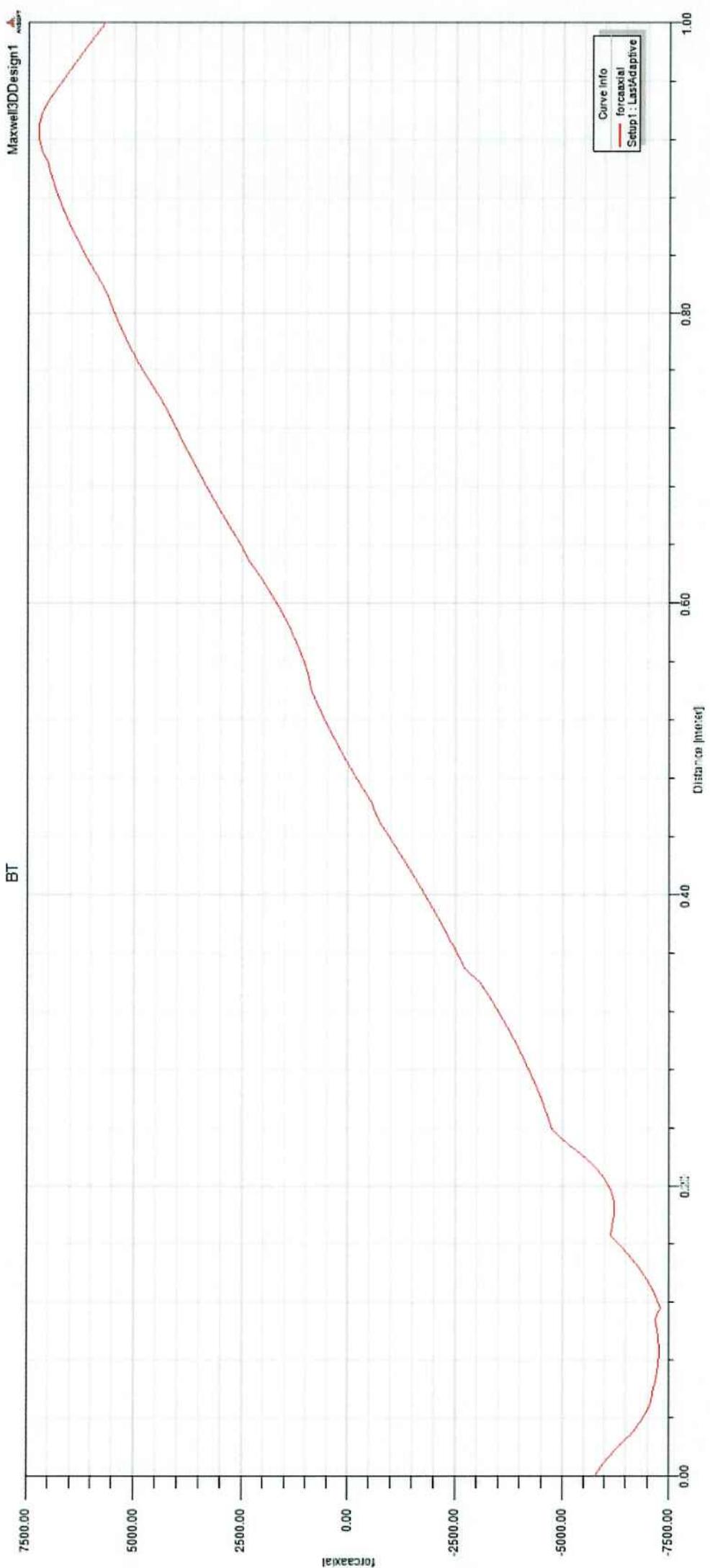
Maxwell3DDesign1

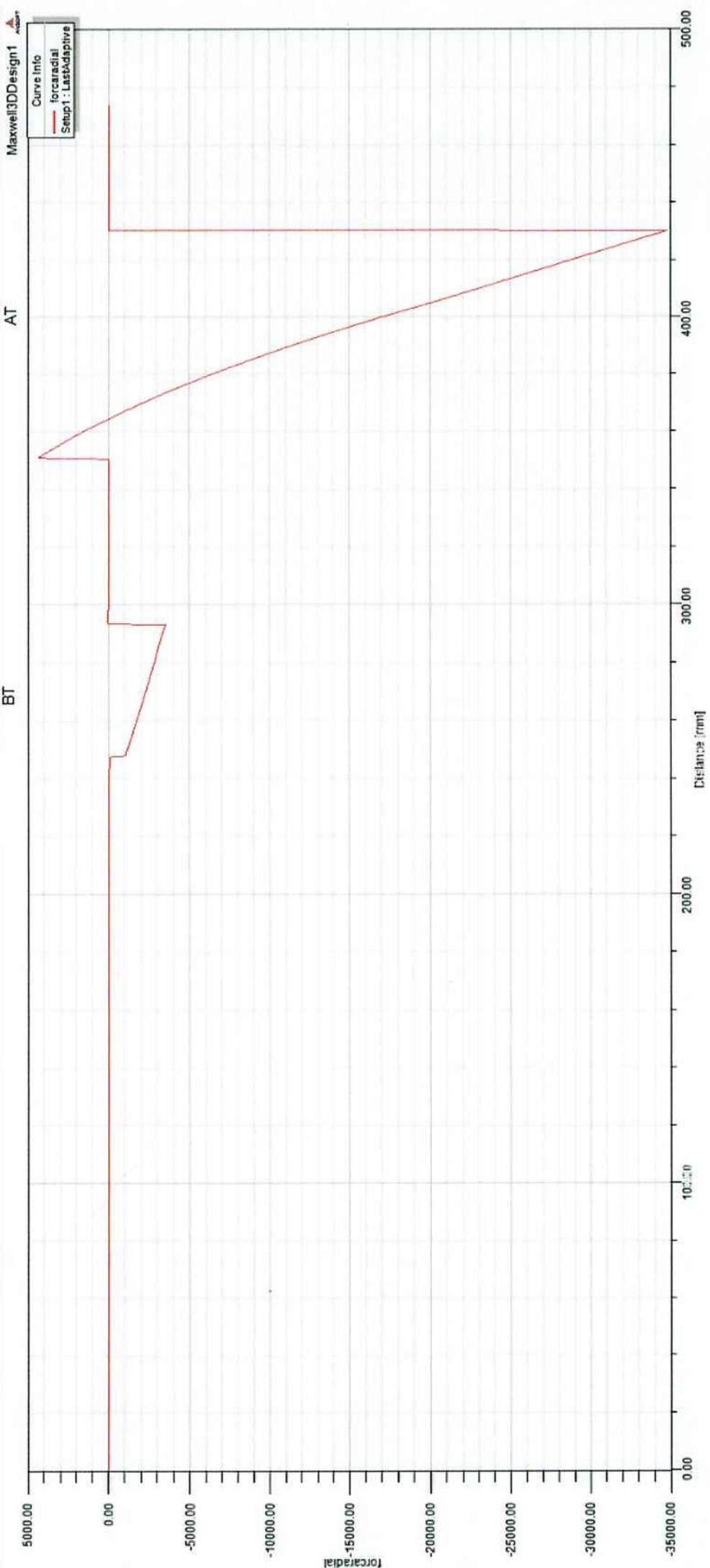


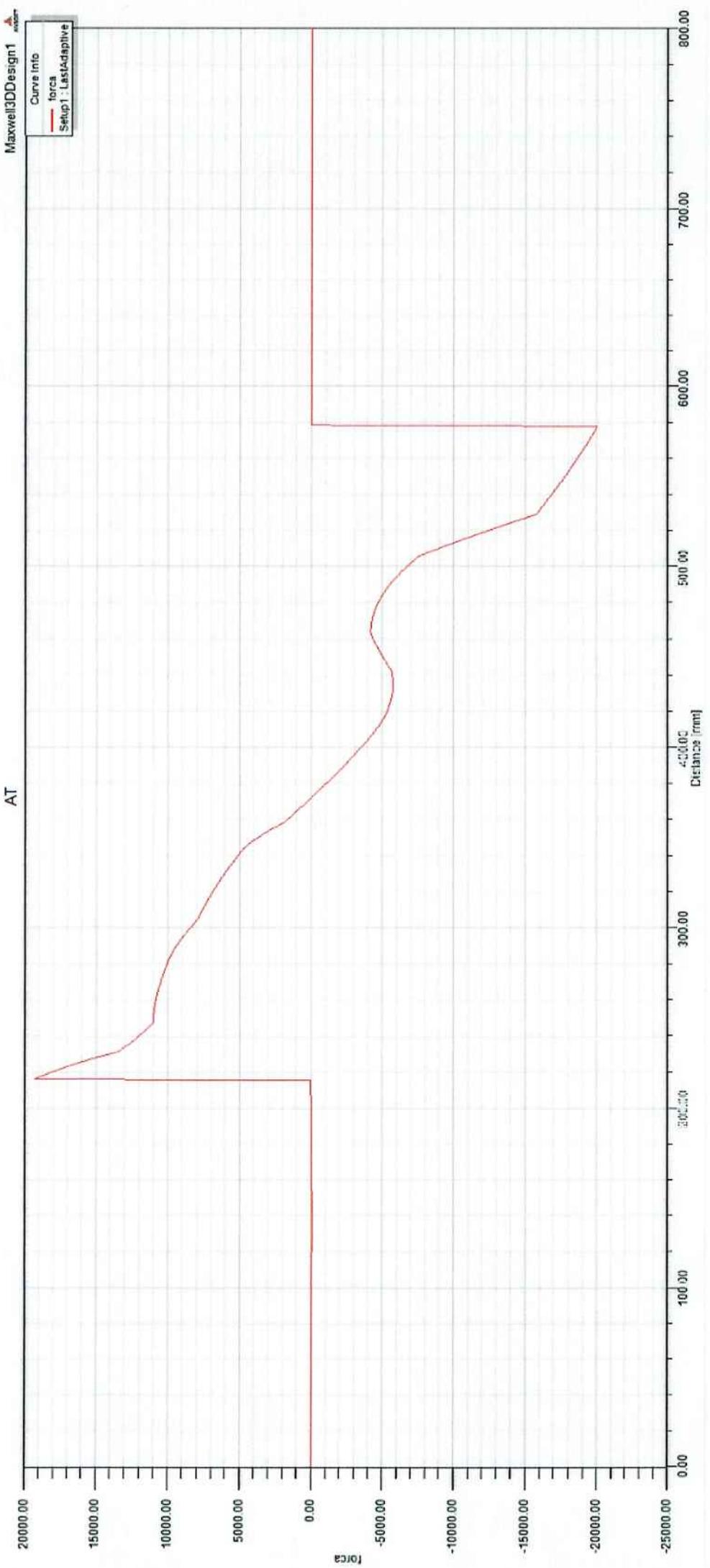
Curve Info
torcaxial
Setup 1: LastAdaptive

