

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

Robson Almeida Elias Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Janeiro de 2024

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

Robson Almeida Elias Filho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Aprovada por: Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.

Prof. Antônio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Prof. Bárbara Maria Oliveira Santos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2024

Almeida Elias Filho, Robson

Análise Técnico-Econômica de um Projeto de Transformador Trifásico a Seco Utilizando o Método dos Elementos Finitos e Algoritmos Genéticos/ Robson Almeida Elias Filho – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2024.

XVIII, 131 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 108-113.

1. Transformador Trifásico a Seco. 2. Elementos Finitos. 3. Algoritmos Genéticos. 4. *Payback*. I. Ferreira, Antônio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao Senhor Jesus. É o Senhor que me dá a vida e me sustenta com a Sua misericórdia, graça e amor. Toda honra, toda glória, todo poder e louvor sejam dados a Ele!

Em segundo lugar, à minha família, na figura dos meus pais, Ana Lúcia e Robson, e da minha irmã, Brunna. Eles me deram todo o apoio moral necessário, motivação, amor e foram muito compreensivos nos momentos mais difíceis dessa trajetória. Sem vocês, nada seria possível. Amor eterno!

Em seguida, gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador Antônio Carlos Ferreira. Vitorioso de uma batalha duríssima frente a um problema de saúde, lutando bravamente como um guerreiro que é. A sua força e a sua vontade de viver me inspiraram e serviram de exemplo e combustível para chegar até aqui. Obrigado por tudo!

Aos professores Antônio Carlos Siqueira de Lima e Bárbara Maria Oliveira Santos, por terem composto a banca e terem fornecido comentários enriquecedores e que agregaram ao tema abordado no trabalho.

Gostaria de agradecer também ao professor Maurício Aredes (*in memoriam*), que contribuiu solidamente com a minha formação, ministrando disciplinas na graduação e no mestrado, e que nos deixou recentemente. Obrigado, professor!

Durante a trajetória do mestrado, infelizmente perdi uma das pessoas que eu mais amava na minha vida: o meu tio Sérgio (*in memoriam*)! A dor ainda é latente e há um abismo no meu peito que nunca passará. Você com certeza estaria orgulhoso de presenciar esse momento. Eu te amo muito e isso nunca mudará! Para sempre será lembrado!

À minha bisavó Odette (*in memoriam*). Amor para a vida eterna! Para sempre será lembrada!

Por fim, aos meus amigos da graduação e do mestrado, por toda a ajuda e momentos de estudo compartilhados, e aos servidores de PEE, por todo suporte administrativo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE UM PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO A SECO UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

Robson Almeida Elias Filho

Janeiro/ 2024

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

No mundo atual, a sustentabilidade é uma pauta cada vez mais difundida por governos, fornecedores e consumidores, e um dos principais pilares desse conceito é a eficiência energética. Com isso, surge a necessidade de se atender às novas demandas de mercado, sem deixar de lado o fator econômico.

Os transformadores estão inseridos nesse contexto. A melhoria na entrega do equipamento passa pela fase de projeto, com ferramentas implementadas para modelagem e análise, como Elementos Finitos, que reduzem a necessidade de cálculos analíticos e funcionam como suporte para a validação prática. Técnicas de otimização, como os Algoritmos Genéticos, também podem ser empregadas, aumentando o valor agregado à solução e proporcionando vantagens competitivas para fabricantes, com opções atrativas para clientes.

Os resultados principais deste trabalho indicam ser possível, através dos métodos de simulação e otimização supracitados, aumentar a eficiência do equipamento alterando dimensionais mecânicos e materiais que o compõe. Além disso, também mostram que o investimento inicial em um modelo com perdas menores se paga em pouco tempo, considerando a vida útil do dispositivo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TECHNICAL-ECONOMICAL ANALYSIS OF A DRY THREE-PHASE TRANSFORMER USING THE FINITE ELEMENT METHOD AND GENETIC ALGORITHMS

Robson Almeida Elias Filho

January/ 2024

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

In the current world, sustainability is an agenda increasingly widespread by governments, suppliers and consumers, and one of the main pillars of this concept is the energy efficiency. With that, the need arises to meet new market demands, without neglecting the economic factor.

The transformers are inserted in this context. The improvement in equipment delivery goes through the design phase, with tools implemented for modelling and analysis, such as Finite Elements, which reduce the need for analytical calculations and work as support for practical validation. Optimization techniques, such as Genetic Algorithms, can also be employed, increasing the added value to the solution and providing competitive advantages for manufacturers, with attractive options for customers.

The main results of this work indicate that it is possible, through the aforementioned simulation and optimization methods, to increase the efficiency of the equipment by changing the mechanical dimensions and materials that compose it. Furthermore, they also show that the initial investment in a model with lower losses pays off in a short time, considering the useful life of the device.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos e Siglas	xiv
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. MOTIVAÇÃO	3
1.3. CONTEXTUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA	3
1.4. OBJETIVOS	8
1.5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO	8
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
CAPÍTULO 2	11
ASPECTOS DE PROJETOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA A SECO ..	11
2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS	11
2.2. APLICAÇÕES E COMPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS DO PROJETO BASE	19
2.3. PERDAS, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO	26
2.4. ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE	32
CAPÍTULO 3	39
ESTUDO DE CASO E PROJETO BASE	39
3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	39
3.2. METODOLOGIA	40
3.3. MODELAGEM DO PROJETO BASE	41
3.4. ENSAIO EM VAZIO DO PROJETO BASE	51
3.5. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO PROJETO BASE	58

3.6. CIRCUITO EQUIVALENTE, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO DO PROJETO BASE	63
CAPÍTULO 4.....	69
OTIMIZAÇÃO DO PROJETO E ANÁLISE DE <i>PAYBACK</i>.....	69
4.1. ESCOLHA DOS PARÂMETROS A SEREM OTIMIZADOS	69
4.2. A OTIMIZAÇÃO	70
4.3. NOVO PROJETO PÓS-OTIMIZAÇÃO	80
4.4. ENSAIO EM VAZIO PÓS-OTIMIZAÇÃO	85
4.5. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO PÓS-OTIMIZAÇÃO.....	91
4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO DO PROJETO PÓS-OTIMIZAÇÃO	97
4.7. COMPARATIVO DE ÍNDICES DE DESEMPENHO ENTRE PROJETOS.....	101
4.8. CÁLCULO DO TEMPO DE <i>PAYBACK</i>	103
CAPÍTULO 5.....	106
CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICE A	114
ELEMENTOS FINITOS E ALGORITMOS GENÉTICOS.....	114
A.1. ELEMENTOS FINITOS	114
A.1.1. Definição do método	114
A.1.2. Elementos Finitos aplicados ao Eletromagnetismo.....	115
A.1.2.1. Abordagem bidimensional	115
A.2. ALGORITMOS GENÉTICOS.....	125
A.2.1. Visão geral.....	125
A.2.2. Seleção	125
A.2.2.1. Método da roleta	125
A.2.2.2. Método do torneio.....	127
A.2.3 Cruzamento	127

A.2.3.1.	Com um ponto de corte.....	128
A.2.3.2	Com dois pontos de corte.....	128
A.2.3.3	Uniforme	129
A.2.4	Mutação	129
A.2.5.	Parametrização do processo	130

Lista de Figuras

Figuras 1: a - Núcleo envolvido; b - Núcleo envolvente [13].	12
Figura 2 - Fluxos dispersos e mútuo em uma das fases de um transformador [14]. Adaptado pelo autor.	12
Figura 3 - Modelo do circuito equivalente de uma das fases, com representação do transformador ideal [16]. Adaptado pelo autor.	14
Figura 4 - Modelo do circuito equivalente de uma das fases de um transformador trifásico refletido ao primário [16]. Adaptado pelo autor.	14
Figura 5 - Conexão Δ - Δ .	16
Figura 6 - Conexão Y-Y.	17
Figura 7 - Conexão Δ -Y.	17
Figura 8 - Conexão Y- Δ .	18
Figura 9 - Esquema de conexão e fasores do grupo de ligação Dyn1 [19].	19
Figura 10 - Transformador a seco [20].	20
Figuras 11: a - Vista frontal do núcleo ferromagnético laminado [22]; b - Vista superior através de corte de seção reta [23].	21
Figuras 12: a - Sobreposição no canto; b - Sobreposição na reta [21].	22
Figuras 13: a - Juntas não-mitradas; b - Juntas mitradas [21].	22
Figura 14 - Bobinas de alta e baixa tensão [10]. Adaptado pelo autor.	23
Figura 15 - Sistema de monitoramento de temperatura [10].	24
Figura 16 - Sistema de ventilação forçada – Adaptado pelo autor [3-17].	25
Figura 17 - Laço de histerese [27].	27
Figura 18 - Circulação de correntes parasitas nas superfícies das lâminas [23].	29
Figura 19 - Circuito do ensaio em vazio em uma das fases [11]. Adaptado pelo autor.	33
Figura 20 - Circuito do ensaio de curto-circuito em uma das fases [11]. Adaptado pelo autor.	34
Figura 21 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Δ - Δ .	36
Figura 22 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Y-Y com neutros aterrados.	37
Figura 23 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Δ -Y aterrado.	37
Figura 24 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Y aterrado- Δ .	38
Figura 25 - Esquema ilustrativo sobre as etapas do trabalho.	41
Figura 26 - Vista frontal [31].	42

Figura 27 - Vista lateral [31].	42
Figura 28 - Vista superior [31].	43
Figura 29 - Exemplo de como os dados são expressos na placa de um transformador [32]. ...	43
Figura 30: Dimensionais das bobinas indicados na vista frontal.	44
Figura 31: Dimensionais do núcleo indicados na vista frontal.	45
Figura 32: Profundidade do núcleo indicada na vista lateral.	46
Figura 33: Distância entre o centro do eixo vertical que passa pela camada central do núcleo e as quinas indicada na vista lateral.	46
Figura 34 - Curva B x H do material do núcleo [33].	47
Figura 35 - Curva P x B do material do núcleo [33].	47
Figura 36 - Modelo 3D do equipamento.	48
Figura 37 - Modelo 2D do equipamento.	48
Figura 38 - Tensões no lado BT.	52
Figura 39 - Correntes no lado AT.	52
Figura 40 - Correntes no lado BT.	53
Figura 41 - Perdas no núcleo.	53
Figura 42 - Fluxo concatenado no lado BT.	55
Figura 43 - Distribuição da densidade de fluxo pelo núcleo.	56
Figura 44 - Distribuição das linhas de fluxo pelo núcleo.	57
Figura 45 - Tensões no lado AT.	58
Figura 46 - Tensões no lado BT.	59
Figura 47 - Correntes no lado AT.	59
Figura 48 - Correntes no lado BT.	60
Figura 49 - Perdas nas bobinas.	60
Figura 50 - Tensões de fase induzidas no lado AT.	63
Figura 51 - Circuito equivalente do projeto base do transformador referido ao lado AT.	64
Figura 52 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT.	65
Figura 53 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da BT.	65
Figura 54 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT e da BT.	66
Figura 55 – Tensão de fase em vazio no lado AT.	67
Figura 56 - Fluxograma dos AGs.	70
Figura 57 - Distância média entre os indivíduos através das gerações.	76
Figura 58 - Filhos dos cruzamentos dos indivíduos.	77
Figura 59 - Histograma de classificação.	77

Figura 60 - Espalhamento médio x iterações.	78
Figura 61 - Fronteira de Pareto (<i>Objective 1</i> - Perdas no Núcleo; <i>Objective 2</i> - Custo do Equipamento).	78
Figura 62 - Projeto do novo transformador – 3D.	81
Figura 63 - Vista frontal 2D do novo transformador.	81
Figura 64 - Tensões no lado BT.	86
Figura 65 - Correntes no lado AT.	86
Figura 66 - Correntes no lado BT.	87
Figura 67 - Perdas no núcleo.	87
Figura 68 - Fluxo concatenado no lado BT.	88
Figura 69 - Distribuição da densidade de fluxo pelo núcleo.	90
Figura 70 - Distribuição das linhas de fluxo pelo núcleo.	90
Figura 71 - Tensões no lado AT.	92
Figura 72 - Tensões no lado BT.	92
Figura 73 - Correntes no lado AT.	93
Figura 74 - Correntes no lado BT.	93
Figura 75 - Perdas nas bobinas.	94
Figura 76 - Tensões de fase induzidas no lado AT.	96
Figura 77 - Circuito equivalente do projeto otimizado do transformador.	97
Figura 78 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT.	98
Figura 79 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da BT.	98
Figura 80 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT e da BT.	99
Figura 81 – Tensão de fase em vazio no lado AT.	100
Figura 82 - Malha de elementos finitos usando triângulos [44].	114
Figura 83 - Elemento finito triangular de primeira ordem.	118
Figura 84 - Elementos finitos triangulares individuais.	123
Figura 85 - Elementos finitos triangulares agrupados.	123
Figura 86 - Gráfico de probabilidades de seleção e fração sorteada para cada indivíduo.	127
Figura 87 - Cruzamento com um ponto de corte.	128
Figura 88 - Cruzamento com dois pontos de corte.	128
Figura 89 - Cruzamento uniforme.	129
Figura 90 - Mutação no genótipo.	129

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Elementos do código IP e seus significados [25].	25
Tabela 2 - Classes de perdas para transformadores com tensão máxima de até 15 kV [30]. ...	31
Tabela 3 - Legenda dos componentes do transformador [31].	43
Tabela 4 - Dados dimensionais das bobinas BT e AT.	44
Tabela 5 - Dados dimensionais do núcleo ferromagnético.	45
Tabela 6 - Variáveis do problema de otimização.	71
Tabela 7 - Resultados do novo projeto do transformador.	79
Tabela 8 - Comparativo volumétrico de material entre projetos.	82
Tabela 9 - Comparativo de impedância, relação X/R, rendimento e regulação de tensão entre projetos de simulação.	101
Tabela 10 - Aptidão por indivíduo.	126
Tabela 11 - Geração aleatória de números.	126
Tabela 12 - Seleção por torneio.	127

Lista de Símbolos e Siglas

a	Relação entre espiras do enrolamento primário e do secundário
A	Área da seção reta do núcleo
$\vec{A}$	Vetor potencial magnético
$[A]$	Matriz dos potenciais vetores magnéticos
A_{AT}	Área da seção transversal do condutor de alta tensão
A_{BT}	Área da seção transversal do condutor de baixa tensão
AGs	Algoritmos Genéticos
AT	Alta Tensão
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético
$B_{\max}$	Densidade de fluxo magnético máxima
B_R	Densidade de fluxo magnético residual
BT	Baixa Tensão
C	Custo médio
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
$\vec{D}$	Vetor densidade de fluxo elétrico
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
E_1	Força eletromotriz induzida no enrolamento primário
E_2	Força eletromotriz induzida no enrolamento secundário
E_{CA}	Tensão induzida de circuito aberto
E_{eficaz}	Tensão induzida eficaz
E_{Loss}	Energia perdida
E_{Loss}^A	Perdas de energia do transformador da Categoria A
E_{Loss}^B	Perdas de energia do transformador da Categoria B
$E_{\max}$	Tensão induzida máxima
E_{Δ}	Diferença de perdas de energia entre os modelos
ΔE_{BT}	Queda de tensão longitudinal no lado BT
EP	Exame de Partículas
EPAS	Exame de Partículas com Aprendizagem Social
f	Frequência
FOC	Função Objetivo de Custo