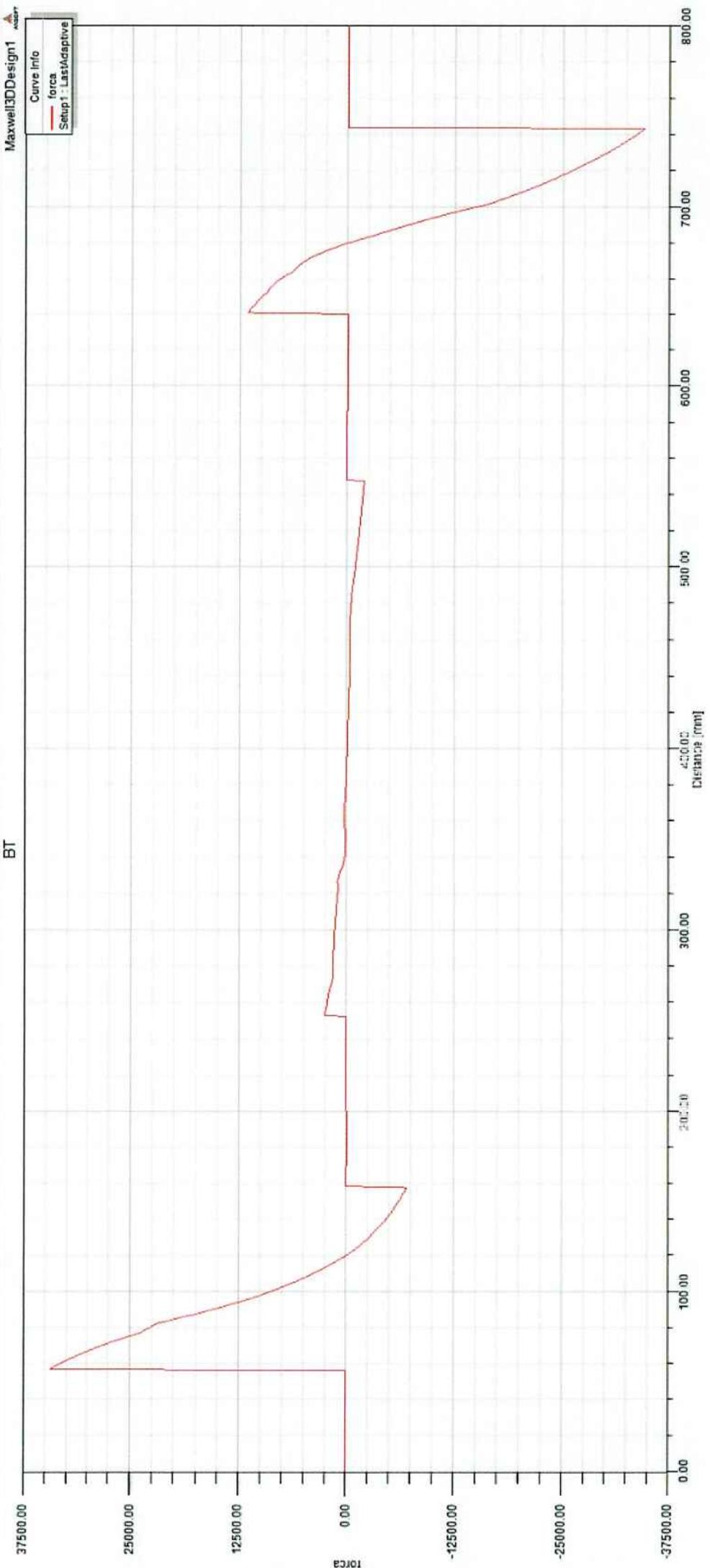
AT

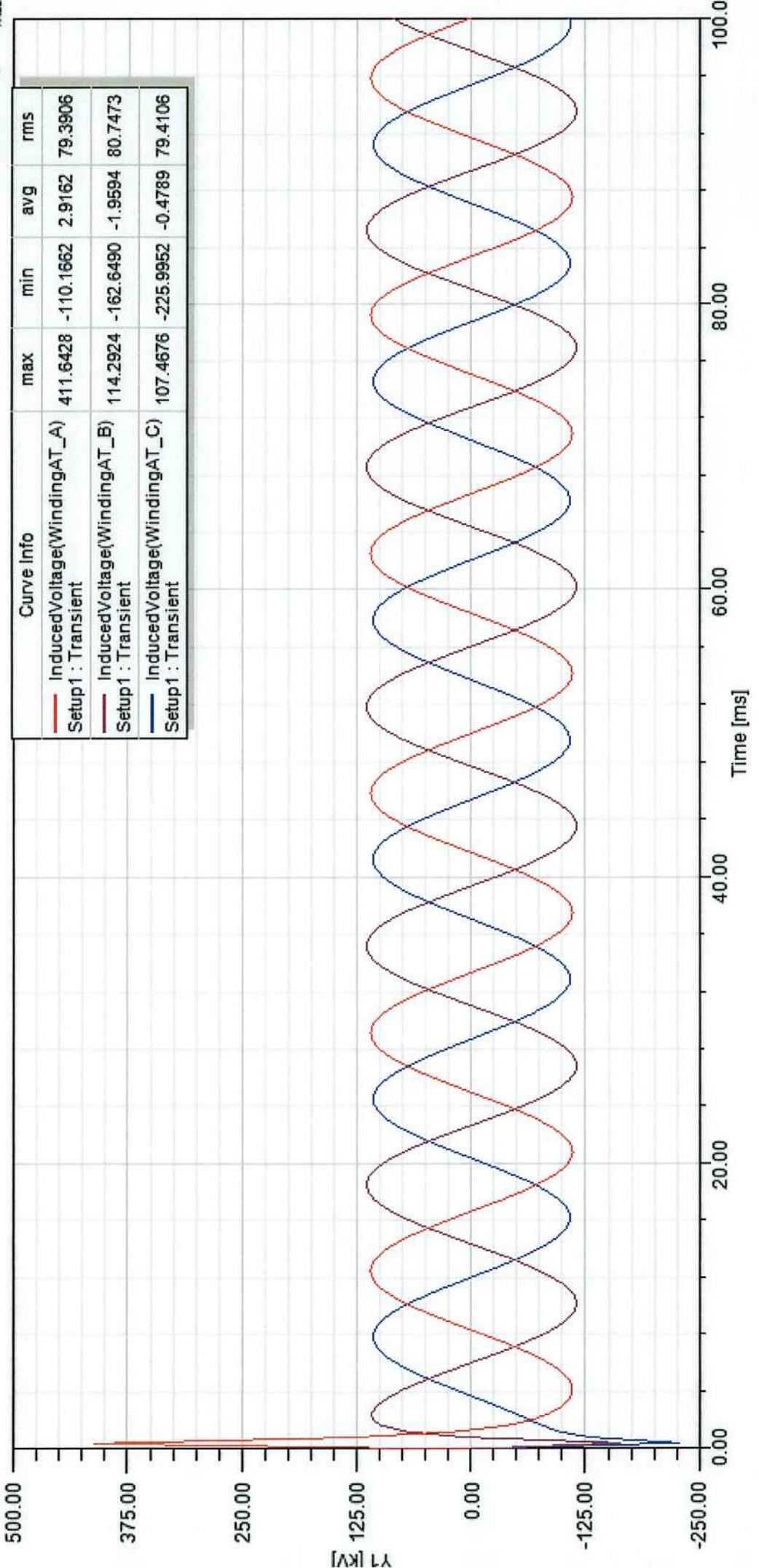


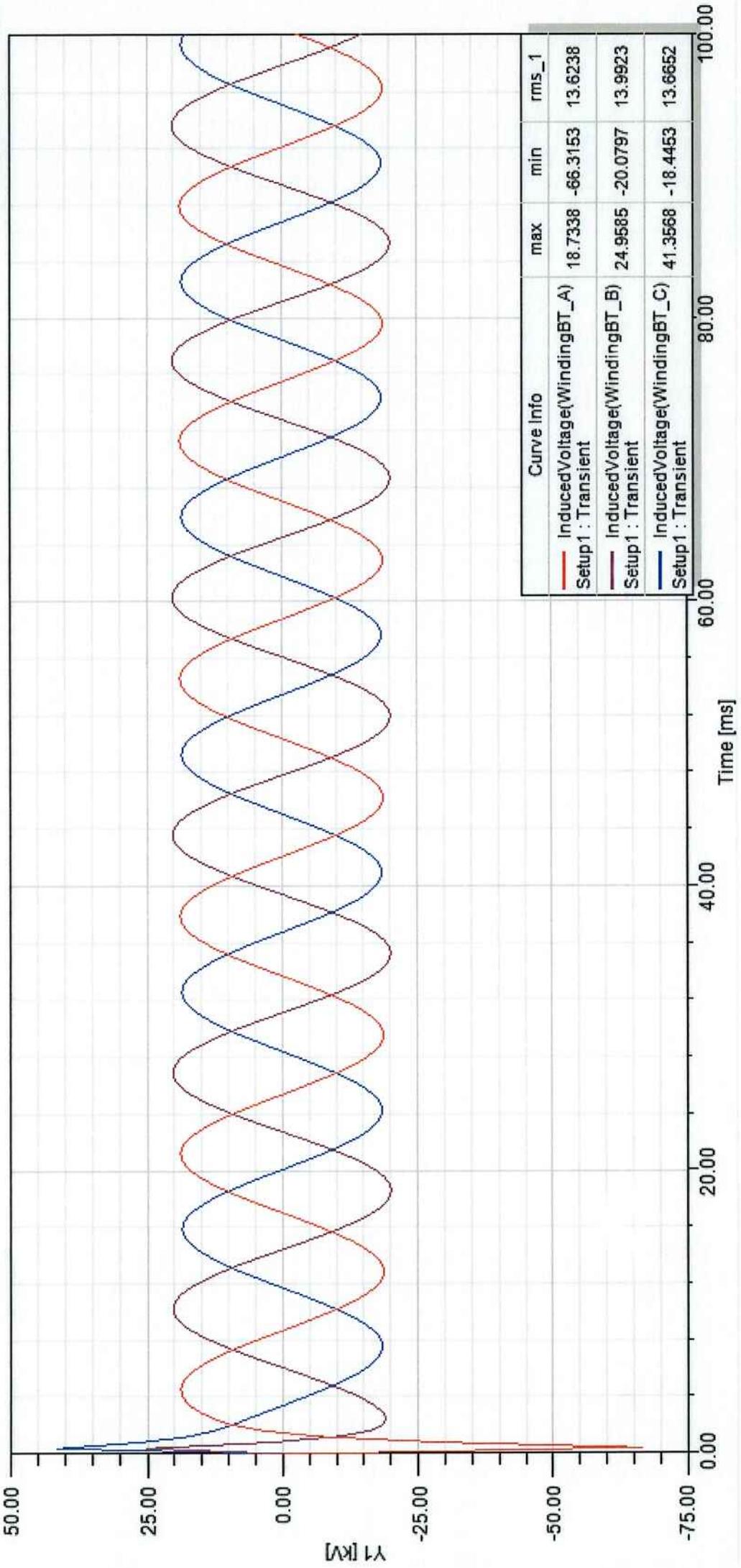


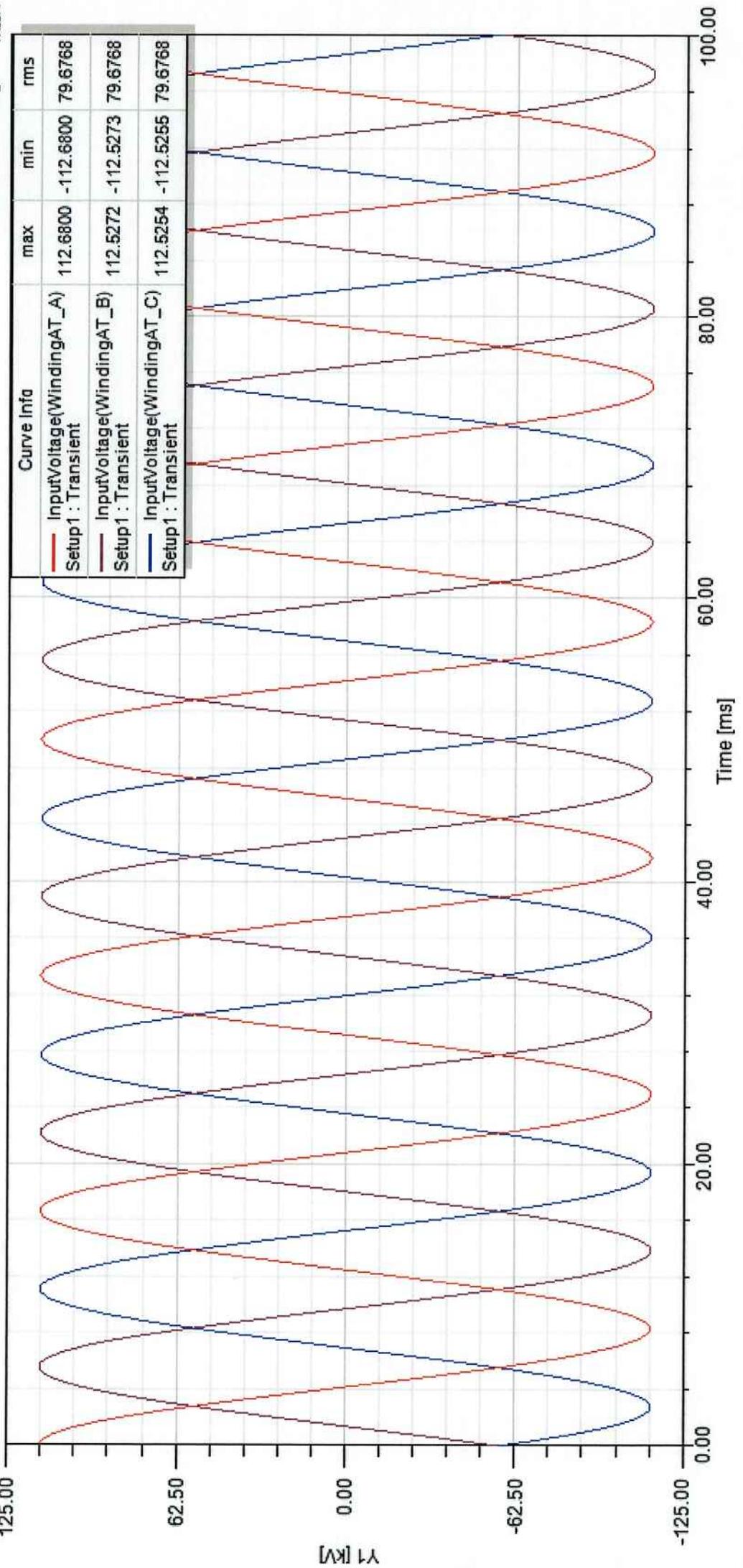






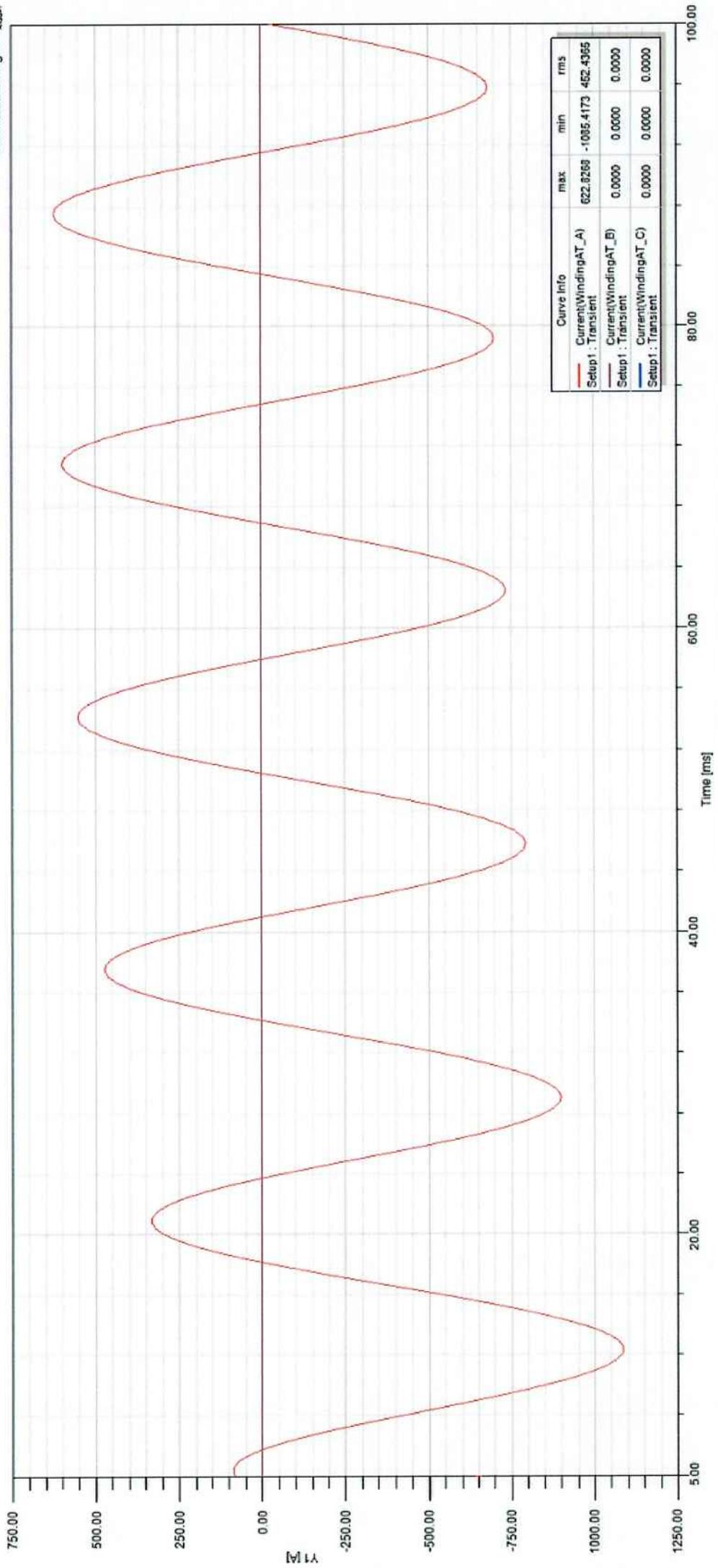