FOPN	Função Objetivo de Perdas no Núcleo
$\vec{H}$	Vetor intensidade de campo magnético
FEMs	Forças Eletromotrizes
FMMs	Forças Magnetomotrizas
H_S	Intensidade de campo magnético de saturação
I	Corrente de linha
I_0	Corrente de excitação
$I_{0\text{fase}}$	Corrente de fase de excitação
I_2	Corrente no secundário
I'_2	Corrente no secundário referida ao primário
I_{AT}	Corrente no lado de alta tensão
$I_{AT\text{Nominal}}$	Corrente nominal no lado de alta tensão
$I_{AT\text{Simulação}}$	Corrente circulante no lado de alta tensão encontrada na simulação
$I_{AT\text{Teórica}}$	Corrente nominal circulante no lado de alta tensão encontrada através do cálculo teórico
I_{BT}	Corrente circulante no lado de baixa tensão
I_{CC}	Corrente de linha de curto-circuito
$I_{CC\text{fase}}$	Corrente de fase de curto-circuito
I_F	Corrente de fase
I_{F1}	Corrente de fase do primário
I_{F2}	Corrente de fase do secundário
I_{Fe}	Corrente de perdas no núcleo
I_μ	Corrente de magnetização
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IP	Índice de Proteção
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente
[J]	Matriz de densidade de corrente
K_c	Coeficiente de correntes parasitas clássicas
K_e	Coeficiente de correntes parasitas por excesso
K_h	Coeficiente de histerese
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>

l	Comprimento do lado da seção reta do núcleo
l_{AT}	Comprimento do condutor de alta tensão
l_{BT}	Comprimento do condutor de baixa tensão
L_1	Indutância de dispersão do enrolamento primário
L_μ	Indutância de magnetização
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
M.E.F.	Método dos Elementos Finitos
MT	Média Tensão
N	Número de espiras
N_1	Número de espiras do enrolamento primário
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário
P_0	Perdas no núcleo
P_{CA}	Potência trifásica de circuito aberto
P_{CC}	Potência trifásica de curto-circuito
P_E	Economia de energia por ano na comparação entre os projetos
$P_{entrada}$	Potência trifásica de entrada
P_i^A	Custo do transformador da Categoria A
P_i^B	Custo do transformador da Categoria B
P_k	Perdas em carga
$P_{núcleo}$	Perdas no núcleo
$P_{saída}$	Potência trifásica de saída
PIS	Programa de Integração Social
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
r	Distância entre o centro do eixo vertical que passa pela camada central do núcleo e as quinas
R	Resíduo
R_1	Resistência do enrolamento primário
R'_1	Resistência do enrolamento primário referida ao secundário
R_2	Resistência do enrolamento secundário
R'_2	Resistência do enrolamento secundário referida ao primário
R_{Al}	Resistência do condutor de alumínio
R_{AT}	Resistência no lado de alta tensão
R_{BT}	Resistência no lado de baixa tensão

R_{CC}	Resistência de curto-circuito
R_{Cu}	Resistência do condutor de cobre
R_{eq}	Resistência longitudinal equivalente
RS	Recozimento Simulado
RT	Relação de Transformação
[S]	Matriz de rigidez
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica nominal
[T]	Matriz de massa
TPB	Tempo de <i>payback</i>
V	Tensão de linha
V_1	Tensão aplicada no terminal primário
V_2	Tensão aplicada no terminal secundário
V'_2	Tensão aplicada no terminal secundário referida ao primário
$V_{AT_{Simulação}}$	Tensão de fase aplicada no lado de alta tensão na simulação
$V_{CA_{fase}}$	Tensão aplicada de circuito aberto
V_{CC}	Tensão de linha de curto-circuito
$V_{CC_{fase}}$	Tensão de fase de curto-circuito
V_F	Tensão de fase
V_{F1}	Tensão de fase do primário
$V_{F1_{nominal}}$	Tensão de fase nominal do primário
V_{F2}	Tensão de fase do secundário
$V_{plena\ carga}$	Tensão terminal em plena carga
V_{vazio}	Tensão terminal em vazio
W	Função de ponderação
X_1	Reatância de dispersão do enrolamento primário
X'_1	Reatância de dispersão do enrolamento primário referida ao secundário
X_2	Reatância de dispersão do enrolamento secundário
X'_2	Reatância de dispersão do enrolamento secundário referida ao primário
X_{eq}	Reatância longitudinal equivalente
X_{μ}	Reatância de magnetização
Z_0	Impedância de magnetização
Z_{CA}	Impedância de circuito aberto

Z_{BT}	Impedância do lado de baixa tensão
Z'_{BT}	Impedância do lado de baixa tensão referida ao lado de alta tensão
$Z_{Catálogo_{AT}}$	Impedância de dispersão disponível em catálogo referida ao lado de alta tensão
Z_{CC}	Impedância de curto-circuito
ε	Permissividade elétrica do meio
ε_0	Permissividade elétrica no vácuo
ε_r	Permissividade elétrica relativa entre o meio e o vácuo
η	Rendimento
$\eta_{Catálogo}$	Rendimento do transformador do catálogo
λ_{max}	Fluxo concatenado máximo
μ	Permeabilidade magnética do meio
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa entre o meio e o vácuo
ρ	Densidade de carga
ρ_{AT}	Resistividade do material utilizado no lado de alta tensão
ρ_{BT}	Resistividade do material utilizado no lado de baixa tensão
σ	Condutividade elétrica
Φ	Fluxo magnético no núcleo
Φ_{max}	Amplitude máxima de fluxo magnético no núcleo
ω	Frequência angular
$\nabla \cdot$	Operador divergente
$\nabla \times$	Operador rotacional

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados uma breve apresentação sobre o tema, a motivação, os principais objetivos, as limitações do estudo e a estrutura da dissertação.

1.1. APRESENTAÇÃO

Os transformadores são equipamentos elétricos que permitem a interface entre os sistemas de geração, transmissão, distribuição e cargas através da mudança nos níveis de tensão praticados em cada uma dessas etapas. Este trabalho promove foco nos transformadores comumente utilizados no setor de distribuição, para direta alimentação das cargas.

Esses dispositivos são constituídos de enrolamentos primários e secundários, acoplados através de um núcleo ferromagnético. O primário é excitado com uma tensão senoidal, que proporciona um fluxo magnético variante no tempo através do núcleo, induzindo no secundário uma tensão igualmente senoidal, com valor proporcional à relação de espiras entre ambos os enrolamentos.

Eles podem ser classificados como monofásicos, caso haja apenas uma fase, ou trifásicos, para o caso de três fases. Os transformadores monofásicos são utilizados geralmente em aplicações de menor porte, com cargas menores e com reduzida diferença de tensão entre os enrolamentos, como por exemplo na alimentação de circuitos de comando. Para o atendimento de cargas trifásicas elevadas dentro do sistema de distribuição, utiliza-se o tipo trifásico, como é abordado neste trabalho.

Também podem ser elevadores, onde o nível de tensão aumenta do primário para o secundário, ou abaixadores, onde o nível de tensão é reduzido. Os transformadores elevadores geralmente são empregados na interligação entre os sistemas de geração, que

estão na MT – Média Tensão¹, e de transmissão, que estão na AT – Alta Tensão², onde a tensão é aumentada para diminuir os níveis de corrente e, assim, reduzir as perdas ôhmicas nas linhas. Para o caso deste trabalho, é analisado um transformador trifásico utilizado no sistema de distribuição, para o atendimento de cargas trifásicas elevadas. Além disso, é um transformador abaixador, típico da aplicação em distribuição, que recebe a alimentação da MT e supre a BT - Baixa Tensão³.

Quanto à isolação e resfriamento, existem dois tipos mais comuns: os transformadores a óleo ou a ar. Na primeira categoria, o fluido mais utilizado atualmente é o óleo mineral, que possui elevada rigidez dielétrica e excelente capacidade de dissipação de calor. Por isso são mais utilizados em transformadores na AT, que apresentam níveis de potência e tensão superiores. Eles substituíram o Ascarel, que era altamente tóxico, e estão começando a entrar em processo de obsolescência, com o surgimento de óleos vegetais biodegradáveis. Já os transformadores isolados a ar do tipo seco possuem uma rigidez dielétrica menor do que a do óleo isolante e menor capacidade de dissipação de calor. Entretanto, conforme afirma SIEMENS ENERGY [10], eles possuem uma série de vantagens em relação aos primeiros:

- Representam metade da área ocupada;
- Pode ter instalação interna próxima às cargas, o que economiza os custos referentes a barramentos e cabeamentos;
- Não apresentam a necessidade de obras civis, como portas corta-fogo, por exemplo;
- Praticamente isento de manutenção;
- Não representam riscos de incêndios e vazamentos, que podem contaminar o ar e o solo.

Uma vez que o transformador desse trabalho não apresenta níveis de tensão tão elevados por estar localizado na distribuição, não se faz necessário o uso de isolamento a óleo. Assim, é utilizado o modelo a seco.

¹ De acordo com a ABNT [1], a MT está compreendida entre tensões de 1 e 36,2 kV.

² Segundo a ABNT [1], a AT corresponde aos valores acima de 36,2 kV.

³ De acordo a ABNT [2], BT corresponde aos valores abaixo de 1 kV.

1.2. MOTIVAÇÃO

O transformador é um dos equipamentos mais importantes e caros de um sistema de distribuição de energia. Entretanto, por muitas vezes, é tratado como um equipamento comum e que apresenta pouca diferença de solução entre os fabricantes. Dessa forma, a ideia é mostrar que o *design* mecânico e os materiais utilizados no projeto impactam diretamente no desempenho do equipamento.

Sob o ponto de vista do fabricante, desenvolver uma solução mais eficiente o permite se colocar em posição privilegiada perante aos concorrentes. Isso aumenta o volume de vendas e o valor agregado que a marca proporciona ao seu portfólio, ampliando a sua influência dentro do mercado.

Olhando pela perspectiva do cliente, ele terá a oportunidade de ter acesso a um produto tecnicamente superior, e que se mostrará mais econômico com o tempo, o que vai gerar aumento nos seus lucros ao final de cada mês, visto que a maior parte das atividades fins dos aquisitores são de indústria, comércio, bens e serviços.

1.3. CONTEXTUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA

A análise de transformadores e sua otimização estão inseridas em um ramo consolidado de pesquisa, com muitas publicações sobre o tema. Entretanto, o assunto continua sendo estudado sob novos pontos de vista, abordagens e aplicações.

SILVA [3] apresenta um estudo comparativo do comportamento dos modelos de circuitos equivalentes propostos para o transformador nas diversas faixas de frequência. Para baixas e médias frequências, em particular, ele representou o modelo com um núcleo, uma capacitância de entrada em derivação, a primeira metade da impedância longitudinal do primário, capacitância própria do primário em derivação, a outra metade da impedância longitudinal do primário, o conjunto transversal da indutância mútua entre primário e secundário em série com o elemento que representa a relação entre o fluxo e a corrente em paralelo com a capacitância mútua entre primário e secundário, a primeira metade da impedância longitudinal do secundário, capacitância própria do secundário em

derivação, a outra metade da impedância longitudinal do secundário e uma capacitância de saída em derivação, sendo esses parâmetros assumidos como concentrados.

Em seguida, ele realizou uma simulação com o transformador modelado, aplicando tensão nominal nos terminais BT, com carga nominal conectada ao lado AT. Ele variou a frequência, partindo da fundamental e avançando em múltiplos de 3, e registrou os valores das correntes primária, secundária e de excitação. Com o aumento da frequência, as correntes nos enrolamentos principais diminuíram e a corrente de excitação se estabilizou. Em baixas frequências, ele concluiu que as capacitâncias eram irrelevantes na representação do modelo. Ele também variou a frequência de 0 Hz a 100 kHz. A partir de 100 Hz, a impedância começa a diminuir até se estabilizar entre 6 e 10 kHz. Deste último valor em diante, a impedância cresce consideravelmente. Assim, ele concluiu que, para frequências muito elevadas, a modelagem distribuída dos parâmetros torna-se de suma importância e o modelo de parâmetros concentrados mostra-se pouco sólido.

MARTINS [4] propõe um sistema de monitoramento preditivo de defeitos em transformadores e utiliza dois métodos para encontrar as impedâncias do dispositivo: a medição direta entre os terminais e a resposta em frequência, ambos utilizando diferentes frequências dentro de um espectro de análise. Ele explica que a primeira técnica consiste em usar uma ponte de medição de impedâncias com frequência variável, geralmente indo de 10 Hz a 1 MHz. O número de medições realizadas é função do número de enrolamentos do transformador, ou seja, para um transformador trifásico são seis medições. Na segunda técnica, um sinal de tensão é aplicado em uma das extremidades de um enrolamento e é verificado na outra extremidade do mesmo enrolamento ou de algum outro o efeito desta excitação. O sinal é medido em forma de tensão ou corrente, sendo esta última capaz de proporcionar tanto a obtenção da impedância quanto da admitância no trecho. O sinal pode ser aplicado com um impulso de baixa amplitude ou aplicação de sinais senoidais na faixa de frequência desejada.

MEHTA e PATEL [5] sugerem a otimização de um transformador trifásico de núcleo envolvido a óleo utilizando AGs – Algoritmos Genéticos e comparam com uma técnica convencional de geração de múltiplos projetos. Nesse caso, o transformador estudado é de pequeno porte, com 100 kVA de potência, e 50 Hz.

A técnica tradicional é utilizada por eles para otimização de custo e considera como dados de entrada, por exemplo, tensões nominais dos enrolamentos, tipo de conexão e fator de empilhamento do núcleo. Em seguida, são calculados alguns parâmetros, como a dimensão das bobinas, do núcleo, as perdas totais e a regulação de tensão. O número de vezes que esse cálculo é feito representa o universo de projetos propostos e leva em conta a multiplicação da quantidade de valores gerados a partir de quatro variáveis: fator K, densidade máxima de fluxo, densidade de corrente no enrolamento AT e densidade de corrente no enrolamento BT. Essas possuem faixa e tamanho de passo definidos e fecham o *looping* dos cálculos. Então, é avaliado se o projeto atende às restrições propostas. Se não, ele é rejeitado. Se sim, ele é aceito. Dentre todos os projetos aceitos, é selecionado aquele de menor custo.

Já os AGs – Algoritmos Genéticos propostos por eles apresentam dois cenários: o primeiro, multiobjetivo e sem restrições, minimiza o custo total da parte ativa, perdas totais, impedância percentual e volume do tanque de óleo do transformador. O segundo, mono-objetivo, minimiza o custo do projeto, obedecendo restrições de perdas impostas pela *Bureau of Energy Efficiency*. Como diferencial, este trabalho realizou uma comparação de resultados utilizando diferentes operadores de seleção de AGs, como por exemplo, seleção por roleta e por torneio. Além disso, foi implementado um operador de elitismo, que consiste em reproduzir o melhor indivíduo de uma geração na geração seguinte, contribuindo para evitar a piora de soluções ao longo das gerações. Como um resultado interessante, foi obtida uma economia de 2,71% no custo utilizando o operador de seleção por torneio, quando comparado à técnica convencional.

KUL *et al.* [6] implementam a otimização de perdas no núcleo de um transformador trifásico também de 100 kVA, mas dessa vez a seco e utilizando outras cinco técnicas metaheurísticas, dentre elas a de Enxame de Partículas com Aprendizagem Social – EPAS, associadas a uma modelagem e análise utilizando o M.E.F. – Método dos Elementos Finitos. O EPAS tem a inicialização semelhante ao método de Enxame de Partículas – EP tradicional, onde vetores de posição iniciais são criados de forma aleatória, sendo cada um deles uma solução candidata, com o algoritmo classificando as soluções de acordo com a avaliação da função de aptidão. O ponto distintivo é que cada partícula aprende com as outras a corrigir o seu comportamento.

Dentre as variáveis obtidas através do processo de otimização, estão a área da seção transversal do núcleo, a densidade de corrente nas bobinas, o fator de preenchimento das janelas, a densidade máxima de fluxo magnético, o número de espiras do primário e as áreas das seções transversais dos enrolamentos primário e secundário. Após 2000 iterações, o EPAS proporcionou ao transformador otimizado apresentar uma eficiência de 99,05%, contra 97,60% do projeto de referência. A análise pelo M.E.F. mostrou que a densidade de fluxo diminuiu, reduzindo assim as perdas no ferro. Este trabalho é interessante, pois utiliza uma técnica de otimização que ainda não havia sido aplicada até então para soluções em transformadores a seco.

PHAENGKIEO e RUANGSINCHAIWANICH [7] propuseram a otimização de transformadores a seco utilizando os AGs e fazendo uma análise dos resultados com o M.E.F. Foram considerados como base protótipos monofásico e trifásico do equipamento, usando bobinas de cobre, com potências de 165 VA e de 1 kVA, respectivamente. Nesse caso, a única função objetivo do problema era a de minimização de perdas (núcleo e bobinas). Porém, eles impuseram algumas restrições, como de máxima densidade de fluxo e volume do núcleo. São cinco as variáveis de projeto adotadas: a espessura do núcleo, o número de espiras do primário e do secundário e as bitolas dos condutores do primário e do secundário. Por fim eles calcularam os custos dos projetos e compararam com os preços de referência, apesar de não colocar esse parâmetro como uma função objetivo do problema a ser minimizada. Como resultados, eles obtiveram uma redução de 18,57% e 27,92% para as perdas dos transformadores monofásico e trifásico, respectivamente, em relação aos protótipos. O custo do transformador monofásico reduziu em 5,13% e o do trifásico aumentou em 4,06%. Além da análise eletromagnética, os autores também fizeram uma térmica, que representa um ponto de diferenciação para este trabalho. Houve uma redução de 16,04% e de 6,72% na temperatura do equipamento.

KHATRI *et al.* [8] apresentam um comparativo de otimização do custo total da parte ativa de um transformador entre método convencional, AGs e Recozimento Simulado – RS. Além dessa função objetivo, são apresentadas restrições de tensão induzida, fator de preenchimento da bobina de cobre, aumento da temperatura, eficiência, corrente de excitação e regulação de tensão. As variáveis do problema são o número de espiras no lado BT, a máxima densidade de fluxo, a largura da perna do núcleo e a altura da janela do núcleo. O equipamento é de médio porte e possui uma potência nominal de 630 kVA,

com operação em 50 Hz. Os métodos de AGs e RS apresentaram reduções no custo em relação ao método convencional de 1,25% para o primeiro e 1,24% para o segundo. O ponto a se destacar desse trabalho foi ter trazido outro método de metaheurística para a otimização de transformadores. Entretanto, não foram alcançadas melhorias significativas em relação ao método tradicional.

Como foi possível notar, o M.E.F. é um método amplamente utilizado para análise eletromagnética de transformadores e apresenta boa acurácia de resultados, tendo sido por isso escolhido. Em relação aos AGs, alguns argumentos sustentam sua escolha para o processo de otimização: não precisam de boas estimativas de partida, pois podem ser corrigidas através do processo de evolução das soluções [5], e de acordo com MULLER [9], as soluções possíveis são checadas ao mesmo tempo, sendo assim recomendados para problemas com universo amplo de procura, evitando que se prenda a soluções de ótimo local. Além disso, não usam derivadas no algoritmo e, portanto, não são impactados por descontinuidade de funções [9].

O presente trabalho possui aspectos em comum e também discrepantes em relação aos ilustrados anteriormente. Assim como em [7], os métodos utilizados para a otimização e análise são os AGs e o M.E.F., respectivamente. Ao contrário de [7] e [8], o problema resolvido é multiobjetivo e sem restrições, apenas com condições de contorno. Em [6], o transformador utilizado também é a seco e o M.E.F. é aplicado para a análise, porém a otimização abordada é pelo método EPAS, ao invés de AGs. Todos os trabalhos citados minimizam custos e/ou perdas, assim como este trabalho. Em [5], o transformador utilizado é a óleo, mas, assim como este trabalho, utiliza como um dos operadores de seleção dos AGs o torneio. Em [3] e em [4], assim como no presente trabalho, são propostos métodos para encontrar impedâncias de um modelo sugerido para o equipamento. Entretanto, as análises deles abrangem uma ampla faixa de frequências, da baixa à alta, enquanto este trabalho aborda o cálculo de impedâncias através de ensaios executados na frequência fundamental.

O principal ponto de destaque deste trabalho frente aos demais apresentados é o viés prático e comercial na relação vendedor-comprador. Com a redução das perdas, a parte contratada ganha um ponto de convencimento para a venda e a parte contratante passa a ter acesso a um produto mais eficiente. Entretanto, com um possível aumento do custo

inicial, a análise de *payback* passa a ter fundamental importância no processo de venda, pois é através dela que o cliente passa a ter a real noção se vale a pena investir em um ativo ou não.

1.4.OBJETIVOS

Este trabalho possui quatro objetivos:

- 1º. Simular um projeto base de um transformador de distribuição trifásico a seco, tomando como referência dados mecânicos, elétricos e magnéticos obtidos através de catálogos;
- 2º. Propor um novo projeto, considerando a otimização de perdas;
- 3º. Implementar o novo projeto;
- 4º. Realizar uma análise econômica de retorno de investimento.

1.5. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Existem alguns pontos limitantes na proposição do estudo. Não se possui todos os dados construtivos, elétricos e magnéticos, devido ao sigilo de informações de fabricação. Então, foram utilizadas no projeto base referências aproximadas disponíveis publicamente em catálogo. Além disso, foram utilizados aspectos de um produto desenvolvido para atender ao mercado europeu, mas que está sendo adaptado para ser analisado sob a ótica do mercado e da norma brasileiros.

Há ainda dados necessários para as simulações, aos quais não se tiveram acesso, como quantidade de espiras utilizadas nos enrolamentos, por exemplo. Nesse caso, as informações foram estimadas.

Somente a parte ativa do equipamento, formada pelo núcleo e pelas bobinas, foi considerada no modelo. Terminais, buchas, barramentos, estruturas mecânicas de suporte e sustentação foram negligenciados. Isto se deve ao fato desses acessórios possuírem custo irrisório frente à parte ativa e exercerem pouca ou nenhuma influência nas perdas.

Dentro da parte ativa, para a simplificação das simulações, as camadas isolantes presentes entre as chapas do núcleo e contidas também nos enrolamentos não foram consideradas. A tecnologia construtiva empregada de folhas de alumínio nas bobinas do lado BT e fitas de alumínio no lado AT são de domínio do fabricante e fazem parte do *know-how* de engenharia que lhe pertence e também não foram consideradas. Assim, foram modeladas bobinas constituídas totalmente de alumínio, sem camadas isolantes. Considerar essas características tornaria a modelagem mais complexa e menos precisa, por não se ter os dados exatos de construção.

Por fim, os resultados dos ensaios foram extraídos do modelo 2D, que representa um corte do modelo 3D. Por isso, despreza as diferentes camadas do núcleo e aproxima a seção reta por um quadrado, com comprimentos das pernas iguais às suas profundidades, e também não considera o efeito circular das bobinas. O modelo 3D não foi utilizado para a obtenção dos resultados, pois demanda um esforço computacional muito elevado, acarretando em longos períodos de simulação, somado ao risco de avaria do *hardware* utilizado.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1, é realizada a introdução, com uma breve apresentação sobre o tema, além de evidenciar a motivação, os objetivos e as limitações do trabalho.

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre transformadores, com ênfase em aspectos de projeto. São mostradas características gerais, incluindo conceitos e equacionamentos do modelo elétrico e matemático, chegando ao circuito equivalente. Em sequência, são abordadas aplicações e composições construtivas, seguidas por perspectivas sobre perdas, rendimento e regulação de tensão, até chegar aos ensaios necessários para a determinação dos parâmetros do circuito.

O capítulo 3 mostra o estudo de caso. Primeiramente, um projeto base é implementado e analisado através do *software* de M.E.F., tomando como referência dados de catálogo de um fabricante. São obtidas as perdas, o rendimento, a regulação de tensão e o circuito equivalente do modelo.

No capítulo 4, propõe-se uma otimização dessas perdas utilizando AGs e alterando o material utilizado nas bobinas. Então, implementa-se o novo projeto com os dados obtidos no processo anterior, obtendo as novas perdas, o novo rendimento, a nova regulação de tensão e o novo circuito equivalente do modelo. Em sequência, é apresentada uma comparação entre projetos, analisando os principais índices de desempenho. Finalmente, é realizada uma análise de *payback* do investimento da nova solução em comparação com a primeira e é proporcionada uma visão geral sobre os critérios adotados, referentes a cada uma das etapas desenvolvidas anteriormente.

Por fim, o capítulo 5 mostra as principais conclusões do trabalho e indicações sobre possíveis seguimentos de pesquisa que possam dar origem a outros trabalhos e agregar valor ao equipamento.

Como apêndice, são abordados os métodos utilizados nesse trabalho: o M.E.F. e os AGs. Para o primeiro, é dado foco ao Método de Galerkin, com aplicação voltada ao Eletromagnetismo bidimensional. Para o segundo, são analisados os principais elementos formadores desses algoritmos, como a seleção, o cruzamento e a mutação. Também se dá destaque a critérios de parametrização do processo.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS DE PROJETOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA A SECO

Neste capítulo, são apresentados o modelo de circuito equivalente, esquemas de conexões, composições construtivas, perdas aplicáveis, regulação de tensão e a obtenção dos parâmetros do modelo através dos ensaios em vazio e de curto-circuito.

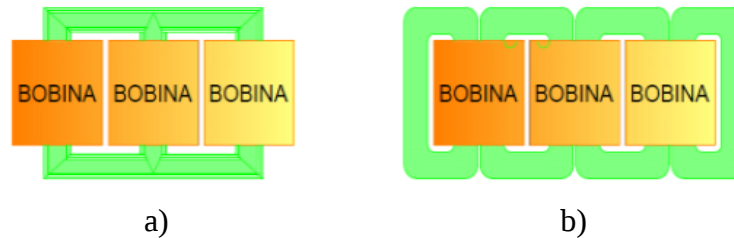
2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS

O transformador é um equipamento composto por enrolamentos agrupados através de um núcleo, por onde circula um fluxo magnético comum [11]. No caso dos transformadores trifásicos, que são os abordados nesse trabalho, são 3 enrolamentos primários e 3 enrolamentos secundários. Os enrolamentos primários são excitados por uma fonte de tensão trifásica alternada, e produzem fluxo magnético, a ser enlaçado juntamente com os enrolamentos secundários, induzindo neles uma tensão alternada trifásica, proporcional à relação entre o número de espiras de ambos os enrolamentos e às amplitudes das tensões aplicadas nos primários.

Os transformadores trifásicos podem ser compostos por um banco de 3 transformadores monofásicos ou por núcleo único trifásico. De acordo com FITZGERALD *et al.* [11], a primeira configuração apresenta maior flexibilidade de manutenção, pois é possível substituir os transformadores de cada fase. Já a segunda configuração é mais compacta e mais barata, pois apresenta uma quantidade menor de material ferromagnético.

Além disso, conforme explica AGUIAR [12], existem 2 tipos construtivos de núcleo: o envolvido, onde os 3 enrolamentos AT e os 3 enrolamentos BT de cada fase estão separados em dois segmentos, dispostos por meio de bobinas concêntricas, que envolvem as pernas do núcleo magnético, e o envolvente, onde as bobinas estão circundadas pela estrutura do núcleo, estando localizadas em seu interior. Essa configuração pode utilizar também bobinas AT e BT concêntricas ou utilizar diversas bobinas empilhadas,

alternando enrolamentos AT e BT em camadas, separadas por barreiras isolantes e de resfriamento, em um arranjo denominado de panqueca. As Figuras 1a e 1b mostram cada uma dessas disposições.



Figuras 1: a - Núcleo envolvido; b - Núcleo envolvente [13].

Grande parte do fluxo produzido é totalmente enlaçado pelas bobinas e fica localizado no interior do núcleo, que é constituído de material de elevada permeabilidade magnética. Este é chamado de fluxo mútuo ou concatenado. Cada enrolamento também gera um fluxo disperso, que enlaça a si próprio e não enlaça os demais enrolamentos. Esse fluxo, porém, representa uma fração muito baixa do fluxo total. A Figura 2 mostra a representação deles.

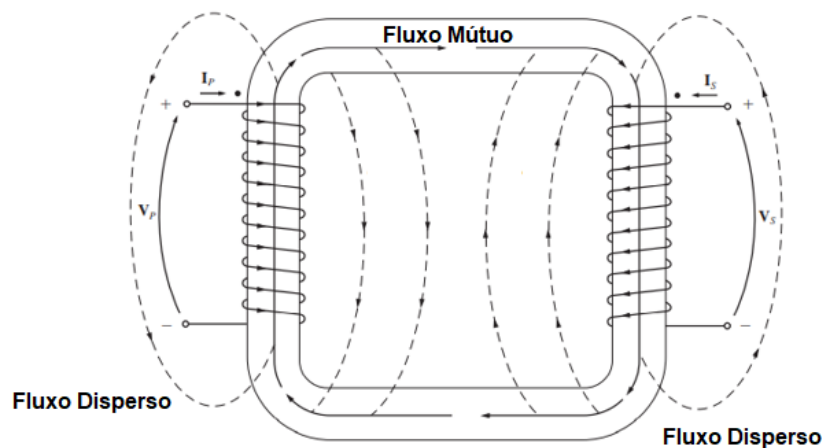


Figura 2 - Fluxos dispersos e mútuo em uma das fases de um transformador [14]. Adaptado pelo autor.

Nos primários, uma tensão induzida é gerada pelo fluxo disperso, somando-se à produzida pelo fluxo mútuo. O fluxo disperso e a tensão induzida por ele variam de forma linear com as correntes I_1 . Assim, esse fluxo pode ser representado pelas indutâncias de dispersão dos primários L_1 , onde suas reatâncias X_1 são dadas por:

$$X_1 = 2\pi f L_1 \quad (1)$$

As resistências R_1 dos primários provocarão uma queda de tensão nesses enrolamentos. Conforme afirmam FITZGERALD *et al.* [11], as tensões aplicadas V_1 nos terminais dos primários são compostas pela soma das quedas de tensão nas resistências e nas reatâncias de dispersão com as FEMs - Forças Eletromotrizes induzidas nos primários E_1 , devido ao fluxo mútuo resultante. Este fluxo que concatena os enrolamentos primários e secundários é gerado pela combinação de suas FMMs - Forças Magnetomotrizes.

As correntes dos primários geram as FMMs para produzir o fluxo mútuo resultante e compensar o efeito das FMMs dos secundários, que tendem a desmagnetizar o núcleo. Quando há carga conectada aos secundários, as correntes primárias são responsáveis por magnetizar o núcleo e por fornecer corrente à carga nos secundários. Assim, elas podem ser decompostas nas correntes de excitação I_0 e nas correntes de carga I'_2 , que são as componentes de corrente dos primários que contrabalançam as FMMs das correntes de secundários I_2 . I'_2 é numericamente diferente de I_2 .

FITZGERALD *et al.* [11] afirmam que a corrente de excitação fornece a FMM que se precisa para gerar fluxo no núcleo, que estará atrelado à energia de um campo magnético. Parte dessa energia é dissipada em forma de calor e a outra parte é associada à potência reativa armazenada nesse campo, que é trocada de forma cíclica com a fonte de excitação. Essa corrente é dividida na componente de magnetização I_μ , que está atrasada em 90° em relação à E_1 , e na componente de perdas no núcleo I_{Fe} , em fase com E_1 . A corrente de magnetização não possui formato de senoide, devido às harmônicas de ordem elevada. Já a corrente de perdas no núcleo é não-linear, devido à histerese [14].

Assim, forma-se um ramo em derivação, com a resistência de perdas no núcleo R_{Fe} em paralelo com a reatância de magnetização X_μ , dada por:

$$X_\mu = 2\pi f L_\mu \quad (2)$$

em que L_μ é a indutância de magnetização. A combinação da resistência com a reatância forma a impedância de magnetização Z_0 .

O fluxo mútuo induz as FEMs E_2 nos secundários e, como concatena tanto os enrolamentos primários como os secundários, é possível estabelecer relações entre as FEMs e os números de espiras entre os primários e secundários. Nos transformadores trifásicos, essas relações dependem dos tipos de conexões estabelecidas nesses enrolamentos, conforme é abordado mais à frente.

Como no caso dos primários, as FEMs E_2 nos secundários não são iguais às tensões V_2 nos terminais, devido às quedas de tensão nas resistências R_2 e também nas reatâncias de dispersão X_2 dos enrolamentos, como mostra a Figura 3. Esses parâmetros e grandezas, quando referidos ao primário, são representados por R'_2 , X'_2 e por V'_2 (que são numericamente diferentes de R_2 , X_2 e V_2), como mostra a Figura 4, que elimina a representação do transformador ideal.

Segundo STEVENSON JR. [15], a RT - Relação de Transformação de um transformador trifásico é dada entre a tensão de linha do primário e a tensão de linha do secundário, ou, alternativamente, entre as correntes de linha do secundário e do primário.

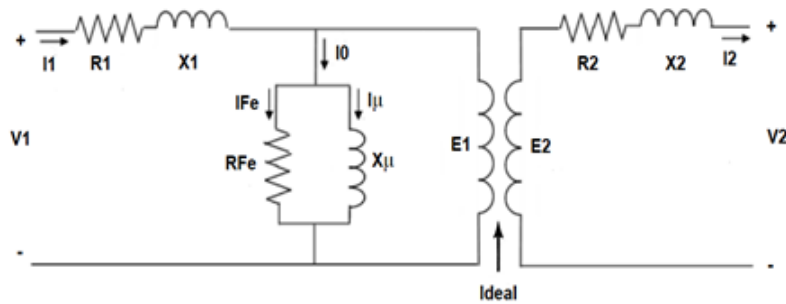


Figura 3 - Modelo do circuito equivalente de uma das fases, com representação do transformador ideal [16]. Adaptado pelo autor.