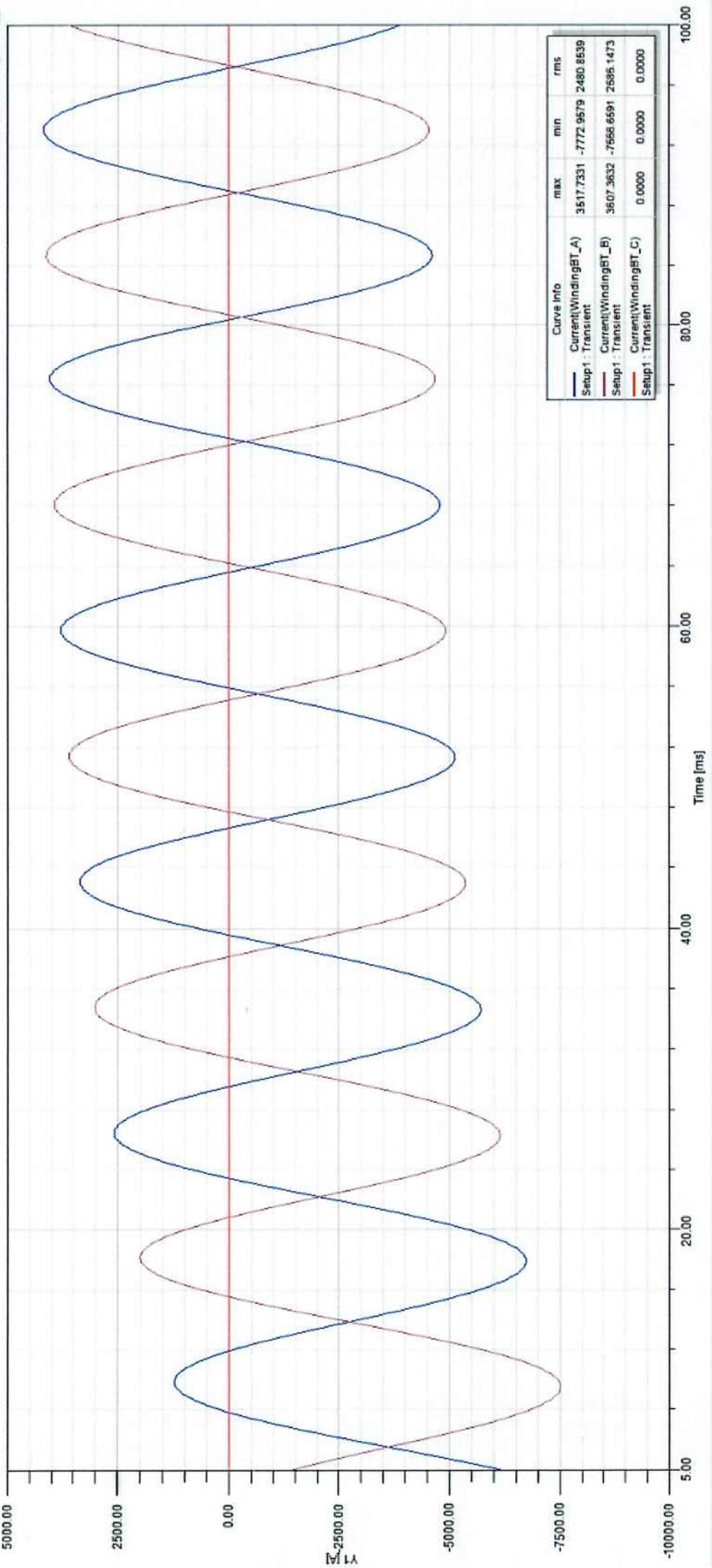


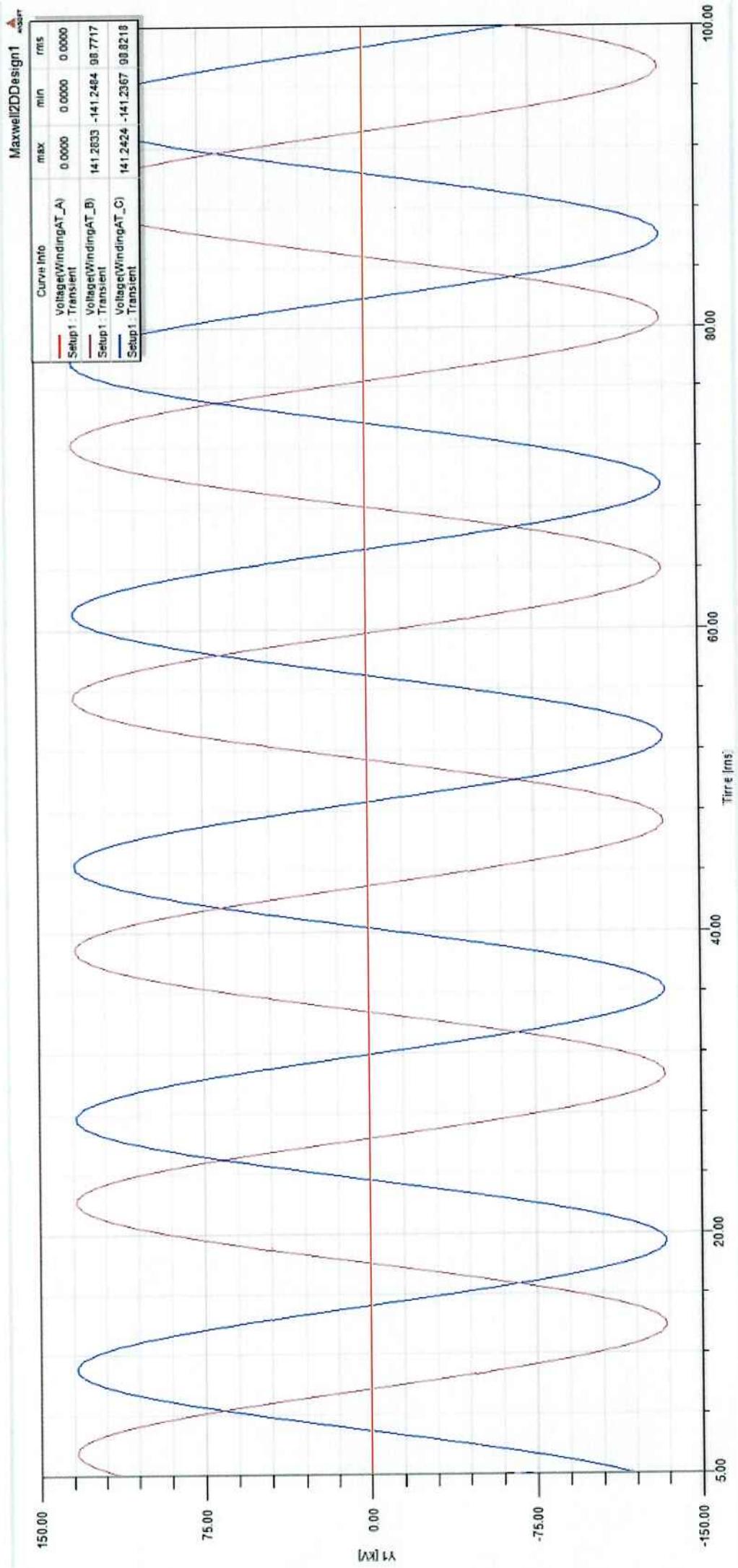