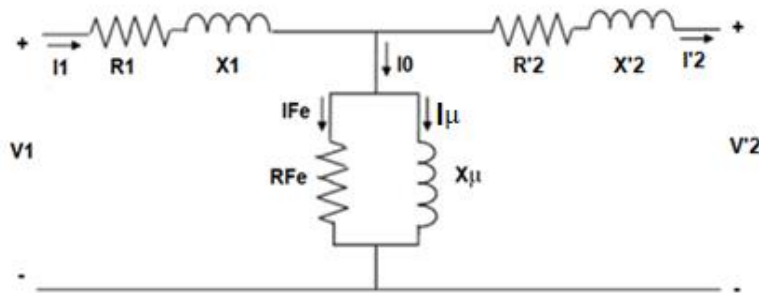


Figura 4 - Modelo do circuito equivalente de uma das fases de um transformador trifásico refletido ao primário [16]. Adaptado pelo autor.

Para efeitos práticos, as tensões de placa de um transformador de potência tomam como base a relação de espiras e, em condição de carga, as baixas quedas de tensão devido às impedâncias longitudinais são negligenciadas [11]. Assim, dado que a relação entre espiras ‘a’ é expressa pelo quociente entre as tensões de fase V_{F1} do primário e as tensões de fase do secundário V_{F2} , ou alternativamente, entre as correntes de fase I_{F2} do secundário e as correntes de fase I_{F1} do primário, tem-se:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_{F1}}{E_{F2}} \cong \frac{V_{F1}}{V_{F2}} \cong \frac{I_{F2}}{I_{F1}} \quad (3)$$

em que N_1 é o número de espiras do primário e N_2 é o número de espiras do secundário.

Sabe-se também que, em circuitos equilibrados conectados em estrela (Y), têm-se as seguintes relações:

$$V_F = \frac{V}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$I_F = I \quad (5)$$

em que V e I são tensão e corrente de linha, respectivamente, e V_F e I_F são tensão e corrente de fase, respectivamente.

Já para os circuitos equilibrados conectados em delta (Δ), têm-se as seguintes relações:

$$V_F = V \quad (6)$$

$$I_F = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

As combinações possíveis de conexões são: Δ - Δ , Y-Y, Δ -Y e Y- Δ .

Para a conexão Δ - Δ , tem-se:

$$RT = \frac{V_{F1}}{V_{F2}} = \frac{\sqrt{3}I_{F2}}{\sqrt{3}I_{F1}} = a \quad (8)$$

Esse tipo de configuração pode atuar em delta aberto, onde uma das fases fica desconectada devido a uma eventual manutenção, por exemplo. Nesse cenário, 58% da capacidade original do transformador seria mantida [11]. Não há deslocamento angular entre as tensões do primário e do secundário. A Figura 5 mostra esse tipo de conexão.

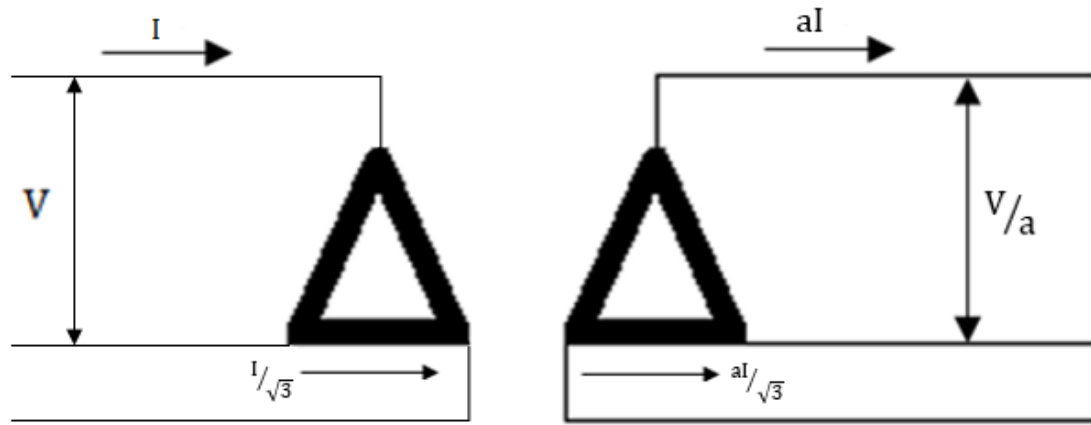


Figura 5 - Conexão Δ-Δ.

Para a conexão Y-Y, tem-se:

$$RT = \frac{\sqrt{3}V_{F1}}{\sqrt{3}V_{F2}} = \frac{I_{F2}}{I_{F1}} = a \quad (9)$$

As tensões impostas a cada fase estão defasadas de 120° no tempo. As componentes de terceira harmônica estarão em fase, uma vez que existem 3 ciclos de terceira harmônica para 1 ciclo de frequência fundamental.

De acordo com CHAPMAN [14], essas componentes sempre estão presentes e são causadas pelo fato dos efeitos no núcleo serem não-lineares, sendo somadas entre si. A tensão de terceira harmônica, inclusive, poderá ser superior até mesmo à própria tensão de frequência fundamental. Essa questão pode ser resolvida aterrando solidamente os neutros dos transformadores. Assim, as componentes de terceira harmônica circulam através da corrente que flui para o neutro, ao invés de se somarem e produzirem tensões

elevadas nos enrolamentos. Não há deslocamento angular entre as tensões do primário e do secundário. A Figura 6 mostra esse tipo de conexão.

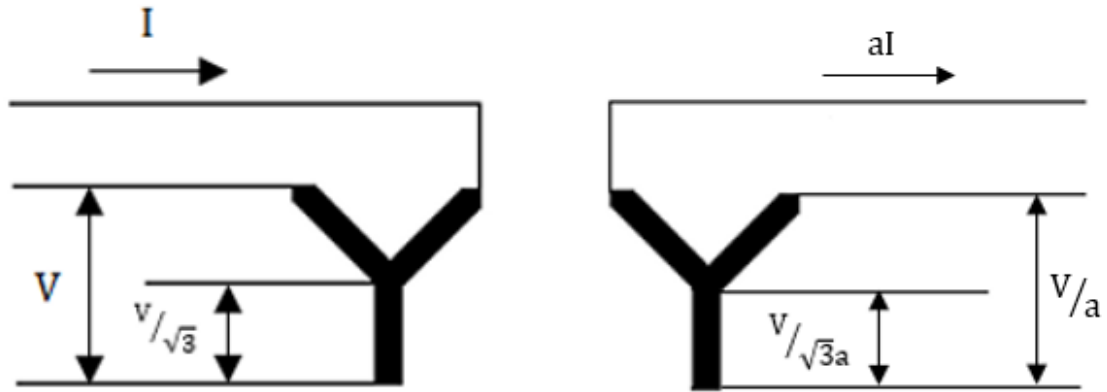


Figura 6 - Conexão Y-Y.

Para a conexão Δ -Y, tem-se:

$$RT = \frac{V_{F1}}{\sqrt{3}V_{F2}} = \frac{I_{F2}}{\sqrt{3}I_{F1}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

Nessa ligação, a tensão secundária possui uma defasagem múltiplo de 30° , podendo estar adiantada ou atrasada em relação à tensão primária do transformador, a depender do esquema de conexão dos enrolamentos, como será visto mais adiante.

Essa configuração não sofre com os efeitos das componentes de terceira harmônica, pois eles são eliminados pela corrente que circula no lado conectado em Δ . A Figura 7 mostra esse tipo de conexão.

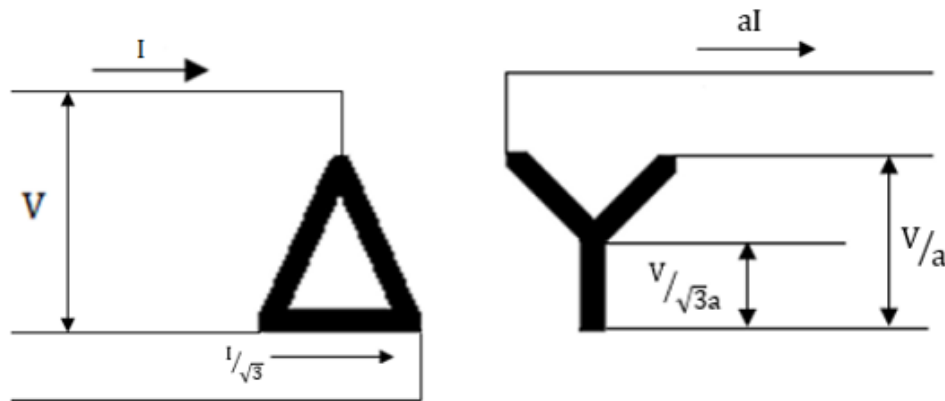


Figura 7 - Conexão Δ -Y.

Para a conexão Y-Δ, tem-se:

$$RT = \frac{\sqrt{3}V_{F1}}{V_{F2}} = \frac{\sqrt{3}I_{F2}}{I_{F1}} = a\sqrt{3} \quad (11)$$

Nessa ligação, a tensão secundária também é possui uma defasagem múltiplo de 30°, podendo estar adiantada ou atrasada em relação à tensão primária do transformador. Os efeitos minimizados das componentes de terceira harmônica também são válidos para essa configuração. A Figura 8 mostra esse tipo de conexão.

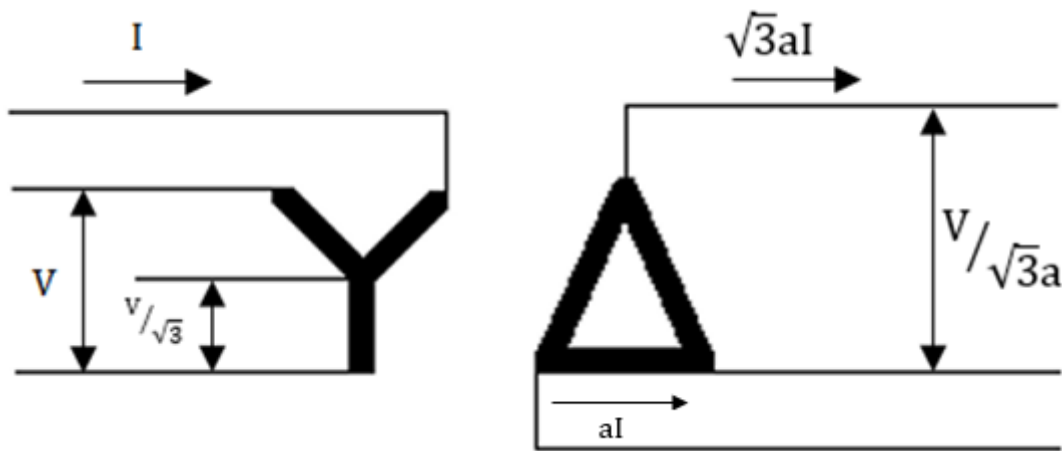


Figura 8 - Conexão Y-Δ.

Ainda é possível estabelecer diferentes grupos de ligação. Como visto, as configurações Δ-Y e Y-Δ apresentam uma defasagem de 30° entre as tensões do primário e do secundário, estando atreladas a múltiplos inteiros, de acordo com as polaridades (sentido da FEM induzida) de cada enrolamento. A diferença angular é medida do enrolamento de baixa tensão para o de alta tensão no sentido anti-horário.

Conhecer o grupo de ligação do transformador é importante para a conexão de transformadores em paralelo. Nesse caso, eles devem ter o mesmo grupo de ligação, já que o defasamento entre eles deve ser nulo [17]. De acordo com GUEDES [18], a nomenclatura é atribuída da seguinte forma:

- A primeira letra (maiúscula) representa o enrolamento de tensão mais elevada, sendo utilizadas as letras D (delta) e Y (estrela);

- A segunda letra (minúscula) representa o enrolamento de tensão inferior, sendo utilizadas as letras d (delta) e y (estrela);
- A letra N (maiúscula) indica a acessibilidade do neutro no lado de alta tensão, e a letra n (minúscula), indica a acessibilidade do neutro no lado de baixa tensão;
- O número indica as horas do ponteiro de um relógio. Cada hora representa uma defasagem de 30° e os fasores se deslocam em sentido anti-horário.

A Figura 9 mostra o esquema de conexão e os fasores do grupo de ligação Dyn1, com as tensões BT atrasadas de 30° em relação às tensões AT. As tensões AT nas fases A, B e C são representadas por H1, H2 e H3, respectivamente, no desenho abaixo. Já as tensões BT nas fases A, B e C são representadas por X1, X2 e X3, respectivamente.

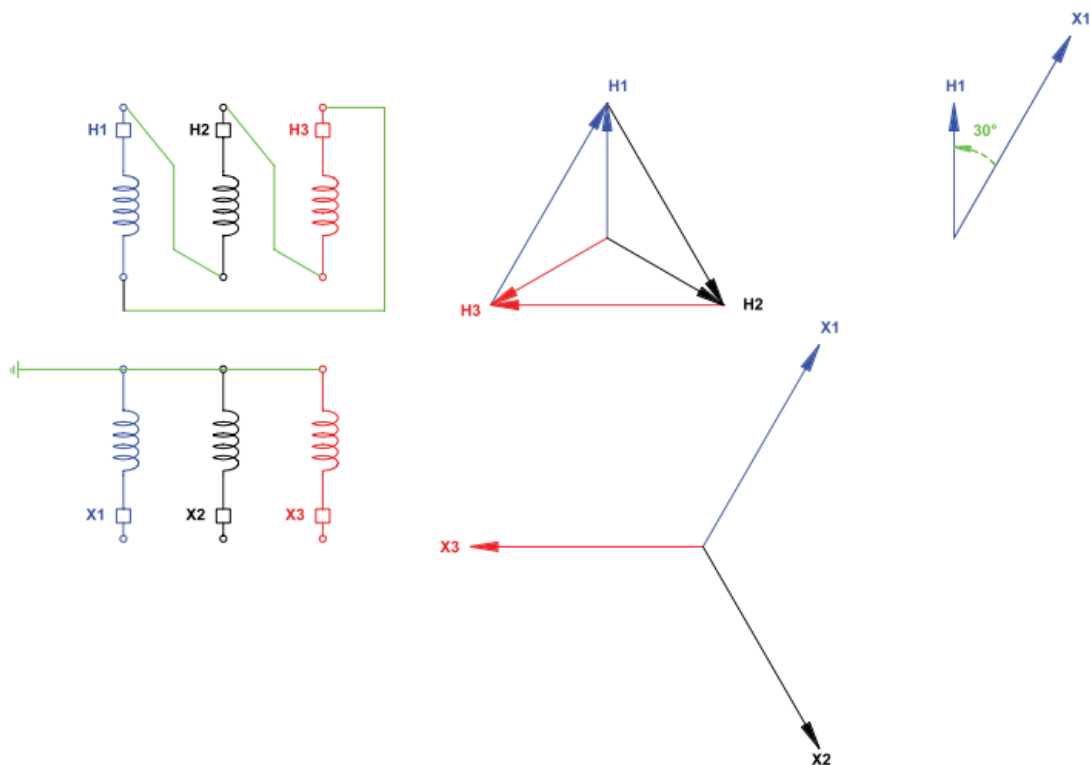


Figura 9 - Esquema de conexão e fasores do grupo de ligação Dyn1 [19].

2.2. APLICAÇÕES E COMPOSIÇÕES CONSTRUTIVAS DO PROJETO BASE

O transformador a seco utiliza o ar ambiente em sua refrigeração e é um dos principais equipamentos de um sistema de distribuição de energia em MT - Média Tensão e BT -

Baixa Tensão. Possuem vida útil superior a 20 anos e são ambientalmente amigáveis, uma vez que não utilizam fluidos do tipo óleo mineral, que acarretam em potencial impacto e em risco de emissão de gases tóxicos. Além disso, possuem baixo custo de manutenção, ocupam menos espaço e são mais leves, quando comparados a transformadores imersos em fluidos isolantes líquidos, são resistentes a chamas e possuem capacidade de autoextinção de fogo [20]. A Figura 10 mostra a visão geral de um equipamento deste tipo.