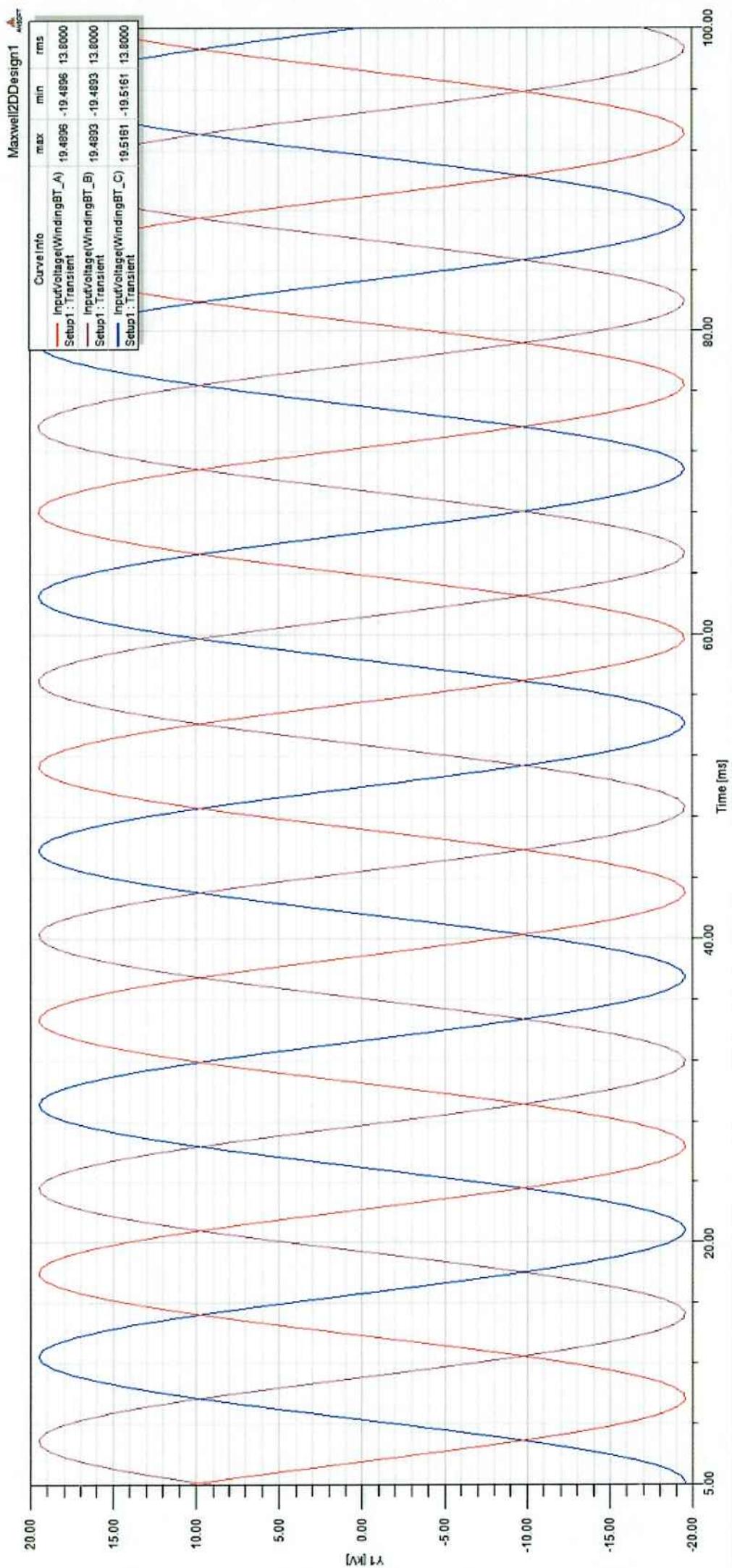
Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