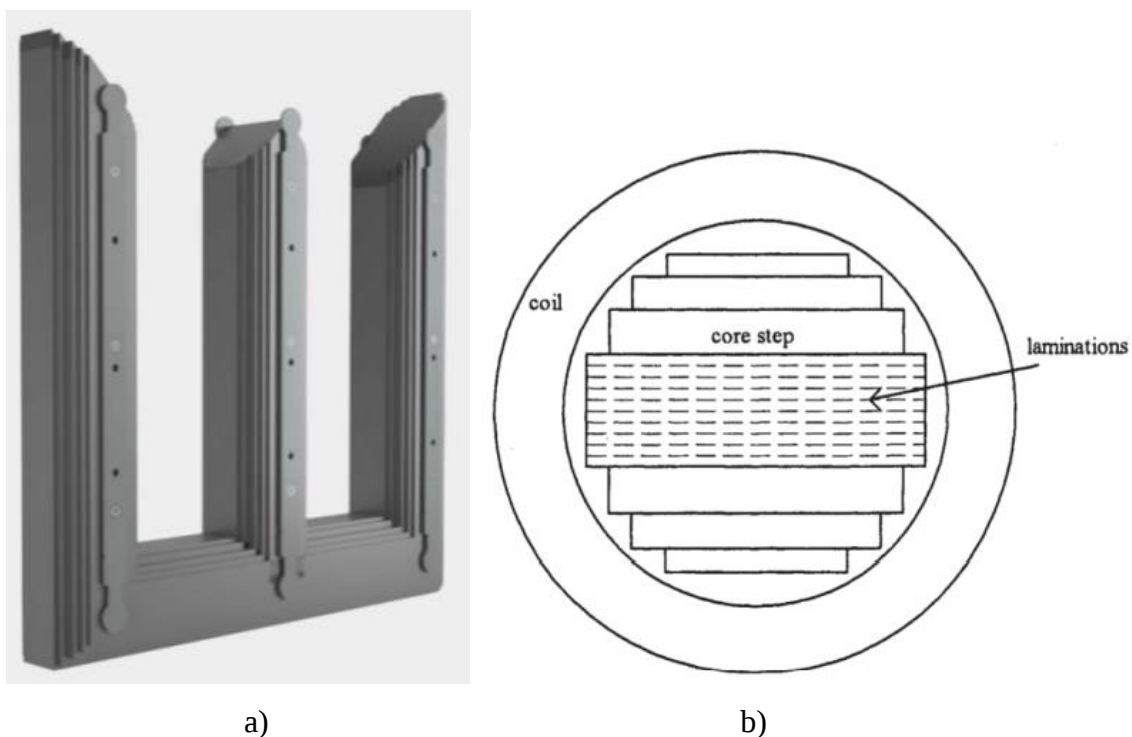
Esse conceito de confiabilidade e segurança permite que esse tipo de transformador seja colocado próximo a cargas, reduzindo os custos de instalação e operação. Dessa forma, são ideais para aplicações como prédios residenciais e comerciais, hospitais, *shopping centers*, indústrias e plataformas *offshore*. Da mesma forma, não é por acaso que, devido à sua superioridade técnica, sejam produzidos sob licença por fabricantes de transformadores de porte e renome em diversas partes do mundo.



Figura 10 - Transformador a seco [20].

O transformador a seco utilizado neste trabalho ainda é, particularmente, isento de descargas parciais até o dobro da tensão nominal, o que prolonga ainda mais a sua vida útil.

O núcleo é do tipo envolvido, constituído de chapas de Aço Silício de Grão Orientado a 45° empilhadas. Além disso, de acordo com VECCHIO *et al.* [21], possuem um revestimento isolante para evitar que grandes caminhos de correntes parasitas se desenvolvam, o que levaria a altas perdas. Devido a essas camadas isolantes entre as lâminas, a razão entre a área da seção transversal magnética efetiva e a área da seção transversal física do núcleo do transformador, denominada de fator de empilhamento, é diferente de 1, sendo, nesse projeto, igual a 0,965. As Figuras 11a e 11b mostram a divisão em camadas e a laminação do núcleo em vistas frontal e superior através de corte de seção reta, respectivamente.



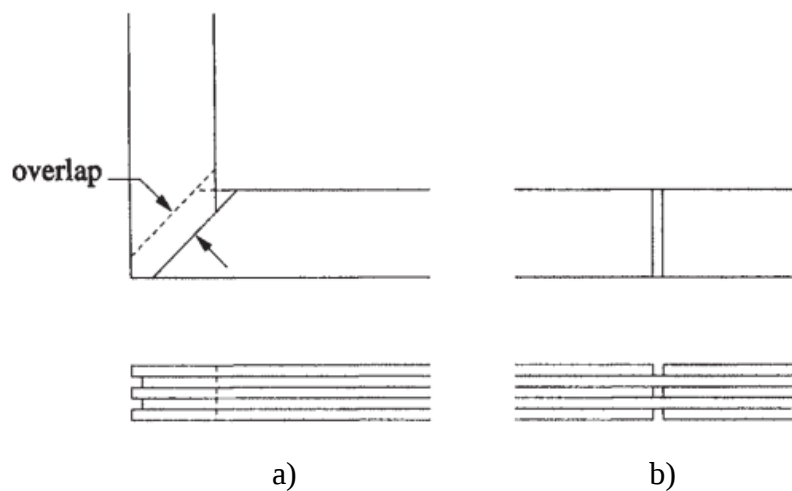
Figuras 11: a - Vista frontal do núcleo ferromagnético laminado [22]; b - Vista superior através de corte de seção reta [23].

O espaço entre o núcleo e a bobina mais interna é necessário para fornecer folga de isolamento para a diferença de tensão entre o enrolamento e o núcleo que está no potencial de terra [21].

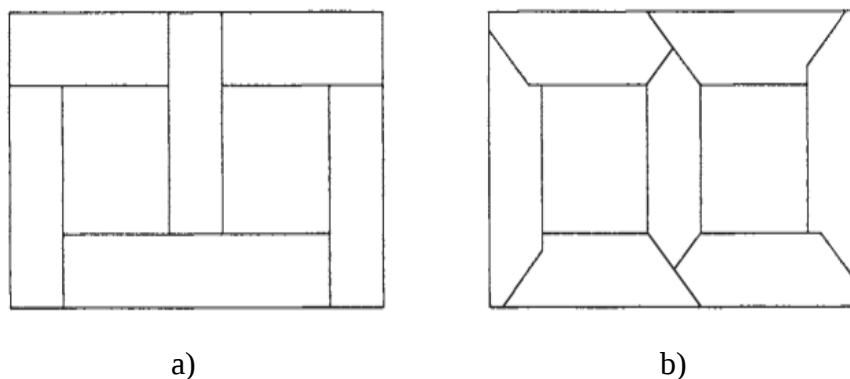
A parte vertical do núcleo e que é envolta por enrolamentos é chamada de perna. Já a parte horizontal é chamada de *yoke*. Geralmente, pernas e *yokes* possuem a mesma área transversal. De acordo com KULKARNI e KHAPARDE [23], ao construir um núcleo, as

lâminas são colocadas de tal forma que os *gaps* entre elas localizados nas junções das pernas com os *yokes* são sobrepostos pelas laminações da camada seguinte. O objetivo é eliminar lacunas contínuas nas juntas quando essas laminações são empilhadas, como mostra as Figuras 12a e 12b. A distância de sobreposição é mantida em torno de 15 a 20 mm.

Existem dois tipos de junções possíveis: as juntas não-mitradas e as mitradas, como mostram as Figuras 13a e 13b. As juntas não-mitradas são aquelas que possuem ângulo de sobreposição de 90° . Possuem fabricação simplificada, mas, como o fluxo na região da junção não está alinhado com orientação do grão, que é de 45° para esse projeto, a perda nessas regiões por dispersão é maior. No caso das juntas mitradas, o ângulo de sobreposição mais comum é de 45° . Assim, o fluxo cruza a perna para o *yoke* alinhado com a orientação do grão, minimizando as perdas por dispersão nessas regiões [23].



Figuras 12: a - Sobreposição no canto; b - Sobreposição na reta [21].



Figuras 13: a - Juntas não-mitradas; b - Juntas mitradas [21].

Os enrolamentos de baixa tensão do projeto referência analisado são feitos de chapas (folhas) de alumínio, com espiras coladas entre si e isolamento em filme pré-impregnado com resina, sendo resistente a esforço de curto-circuito. Já os enrolamentos de alta tensão são constituídos de fitas de alumínio, compostos de várias bobinas parciais conectadas em série e são encapsulados a vácuo com resina epóxi [20]. A Figura 14 mostra o corte das bobinas de alta e baixa tensão em detalhe.

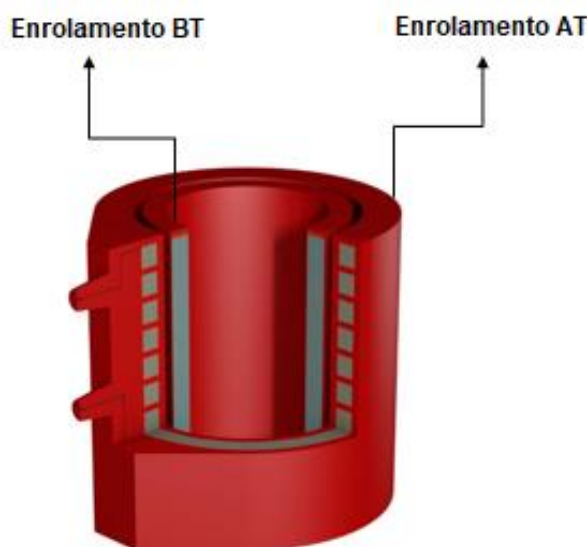


Figura 14 - Bobinas de alta e baixa tensão [10]. Adaptado pelo autor.

De acordo com KULKARNI e KHAPARDE [23], os enrolamentos são as principais fontes de aumentos de temperatura em um transformador, devido a perdas por Efeito Joule. O calor gerado por elas deve ser dissipado sem permitir que esses enrolamentos atinjam uma temperatura que causará a deterioração do isolamento. Assim, faz-se necessário o dimensionamento de um sistema de controle de temperatura e refrigeração do equipamento.

A temperatura desses dispositivos é monitorada nos enrolamentos de BT, pois estes possuem as maiores correntes, através de termistores PTC - *Positive Temperature Coefficient* ou de sensores PT 100. Geralmente são usados dois sistemas de sensores, sendo um para prover sinal de alarme e outro para *trip* do transformador, caso a temperatura de operação limite tenha sido atingida. Os sinais dos sensores são enviados a um relé de proteção microprocessado, que emitirá o sinal de alarme ou comandará a abertura do disjuntor, como mostra a Figura 15.



Figura 15 - Sistema de monitoramento de temperatura [10].

O transformador também pode apresentar como item adicional um sistema de ventilação forçada, composto por ventiladores radiais. Eles são instalados na parte inferior e apresentam canais e aletas que direcionam o fluxo de ar para que circule entre as bobinas, que são as partes mais aquecidas pelo Efeito Joule, como mostra a Figura 16. Além disso, são acionados automaticamente através dos sensores de temperatura instalados nos enrolamentos de BT em conexão com um controlador do ventilador. Isso ajuda a manter a reserva de potência para cobrir picos de carga por períodos mais longos, uma vez que a potência do transformador pode ser elevada em até 30% a mais da potência em regime permanente.

O IP – Índice de Proteção do transformador também é importante na definição do projeto, pois determina o grau de proteção do equipamento contra exposição às partículas sólidas e à água, além de indicar o nível de proteção de pessoas contra o acesso às partes perigosas do dispositivo. O IP varia de acordo com a aplicação e a necessidade de cada cliente. A disposição do código e suas classificações podem ser observadas na Tabela 1 [25].

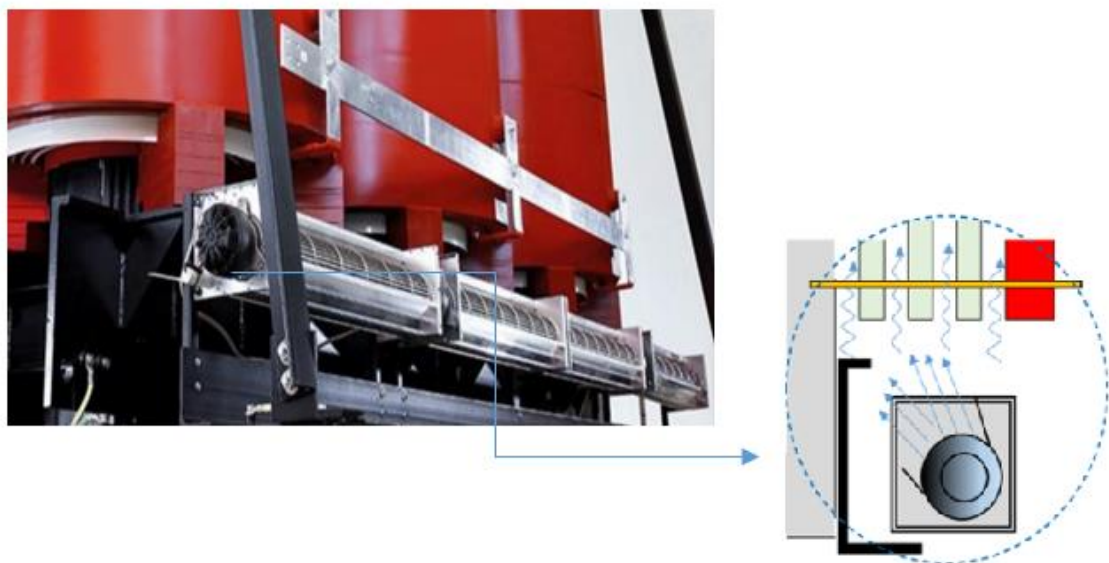


Figura 16 - Sistema de ventilação forçada – Adaptado pelo autor [10-24].

Tabela 1 - Elementos do código IP e seus significados [25].

Elemento	Numeral ou letras	Significado para proteção do equipamento	Significado para proteção de pessoas
Primeiro numeral característico	-	Contra o ingresso de objetos sólidos estranhos	Contra o acesso às partes perigosas com:
	0	não protegido	não protegido
	1	≥ 50 mm de diâmetro	dorso da mão
	2	$\geq 12,5$ mm de diâmetro	dedo
	3	$\geq 2,5$ mm de diâmetro	ferramenta
	4	≥ 1 mm de diâmetro	fio
	5	protegido contra poeira	fio
	6	totalmente protegido contra poeira	fio
Segundo numeral característico	-	Contra o ingresso de água com efeitos prejudiciais	-
	0	não protegido	
	1	gotejamento vertical	
	2	gotejamento com inclinação 15°	
	3	aspersão	
	4	projeções d'água	
	5	jatos d'água	
	6	jatos potentes	
	7	imersão temporária	
	8	imersão contínua	
	9	jatos d'água com alta pressão e temperatura	
Letra adicional (opcional)	-	-	Contra o acesso às partes perigosas com:
	A		dorso da mão
	B		dedo
	C		ferramenta
	D		fio
Letra suplementar (opcional)	-	Informação suplementar específica para:	-
	H	Equipamentos de alta-tensão	
	M	Em movimento durante o ensaio com água	
	S	Em repouso durante o ensaio com água	
	W	Condições climáticas	

Por fim, os transformadores são projetados para alimentarem cargas, não só com potência e tensão determinadas, mas também com natureza bem definida. Por isso, faz-se necessário o correto dimensionamento do fator K do equipamento para cada aplicação. Ele é um índice internacional que visa mostrar o quão o equipamento é resistente a conteúdos harmônicos em sua corrente de carga, mantendo sua operação dentro de seus limites de temperatura, a fim de garantir seu rendimento e segurança [26].

Essas distorções harmônicas geradas pelas cargas não-lineares provocam aquecimento nos enrolamentos do transformador, minando a vida útil de suas isolações a longo prazo. O K significa que o dispositivo suporta perdas adicionais devido a uma carga harmônica de K vezes as perdas calculadas na frequência fundamental, sem apresentar superaquecimento. Ou seja, o fator K igual a 1 é adequado para alimentar cargas lineares, sem conteúdos harmônicos, como lâmpadas incandescentes e aquecedores, por exemplo. Já para cargas não-lineares, com elevado conteúdo harmônico, como ar condicionados, computadores, inversores de frequência e lâmpadas de LED - *Light-Emitting Diode*, é recomendado que se empregue um fator K mais elevado. Ele pode apresentar valores típicos para alimentação de cargas não-lineares de 4, 20, 30 e 40 e deve ser projetado levando em conta o tamanho da influência das harmônicas nas perdas totais do equipamento. Para o projeto de referência desse trabalho, é considerado o fator K igual a 1.

2.3. PERDAS, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO

O modelo de um transformador ideal indica que a potência de entrada é igual à potência de saída. Entretanto, o modelo real apresenta perdas, que basicamente se dividem em duas categorias: em vazio e sob carga. As primeiras são associadas com a energização do transformador e o fluxo de condução através do núcleo. Já as segundas são as resistivas nos enrolamentos e condutores causadas pela circulação de corrente principal.

As perdas em vazio, ou perdas no núcleo, são causadas pela histerese do material ferromagnético e pelas correntes parasitas circulantes por ele.