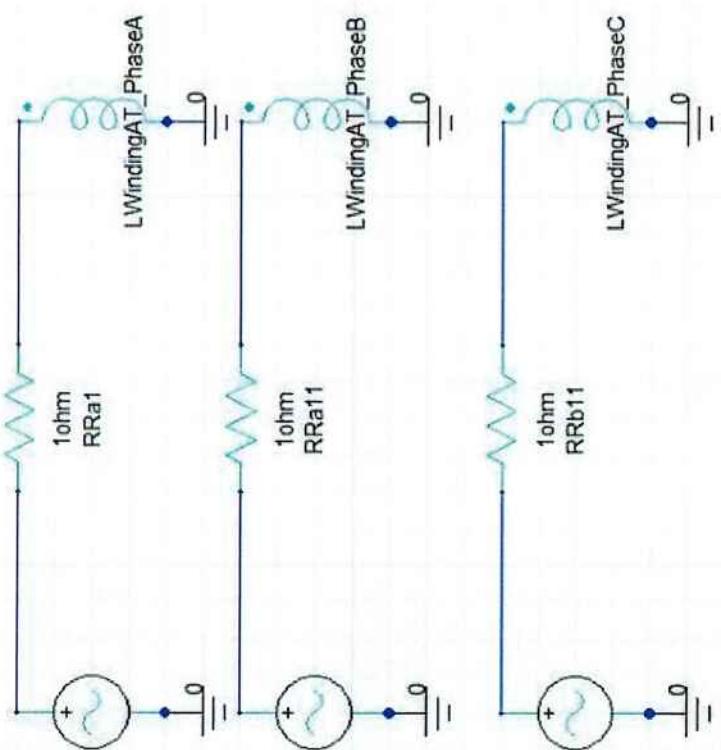
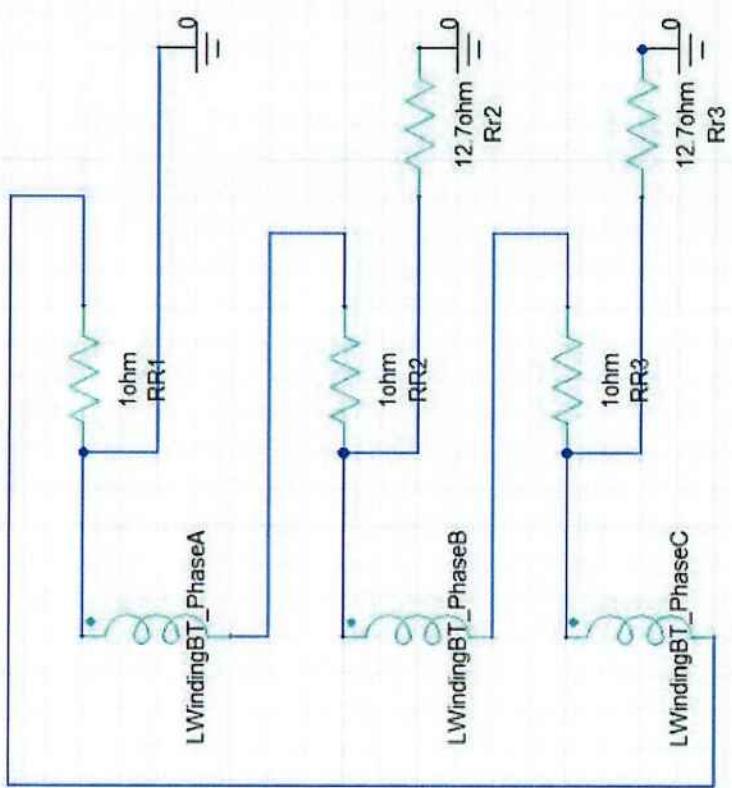
Anexo J
Simulação do Curto Circuito Fase Terra