O fluxo no núcleo depende da intensidade da corrente alternada aplicada nele e do histórico anterior de fluxo estabelecido através dele (chamado de magnetismo residual, mostrado através de B_R nos pontos c e f da Figura 17). Considerando um primeiro momento de aumento da corrente no tempo, o fluxo realiza um determinado caminho de crescimento, ao passo que, quando há um decréscimo dessa corrente, o fluxo se reduz, performando um caminho diferente do anterior. Quando torna novamente a crescer, segue um caminho diferente dos dois anteriores. Esse histórico e os caminhos distintos de fluxo constituem a histerese [14]. A Figura 17 mostra esses caminhos, através de um exemplo de laço de histerese.

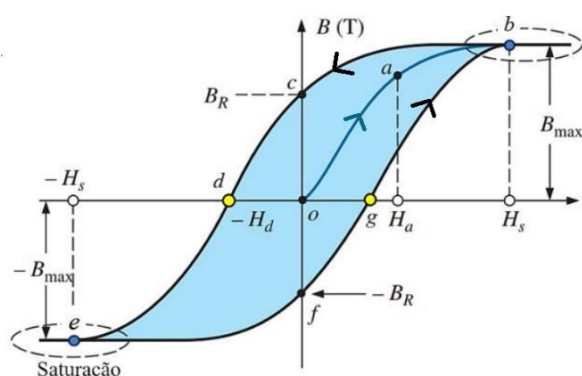


Figura 17 - Laço de histerese [27].

De acordo com CHAPMAN [14], os domínios magnéticos do material que constitui o núcleo, que inicialmente ficavam orientados de forma aleatória, passam a ficar alinhados pouco a pouco com o sentido do campo magnético externo, assim que aplicado. No momento que todos os domínios estiverem dispostos no mesmo sentido, qualquer aumento na FMM não será capaz de gerar um incremento no fluxo, provocando a saturação, representada pelos pontos de interseção de $B_{\max}$ com H_s (b) e de $-B_{\max}$ com $-H_s$ (e) das curvas que compõem o laço de histerese, como mostra a Figura 17. Quando esse campo magnético externo é retirado, os domínios não tornam a ficar aleatoriamente orientados em sua totalidade, ou seja, alguns ficarão alinhados com o antigo campo, até que uma fonte de energia externa seja aplicada para reorientá-los em outra direção. A perda por histerese é justamente a energia que se precisa para realizar esse realinhamento dos domínios a cada ciclo de corrente alternada aplicada ao núcleo. Quanto menor for a área do laço de histerese do material, menores serão as perdas. Por fim, a Figura 17 também mostra o ponto d, representado em H_d que se chama de força coercitiva. É a intensidade de campo que deve ser aplicada para desmagnetizar o material.

Já as correntes parasitas, também chamadas de Correntes de Foucault, podem ser explicadas pela Lei de Faraday. Uma tensão é induzida no núcleo, através de um fluxo variante no tempo. Com isso, correntes também passam a circular nas superfícies das lâminas condutoras, formando caminhos circulares (vórtices), no sentido de se oporem às mudanças de densidade de fluxo do material, como mostra a Figura 18. Como esse material também apresenta uma resistência a ele atrelada, haverá dissipação de energia, que é convertida em calor [14].

Conforme BELKASIM [28], as perdas por correntes parasitas são divididas entre clássicas, por Efeito Joule, e por excesso (ou anômalas), devido ao movimento das paredes dos domínios magnéticos e interações dessas paredes com a rede cristalina. Essas perdas não clássicas dependem dos tamanhos dos domínios no estado de zero magnetização. Quanto maior forem eles, maiores serão as velocidades das paredes dos domínios, e com isso, maior será a perda.

As perdas no núcleo por unidade de massa podem ser representadas através da Equação de Bertotti, que é uma relação empírica, representada pela soma das perdas por histerese e Correntes de Foucault (clássicas e por excesso), como mostra a equação abaixo [29]:

$$P_{\text{núcleo}} = K_h B_{\text{max}}^\beta f^\alpha + K_c (B_{\text{max}} f)^2 + K_e (B_{\text{max}} f)^{1,5} \quad (12)$$

onde:

K_h – Coeficiente de histerese;

K_c – Coeficiente de correntes parasitas clássicas;

K_e - Coeficiente de correntes parasitas por excesso (anômalas);

B_{max} – Máxima amplitude da densidade de fluxo;

f – Frequência de operação;

α e β – Parâmetros que dependem do material utilizado.

Sendo o fluxo oriundo de uma excitação CA – Corrente Alternada senoidal/ cossenoidal dado por [11]:

$$\varphi(t) = \phi_{\text{max}} \cos \omega t = AB_{\text{max}} \cos \omega t \quad (13)$$

onde:

$\phi_{\max}$ – Amplitude máxima do fluxo no núcleo em Weber;

A – Área da seção reta do núcleo em m²;

ω – Frequência angular em rad/s.

Aplicando a Lei de Faraday, tem-se que a tensão induzida será:

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} = N\omega\phi_{\max} \sin \omega t = E_{\max} \sin \omega t \quad (14)$$

onde:

$$E_{\max} = 2\pi f N A B_{\max} \quad (15)$$

Sendo a relação entre valor máximo e valor eficaz de uma função senoidal dada por:

$$E_{\text{eficaz}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Então, tem-se:

$$E_{\text{eficaz}} = \frac{2\pi f N A B_{\max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N A B_{\max} \quad (17)$$

Isolando $B_{\max}$, tem-se:

$$B_{\max} = \frac{E_{\text{eficaz}}}{\sqrt{2} \pi f N A} \cong \frac{E_{\text{eficaz}}}{4,44 f N A} \quad (18)$$

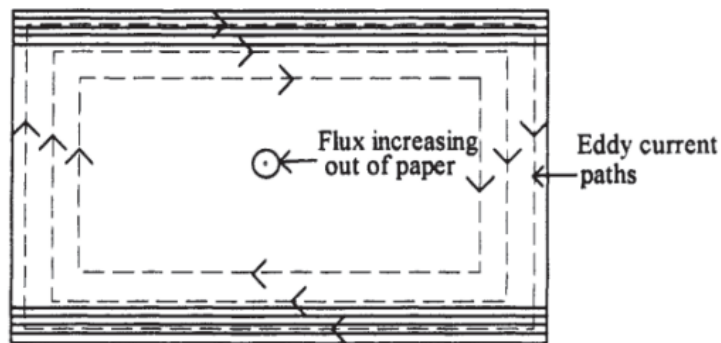


Figura 18 - Circulação de correntes parasitas nas superfícies das lâminas [23].

Dentre os principais artifícios para se reduzir as perdas no ferro, está a laminação do núcleo em chapas delgadas, dispostas paralelamente entre si, associada à utilização de uma resina isolante semelhante ao vidro. Com isso, o tamanho de um vórtice de corrente será reduzido, gerando uma menor tensão induzida, e assim, correntes parasitas e perdas menores. Essa redução é proporcional à espessura dessas lâminas, que quanto mais finas, melhores são para a aplicação [14]. VECCHIO *et al.* [21] afirmam que essas lâminas são feitas, em sua grande maioria, de Aço Silício, devido à sua alta resistividade e permeabilidade magnética para densidades de fluxo elevadas (entre 1,0 T e 1,5 T), e geralmente possuem uma espessura entre 0,23 e 0,46 mm. Esse material também possui um laço de histerese estreito, o que também contribui para redução desse tipo de perda.

O Aço Silício é dividido em duas categorias: de grão orientado e de grão não-orientado. A maioria dos fabricantes utiliza o primeiro tipo, que possui uma estrutura de átomos em forma de cubo. Cada um deles está posicionado em um vértice do cubo e também há um no centro. Sendo a aresta o eixo mais simples de ser magnetizado e a diagonal o mais complexo, durante o processo de fabricação, alinha-se a direção de laminação com as arestas da estrutura cristalina, facilitando a magnetização. Já o segundo tipo, por outro lado, possui orientação aleatória, dificultando o processo [11].

CHAPMAN [14] ressalta que outra alternativa seria a de aumentar a resistividade do material do núcleo, adicionando um maior percentual de Silício ao Aço. Com isso, para um determinado fluxo, as correntes e perdas seriam tão menores quanto maior fosse a resistência do núcleo.

Uma outra alternativa para se obter uma redução das perdas totais no núcleo é diminuir o volume de material empregado no seu projeto. A massa é obtida através da multiplicação entre a densidade do material que compõe o núcleo e o seu volume. Ou seja, quanto menor for o volume, menor será a massa e, por conseguinte, de acordo com a equação (12) expressa em W/lb, quanto menor for a massa, menores serão as perdas totais no ferro.

Já nos enrolamentos, as perdas ocorrem devido ao Efeito Joule, que libera calor à medida que a corrente circula por eles. Em transformadores trifásicos, elas são proporcionais à $3RI^2$, onde R é a resistência desses enrolamentos e I é a corrente [23]. Representam a maior parte das perdas do equipamento e podem ser minimizadas diminuindo o

comprimento dos condutores, aumentando a área da seção transversal deles, ou seja, colocando fios de bitola maior (mais grossos) e usando materiais de menor resistividade.

O rendimento é o nível de eficiência do transformador, ou seja, a relação entre a potência elétrica entregue no secundário $P_{saída}$ e a absorvida pelo primário $P_{entrada}$. Assim, tem-se que:

$$\eta\% = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100 \quad (19)$$

$P_{entrada}$ é dada pela soma da potência entregue na saída com as perdas no ferro e nos enrolamentos. Assim, a equação (19) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\eta\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + P_{núcleo} + P_{enrolamentos}} \times 100 \quad (20)$$

Transformadores são equipamentos que apresentam rendimento típico elevado, acima de 97%. A ABNT [30] classifica os transformadores a seco em níveis de rendimento, de acordo com as perdas em vazio e perdas totais, para cada classe de tensão e potência nominal. A Tabela 2 apresenta as classes de perdas para transformadores com tensão máxima de até 15 kV.

Tabela 2 - Classes de perdas para transformadores com tensão máxima de até 15 kV [30].

Potência Nominal	Níveis de eficiência									
	A		B		C		D		Corrente de excitação	Tensão de curto-circuito
	Perdas em W		Perdas em W		Perdas em W		Perdas em W			
kVA	Vazio	Total	Vazio	Total	Vazio	Total	Vazio	Total	%	%
45	240	1190	360	1310	360	1460	400	1500	3,7	4,5
75	320	1760	430	1870	430	2120	480	2170	3,5	4,5
112,5	360	2560	540	2740	540	3080	600	3150	3,3	5,0
150	470	3070	680	3270	680	3730	750	3800	3,0	5,0
225	675	3930	1000	4260	1040	4890	1150	5000	2,3	5,5
300	750	4600	1170	5000	1170	5670	1300	5800	2,0	5,5
500	1080	7000	1593	7800	1593	8820	1800	9000	1,8	5,5
750	1510	9600	2160	10260	2160	11760	2400	12000	1,7	6,0
1000	1860	11960	2600	12700	2600	14300	2900	14600	1,5	6,0
1250	2160	12950	3060	13860	3060	15660	3400	16000	1,5	6,0
1500	2640	14650	3600	15600	3600	17600	4000	18000	1,4	6,0
2000	3120	17850	4770	19600	4770	21970	5300	22500	1,4	6,5
2500	3720	20550	6030	22900	6030	25530	6700	26200	1,3	6,5
3000	4560	25430	6750	27600	6750	30750	7500	31500	1,2	6,5
4000	6910	30900	9450	33450	9450	36950	10500	38000	1,2	7,0

Como é possível observar, os transformadores da classe A são os mais eficientes e os da classe D são os menos.

Em um transformador, além do rendimento, é importante se analisar também a sua regulação de tensão. Ela representa a diferença de tensão na saída do transformador entre as condições em vazio e de plena carga em relação à condição de plena carga, como mostra a equação (21) [11]:

$$\text{Regulação de tensão (\%)} = \frac{V_{\text{vazio}} - V_{\text{plena carga}}}{V_{\text{plena carga}}} \times 100 \quad (21)$$

Um valor baixo implica que mudanças de patamares de carga não geram grandes impactos na tensão fornecida a ela.

2.4. ENSAIOS E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE

Os parâmetros transversais do transformador são calculados através do ensaio em vazio. De acordo com FITZGERALD *et al.* [11], esse teste consiste em aplicar a tensão nominal em um dos lados do transformador e deixar os enrolamentos do lado oposto em aberto. Como o ensaio é realizado com tensão nominal, recomenda-se aplicá-la no lado BT, deixando o lado AT em aberto, pois lida-se com níveis de tensão menores e mais seguros. A Figura 19 mostra o esquema do ensaio em uma das fases, com o primário em aberto. Os parâmetros estão referidos ao secundário.

A impedância por fase de circuito aberto vista do lado secundário nesse caso será:

$$Z_{CA} = R_2 + jX_2 + Z_0 \quad (22)$$

$$Z_{CA} = R_2 + jX_2 + \frac{R_{Fe}(jX_\mu)}{R_{Fe} + jX_\mu} \quad (23)$$

Como a impedância de excitação é elevada, a queda de tensão na impedância de dispersão do secundário pode ser desconsiderada e a tensão aplicada V_{CA} é praticamente igual à FEM induzida pelo fluxo no núcleo por fase E_{CA} .

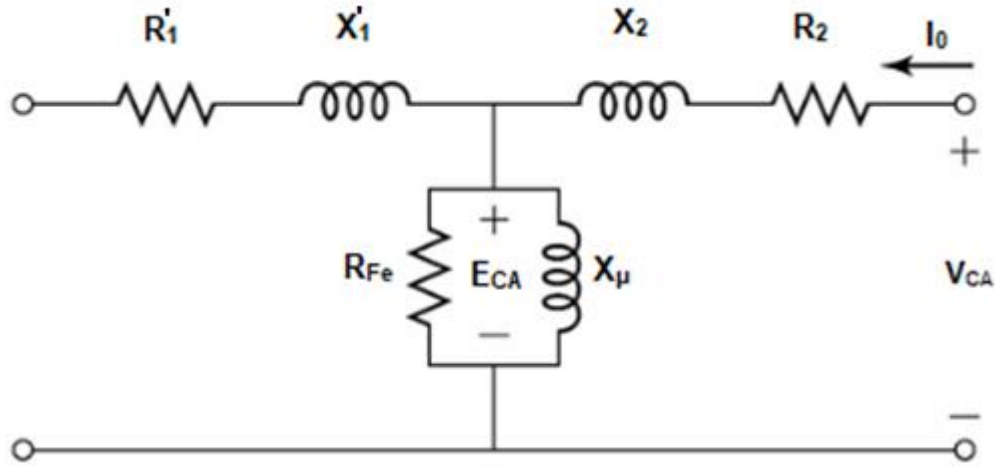


Figura 19 - Circuito do ensaio em vazio em uma das fases [11]. Adaptado pelo autor.

Além disso, a perda por Efeito Joule no enrolamento secundário é desprezível devido à baixa corrente de excitação, se comparada com a corrente nominal, e devido à baixa resistência, se comparada com a resistência do ramo transversal. Dessa forma, a potência de entrada trifásica P_{CA} é aproximadamente igual à perda no núcleo.

Assim, a impedância de dispersão pode ser desprezada e é possível aproximar a impedância de circuito aberto por fase Z_{CA} como sendo a própria impedância de magnetização por fase Z_0 . Assim, tem-se:

$$Z_{CA} \approx Z_0 = \frac{R_{Fe}(jX_{\mu})}{R_{Fe} + jX_{\mu}} \quad (24)$$

Considerando que o transformador é trifásico, os parâmetros transversais por fase podem ser calculados através das seguintes relações:

$$R_{Fe} = \frac{|V_{CA\,fase}|^2}{\frac{P_{CA}}{3}} \quad (25)$$

$$|Z_0| = \frac{|V_{CA_{fase}}|}{|I_{0_{fase}}|} \quad (26)$$

$$X_\mu = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_0|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_{Fe}}\right)^2}} \quad (27)$$

É preciso se atentar às conexões (estrela ou delta), para usar os valores de tensão e corrente de fase corretos, de acordo com as equações (4), (5), (6) e (7).

Já os parâmetros longitudinais podem ser encontrados através do ensaio de curto-circuito. Conforme afirmam FITZGERALD *et al.* [11], esse teste consiste em curto-circuitar um dos lados do transformador e variar a tensão aplicada no outro lado, até que circule corrente nominal pelos enrolamentos. Como o ensaio é realizado com corrente nominal, recomenda-se medi-la pelo lado AT, curto-circuitando o lado AT, pois lida-se com correntes menores e mais seguras. A Figura 20 mostra o esquema do ensaio em uma das fases, com o secundário em curto-circuito. Os parâmetros estão referidos ao primário.

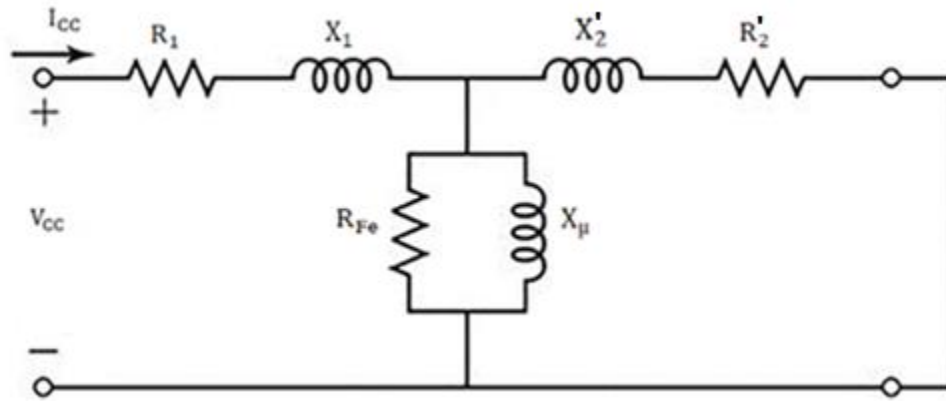


Figura 20 - Circuito do ensaio de curto-circuito em uma das fases [11]. Adaptado pelo autor.

A impedância por fase de curto-circuito vista do lado primário nesse caso será:

$$Z_{CC} = R_1 + jX_1 + \frac{Z_0(R_2 + jX_2)}{Z_0 + R_2 + jX_2} \quad (28)$$

Como a impedância de magnetização é muito maior do que a impedância de dispersão do secundário, o paralelo entre as duas resultará na própria impedância de dispersão do secundário. Assim, ter-se-á:

$$Z_{CC} \approx R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 = R_{eq} + jX_{eq} \quad (29)$$

Os valores medidos são a potência de curto-circuito trifásica, a corrente de fase e a tensão de fase de curto-circuito, representadas respectivamente por P_{CC} , I_{CC} e V_{CC} . Considerando que o transformador é trifásico, os parâmetros longitudinais equivalentes por fase podem ser calculados através das seguintes relações:

$$R_{eq} = R_{CC} = \frac{\frac{P_{CC}}{3}}{|I_{CC\text{fase}}|^2} \quad (30)$$

$$|Z_{eq}| = |Z_{CC}| = \frac{|V_{CC\text{fase}}|}{|I_{CC\text{fase}}|} \quad (31)$$

$$X_{eq} = X_{CC} = \sqrt{|Z_{CC}|^2 - R_{CC}^2} \quad (32)$$

Novamente, é preciso se atentar às conexões (estrela ou delta), para usar os valores de tensão e corrente de fase corretos, de acordo com as equações (4), (5), (6) e (7).

FITZGERALD *et al.* [11] afirmam que as resistências R_1 e R_2 do primário e secundário e as reatâncias X_1 e X_2 do primário e do secundário, podem ser obtidas, de forma aproximada e devido à simetria do modelo, da seguinte forma:

$$R_1 = R_2 = \frac{R_{eq}}{2} \quad (33)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{eq}}{2} \quad (34)$$

Apesar do modelo teórico ser simétrico e equilibrado, na prática, podem surgir valores de corrente ou tensão diferentes entre as fases, como por exemplo na corrente de excitação, devido à não linearidade do núcleo, como visto anteriormente. Uma boa aproximação é realizar a média aritmética dos valores eficazes de cada fase para utilizar no cálculo dos parâmetros. Ressalta-se ainda que estes deverão estar todos referidos para um mesmo lado.

Para representá-los no lado AT, utiliza-se a seguinte relação:

$$Z'_{BT} = a^2 Z_{BT} \quad (35)$$

Ou seja, a impedância do lado BT referida ao lado AT Z'_{BT} é proporcional ao produto do quadrado da relação entre espiras dos lados AT e BT pela impedância calculada através das medições obtidas pelo lado BT Z_{BT} .

Considerando que um transformador trifásico pode ser representado por 3 transformadores monofásicos, pode-se observar nas Figuras 21, 22, 23 e 24 as quatro combinações possíveis para as conexões de um circuito equivalente de um transformador trifásico.

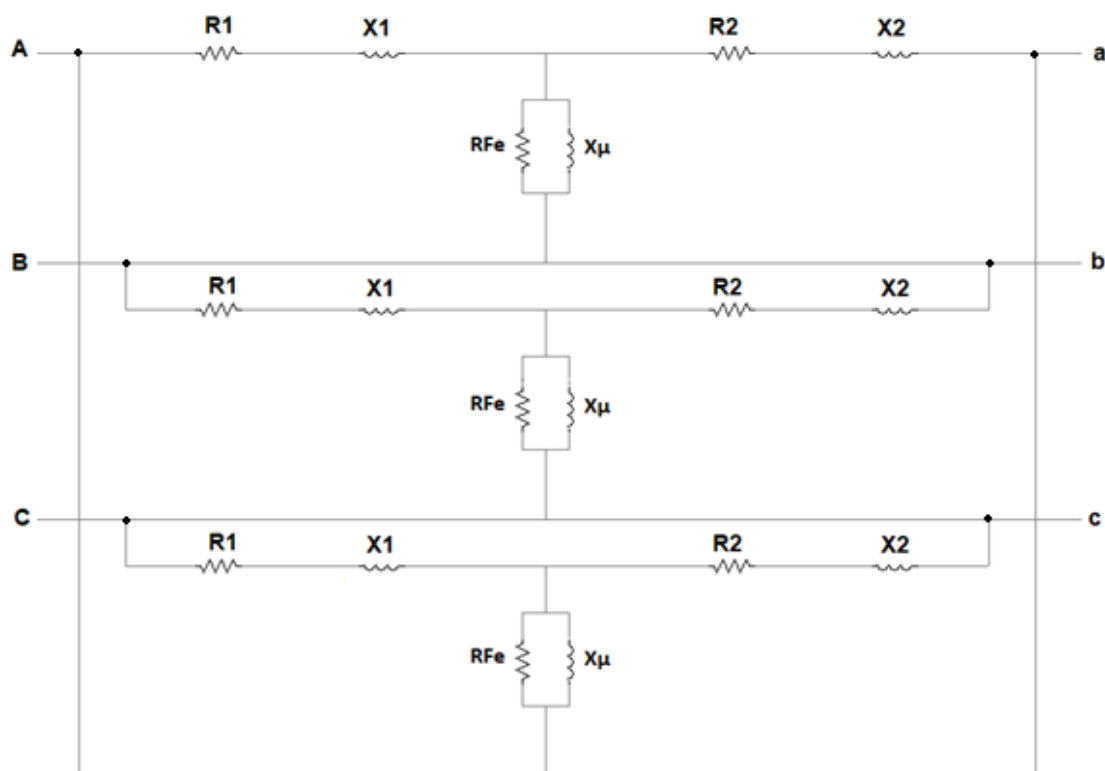


Figura 21 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Δ-Δ.

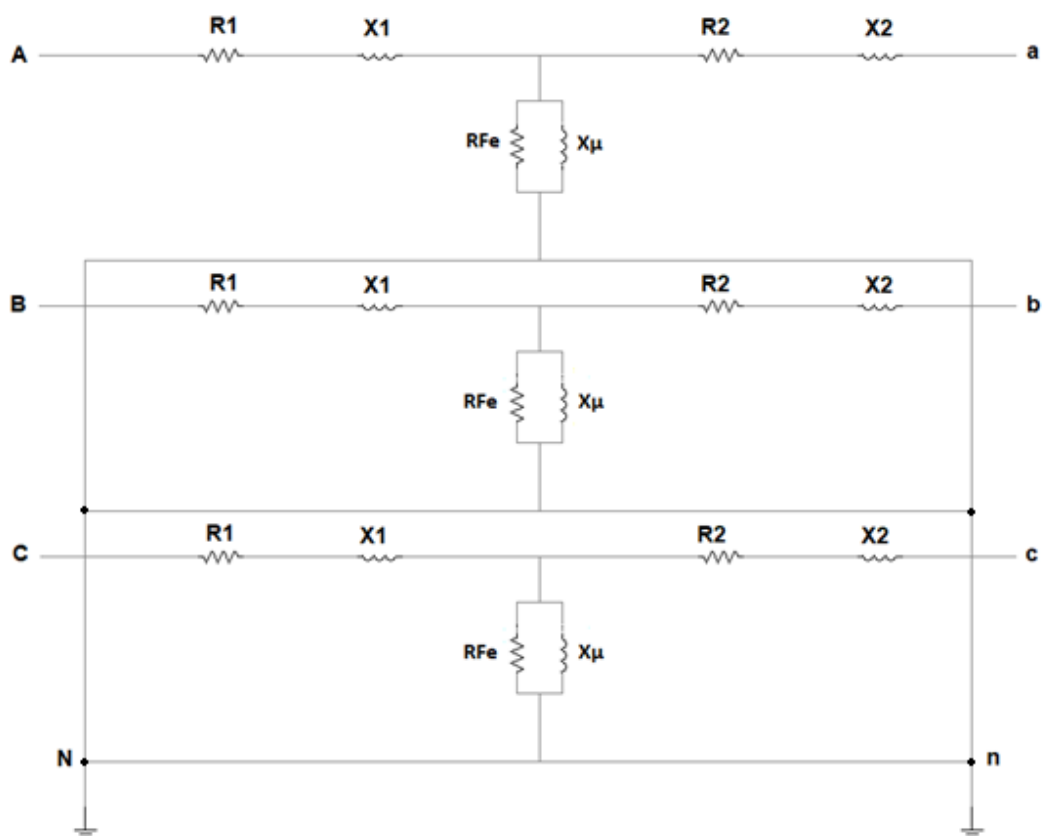


Figura 22 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Y-Y com neutros aterrados.

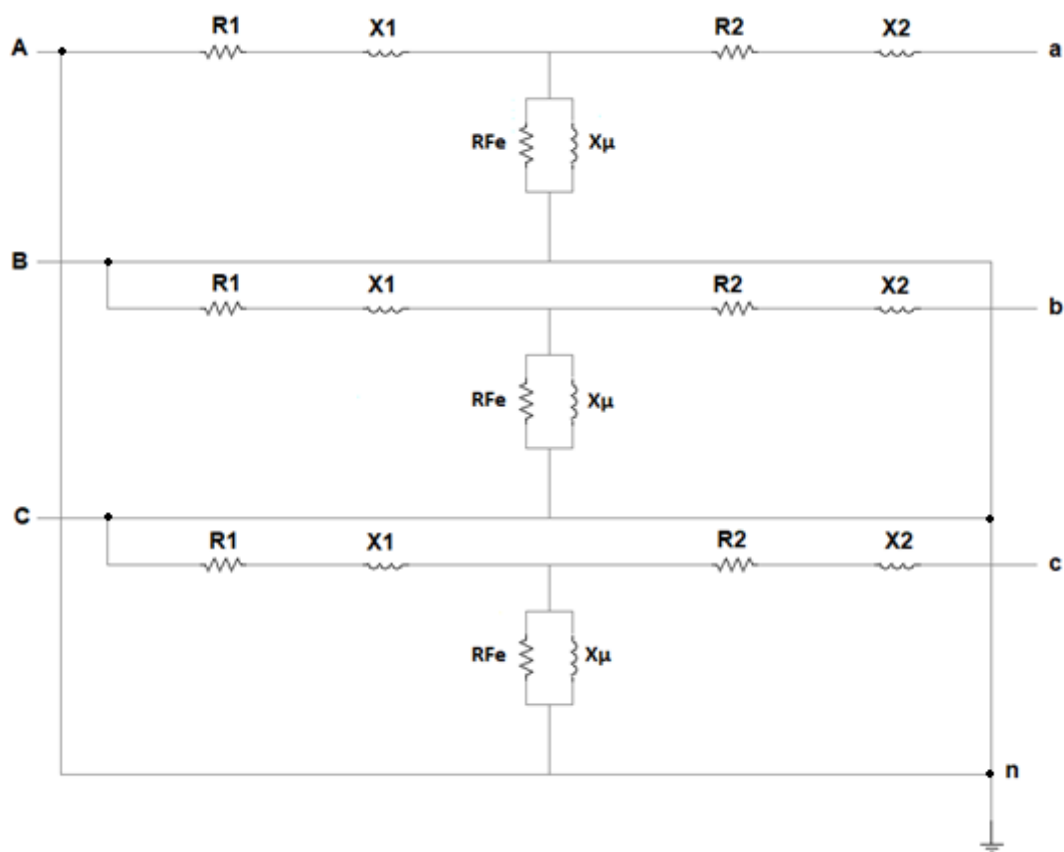


Figura 23 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Δ-Y aterrado.

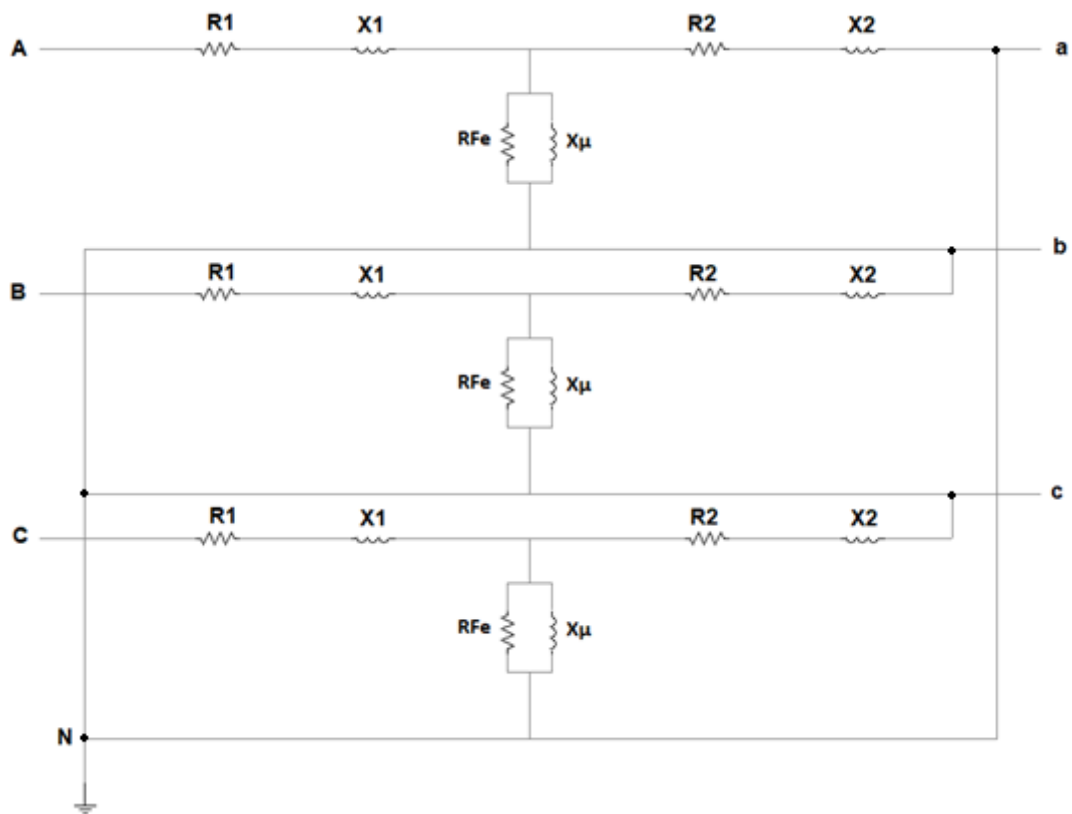


Figura 24 - Circuito equivalente – Transformador trifásico Y aterrado- Δ .

CAPÍTULO 3

ESTUDO DE CASO E PROJETO BASE

Neste capítulo, são realizadas as descrições do problema e da metodologia, é apresentada a modelagem do projeto base, são expressos os resultados dos ensaios em vazio e de curto-circuito, determinados os parâmetros do circuito equivalente e calculados o rendimento e a regulação de tensão.

3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os transformadores de potência, por serem equipamentos críticos ao fornecimento de energia elétrica, devem ser escolhidos pelo consumidor por meio de critérios técnicos e econômicos.