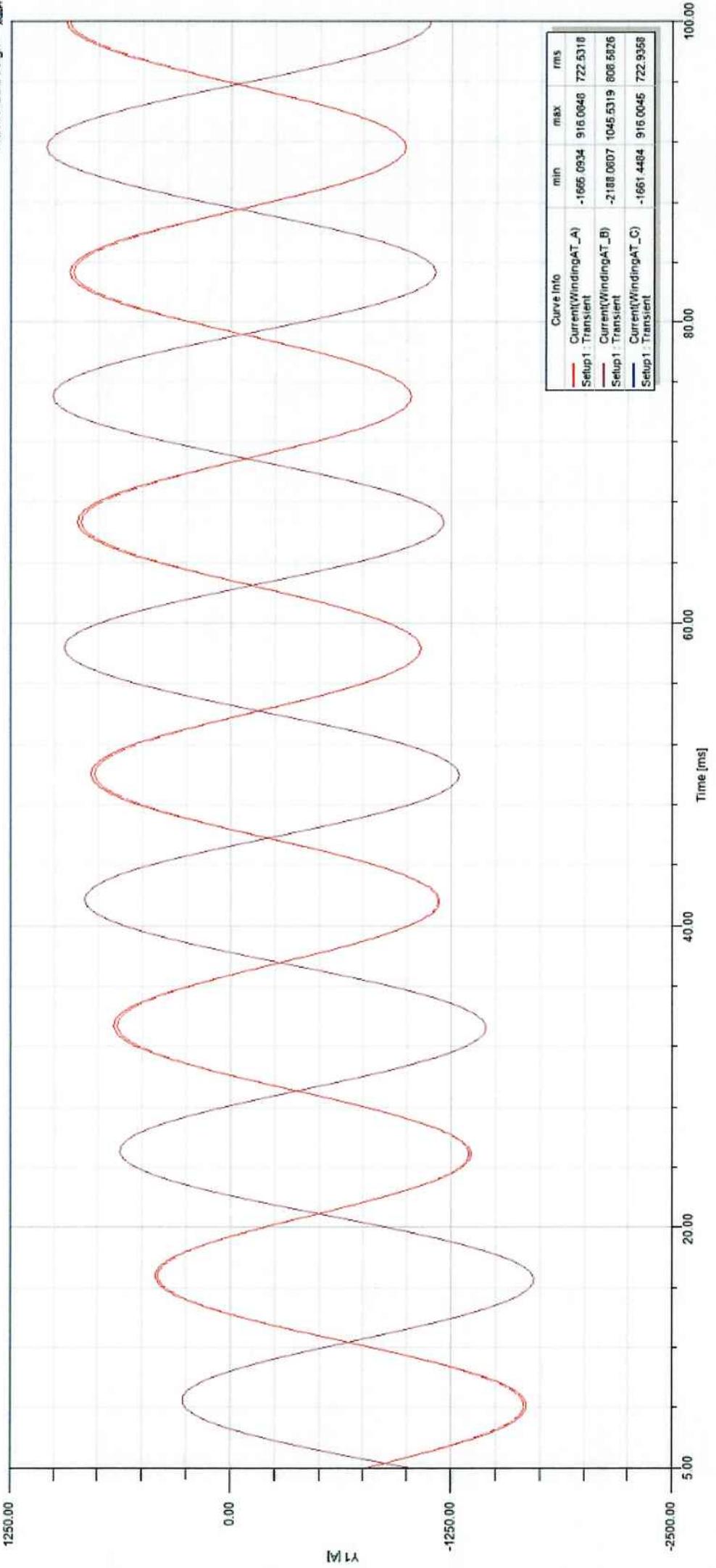


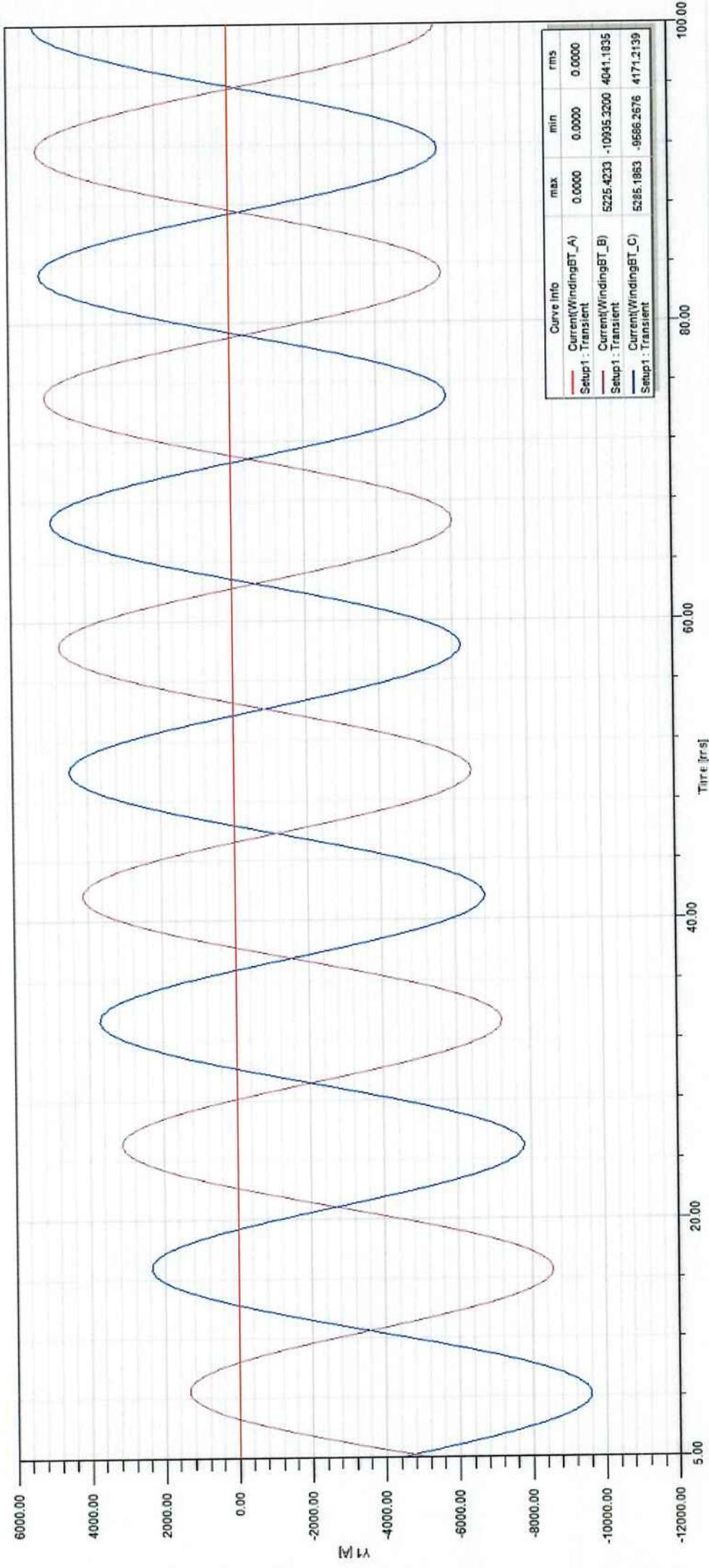


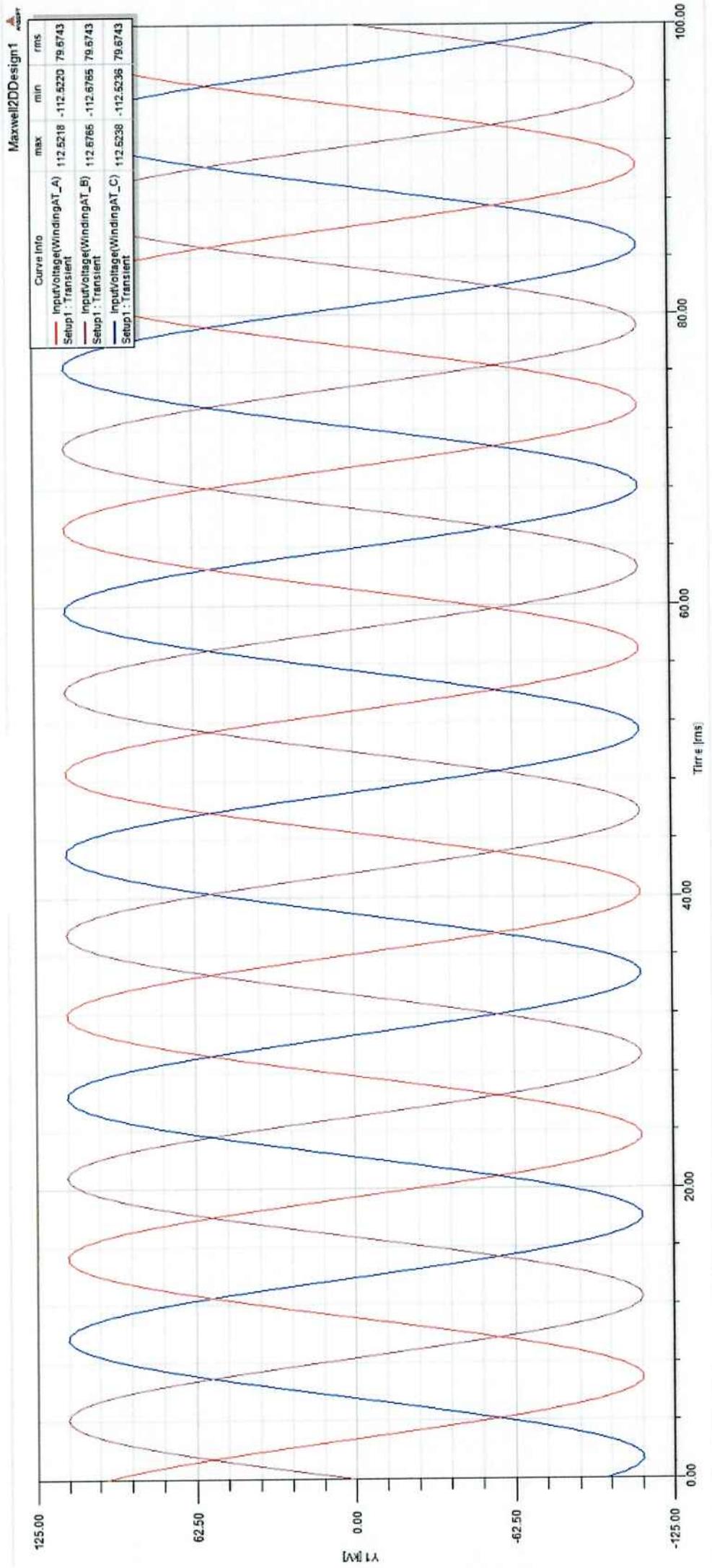


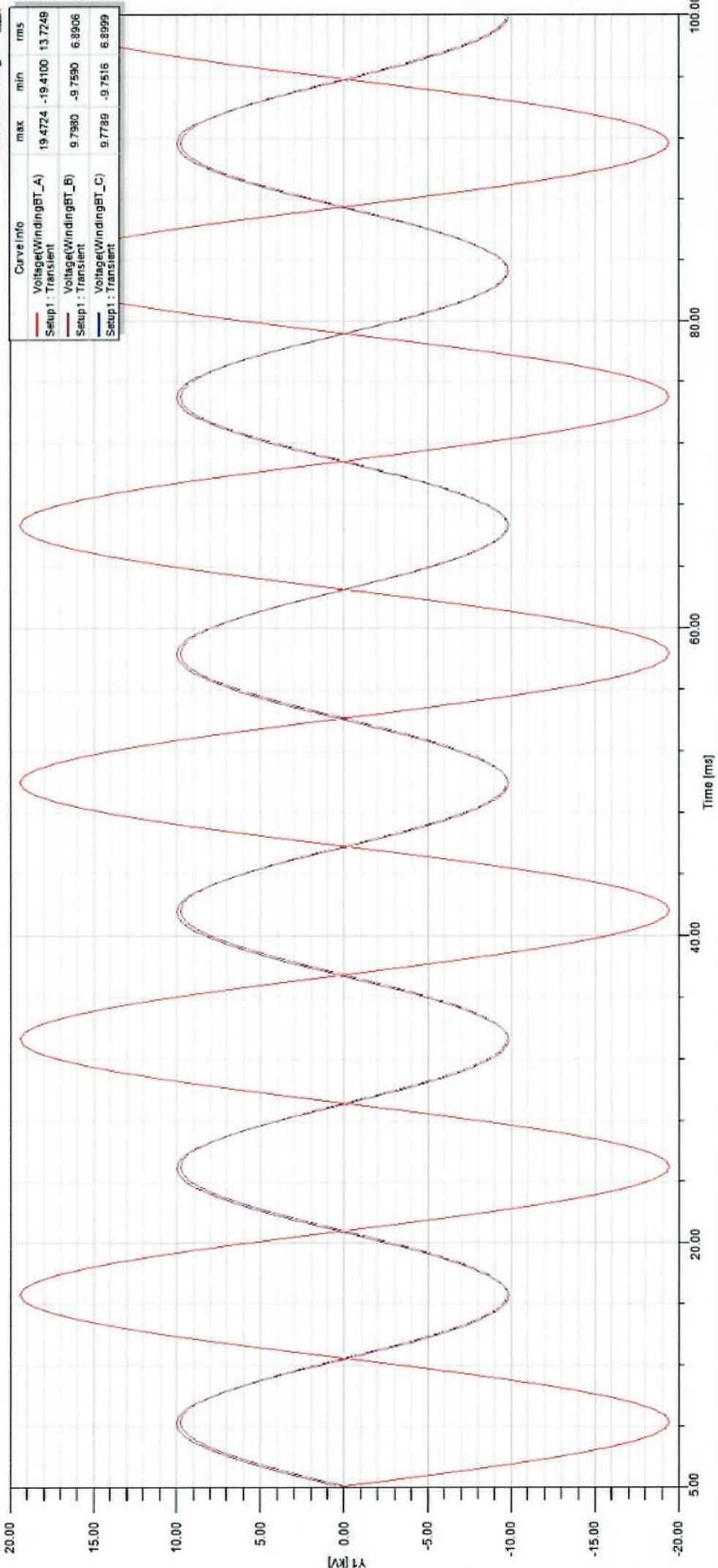
Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

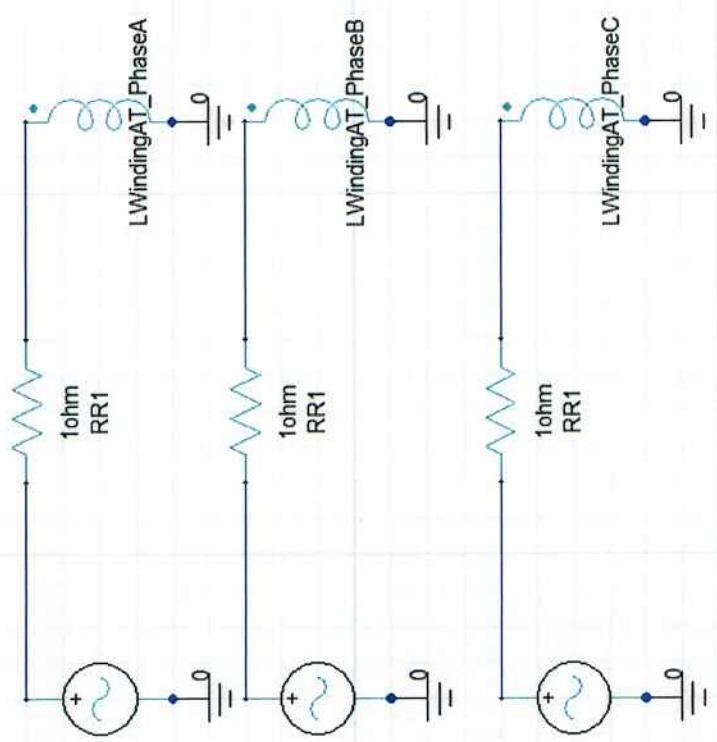
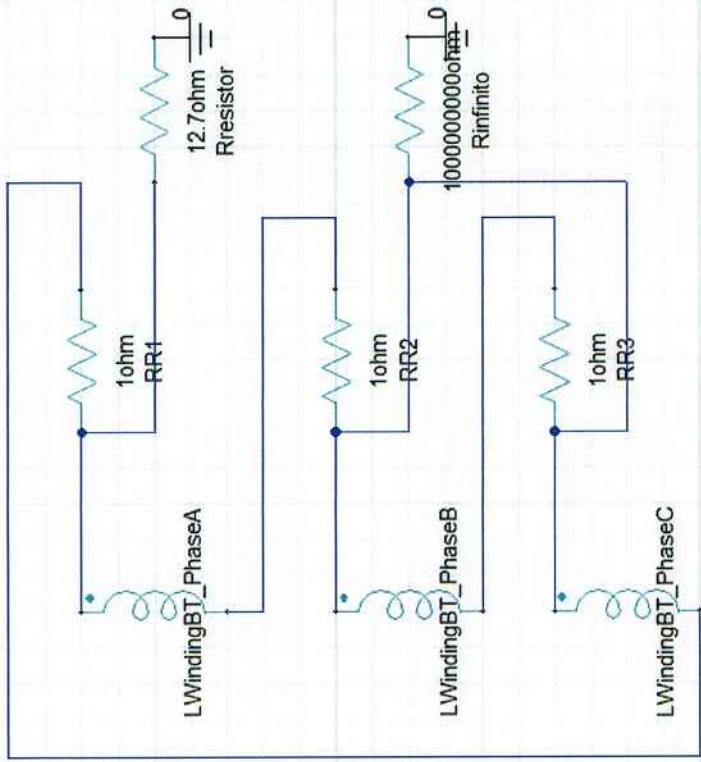
Anexo K
Simulação do Curto Circuito Dupla Fase











Projeto de Transformador de Potência Trifásico e Simulação de Curtos Circuitos

Anexo L
Simulação do Curto Circuito Trifásico