Clientes que possuem aplicações que movimentam um elevado montante pecuniário, que não podem ter sua produção interrompida e que possuem plantas com vida útil reduzida, como por exemplo os dos setores de Óleo & Gás *Offshore*, devem focar na confiabilidade do equipamento e na operação a curto e médio prazos. Já usuários que possuem negócios menos robustos, sob o ponto de vista de faturamento, porém de maior longevidade, como indústrias de porte intermediário, comércios e provedores de bens e serviços em geral, devem ter na eficiência energética e no retorno financeiro a longo prazo seus principais pilares no que se refere ao critério de avaliação durante o processo de aquisição do dispositivo.

Pelo lado dos fornecedores, cabe a adaptação de suas soluções às demandas e necessidades do mercado, para que possam oferecer produtos tecnicamente atrativos e comercialmente viáveis, de forma a obter destaque em relação a seus concorrentes. Assim, o aperfeiçoamento técnico contínuo de portfólio é fundamental dentro da estratégia de negócio do fabricante, que tem como desafio equilibrar esse fator com a competitividade de preços.

Visando atender tanto aos interesses da contratada quanto da contratante, em uma relação ganha-ganha de longo prazo entre as partes, propõe-se uma otimização de projeto de um transformador de potência trifásico a seco utilizando o M.E.F. e os AGs.

3.2. METODOLOGIA

Obtiveram-se do catálogo dados construtivos mecânicos, elétricos e magnéticos, de um projeto de um transformador real, pertencente à linha de produtos de um fabricante desse tipo de equipamento.

Com estes dados, foi realizada a modelagem 3D e, em seguida, esta foi exportada para um modelo 2D, onde foram feitas simulações através do M.E.F., com o objetivo de observar o comportamento do dispositivo, de modo a validar o projeto base. Para isso, foi utilizado um computador que possui um processador Intel Core i7 – 5500U, com 8 GB de memória RAM e com 600 GB de HD. Como dito anteriormente, os resultados não foram extraídos diretamente do modelo 3D devido às limitações físicas de *hardware* e de tempos de simulação. Os principais aspectos a serem observados nesse contexto são as perdas no núcleo ferromagnético e as perdas nas bobinas, que são objetos do processo de melhoria do equipamento.

Em seguida, foi possível determinar o modelo do circuito equivalente do transformador. Também foram escolhidos os parâmetros que seriam alterados para que as perdas elétricas pudessem ser reduzidas, limitadas ao menor aumento de custo possível. Foi proposta uma alteração tanto em aspectos dimensionais quanto em relação ao material utilizado na fabricação das bobinas. Esse procedimento foi realizado através da técnica de AGs.

De posse dos novos dados, oriundos do processo anterior, foi possível implementar uma nova proposição de projeto, modificado por meio desses novos *inputs*. Com isso, foram feitas novas simulações eletromagnéticas através do M.E.F., objetivando ratificar que o novo modelo proposto proporcionava perdas elétricas menores do que no projeto original. Em adição, foram determinados o novo circuito equivalente e o novo rendimento do equipamento.

Por fim, foi feito um estudo comparativo de preços entre os dois projetos e uma análise de *payback*, visando proporcionar ao cliente um panorama sobre o retorno do investimento inicial feito ao se adquirir o novo modelo, em detrimento do anterior. A Figura 25 apresenta um diagrama esquemático sobre as etapas realizadas durante este trabalho.

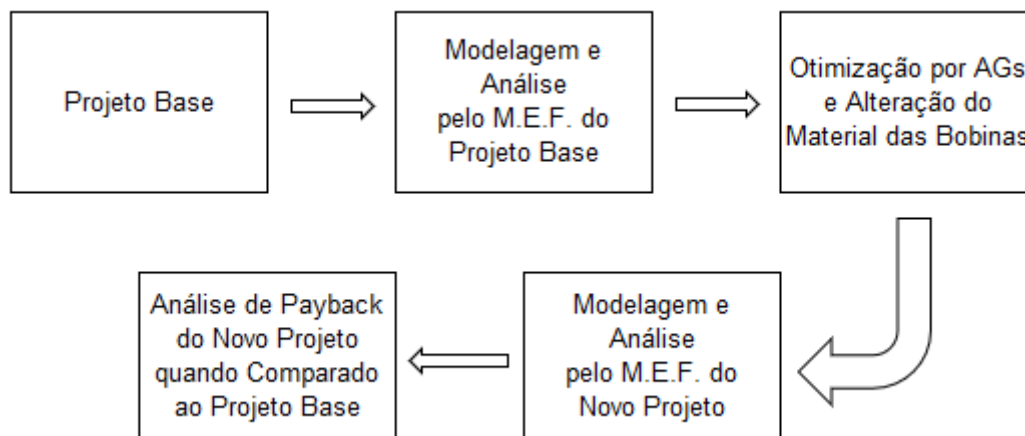


Figura 25 - Esquema ilustrativo sobre as etapas do trabalho.

3.3. MODELAGEM DO PROJETO BASE

Foi escolhido um transformador de potência de distribuição trifásico a seco de um dos fabricantes disponíveis no mercado. O equipamento possui potência nominal trifásica de 1500 kVA, relação de tensão de 13,8 kV/0,38 kV, impedância de 6% na base do transformador, grupo de ligação YNyn0, IP00, resfriamento a ar natural e fator K igual a 1. De acordo com SIEMENS [20], o material utilizado no núcleo do tipo envolvido é o Aço Silício de Grão Orientado e as bobinas de AT e BT são feitas de alumínio. Os valores considerados, tanto para as perdas no núcleo quanto para as perdas nos condutores das bobinas, tomaram como referência um projeto de um transformador de 1600 kVA – 10,0 kV/0,4 kV, fabricado para atender ao mercado europeu. Não são fabricados transformadores de 1500 kVA - 13,8 kV/0,38 kV para atender àquela região, devido à padronização da norma local. Entretanto, os valores atualizados para as perdas podem ser considerados aproximadamente os mesmos, uma vez que ambas as potências e níveis de tensão são próximos. Assim, tomou-se como base 2,8 kW para as perdas no núcleo e de 13,6 kW para as perdas nos condutores das bobinas, totalizando 16,4 kW [20].

Os desenhos das vistas podem ser observados nas Figuras 26, 27 e 28. A Tabela 3 apresenta a legenda dos componentes do transformador. Além disso, a Figura 29 mostra um exemplo de como são apresentados os dados de placa desse tipo de equipamento.

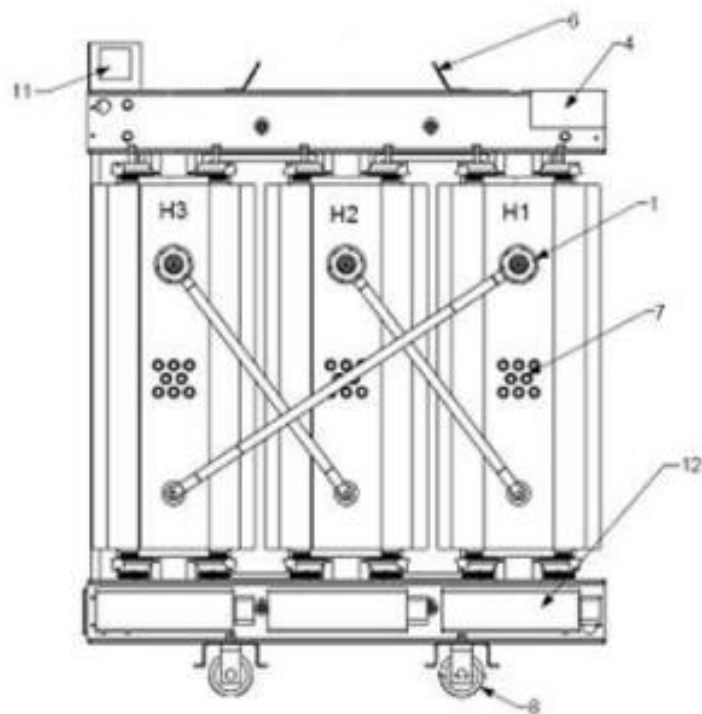


Figura 26 - Vista frontal [31].

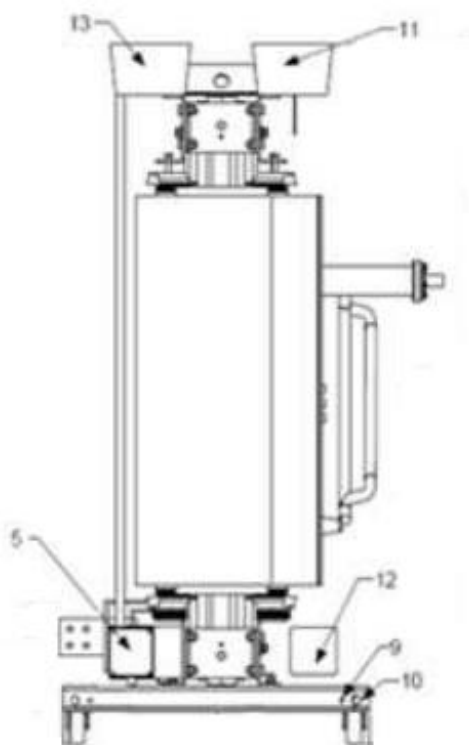


Figura 27 - Vista lateral [31].

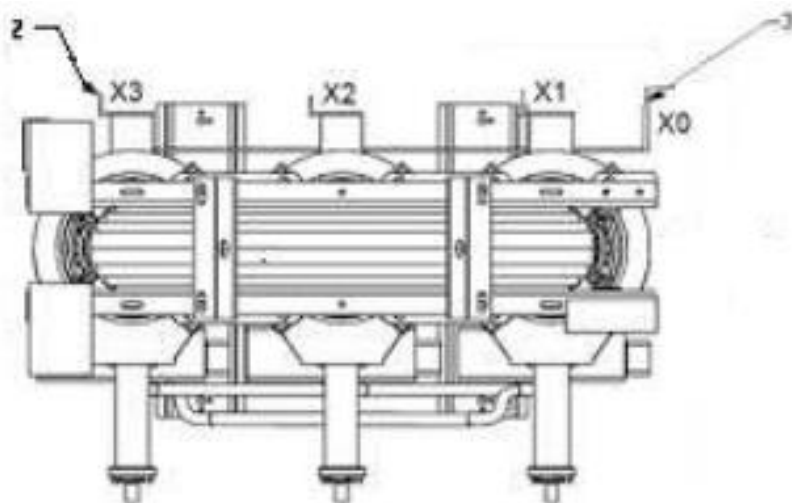


Figura 28 - Vista superior [31].

Tabela 3 - Legenda dos componentes do transformador [31].

1	Terminais AT H1-H2-H3
2	Terminais BT X1-X2-X3
3	Terminal de neutro X0
4	Placa de identificação
5	Circuito de proteção auxiliar
6	Olhas para içamento
7	Comutador de tensão
8	Rodas bidirecionais
9	Bornes de aterramento
10	Olhas para tração
11	Circuito de proteção térmica
12	Ventiladores de resfriamento
13	Unidade de acionamento de ventiladores

Nº	TIPO	DATA FABR.	NORMA	NBR 5356-11
POT. 1500 kVA	FASES 3	FREQ. 60 Hz	NÍVEIS DE ISOLAMENTO TENSÕES SUPORTÁVEIS	AT BT
CLASSE TEMP. MAT. ISOL. AT/BT F/F	RESFR.	FREQUÊNCIA INDUSTRIAL (kV)	34	3
LIMITES ELEV. TEMP. ENROL. AT/BT	100/100°C	IMPULSO ATMOSFÉRICO (kV)	95	—
IMPEDÂNCIA A 120°C E	V	%	TEMPERATURA AMBIENTE MÁXIMA	40 °C
CLASSES DE AMBIENTE / CLIMA / FOGO	E2/C2/F1	GRAU DE PROTEÇÃO	FATOR K	

ALTA TENSÃO H1-H2-H3			
VOLTS	AMPERES	POS.	LIGAR
13800	62.8	1	5-6
13200	65.6	2	4-6
12600	68.7	3	4-7
12000	72.2	4	3-7
11400	76.0	5	3-8

BAIXA TENSÃO X0-X1-X2-X3	
VOLTS	AMPERES
380/220	2279

DIAGRAMA FASORIAL
Dyn1

MASSA CUBÍCULO kg INSTRUÇÕES

MASSA TOTAL kg PLACA Nº

Figura 29 - Exemplo de como os dados são expressos na placa de um transformador [32].

Com isso, foi desenvolvido um modelo para realização das simulações. As Tabelas 4 e 5 apresentam os dados dimensionais considerados para as bobinas BT e AT e para o núcleo ferromagnético, respectivamente, estimados a partir dos dados de comprimento, largura e altura expressos em catálogo. As Figuras 30, 31, 32 e 33 graficamente esses parâmetros.

Tabela 4 - Dados dimensionais das bobinas BT e AT.

	Bobinas BT	Bobinas AT
Distância de centro a centro entre as bobinas (mm)	654,19	654,19
<i>Gap</i> entre a bobina BT e o núcleo (mm) e entre bobinas AT e BT	12,53	6,77
Raio interno (mm)	120,74	208,50
Raio externo (mm)	201,73	289,49
Altura das bobinas (mm)	870,05	870,05

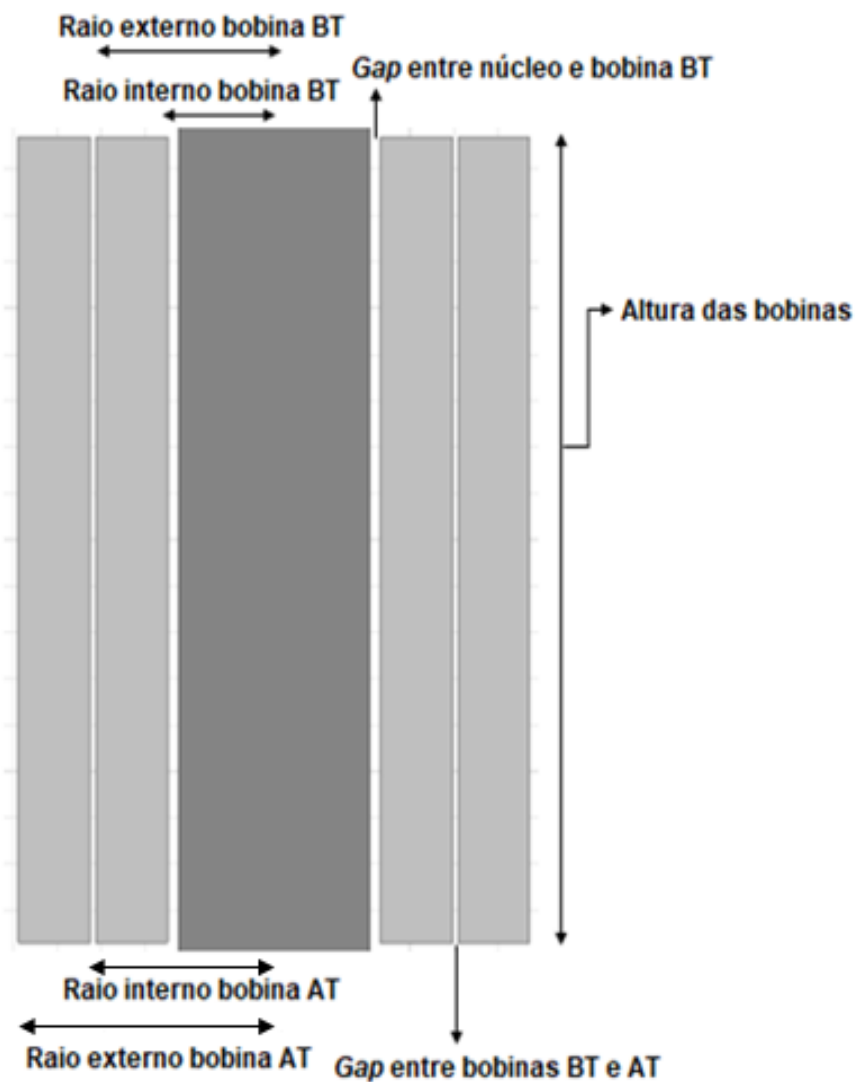


Figura 30: Dimensionais das bobinas indicados na vista frontal.

Tabela 5 - Dados dimensionais do núcleo ferromagnético.

	Núcleo Ferromagnético
Altura externa (mm)	1.575,89
Comprimento externo (mm)	1.524,80
Altura das janelas (mm)	1.143,03
Comprimento das janelas (mm)	437,76
Distância entre bases janela - bobinas (mm)	136,49
Profundidade (mm)	216,43
Número de camadas do núcleo	9,00

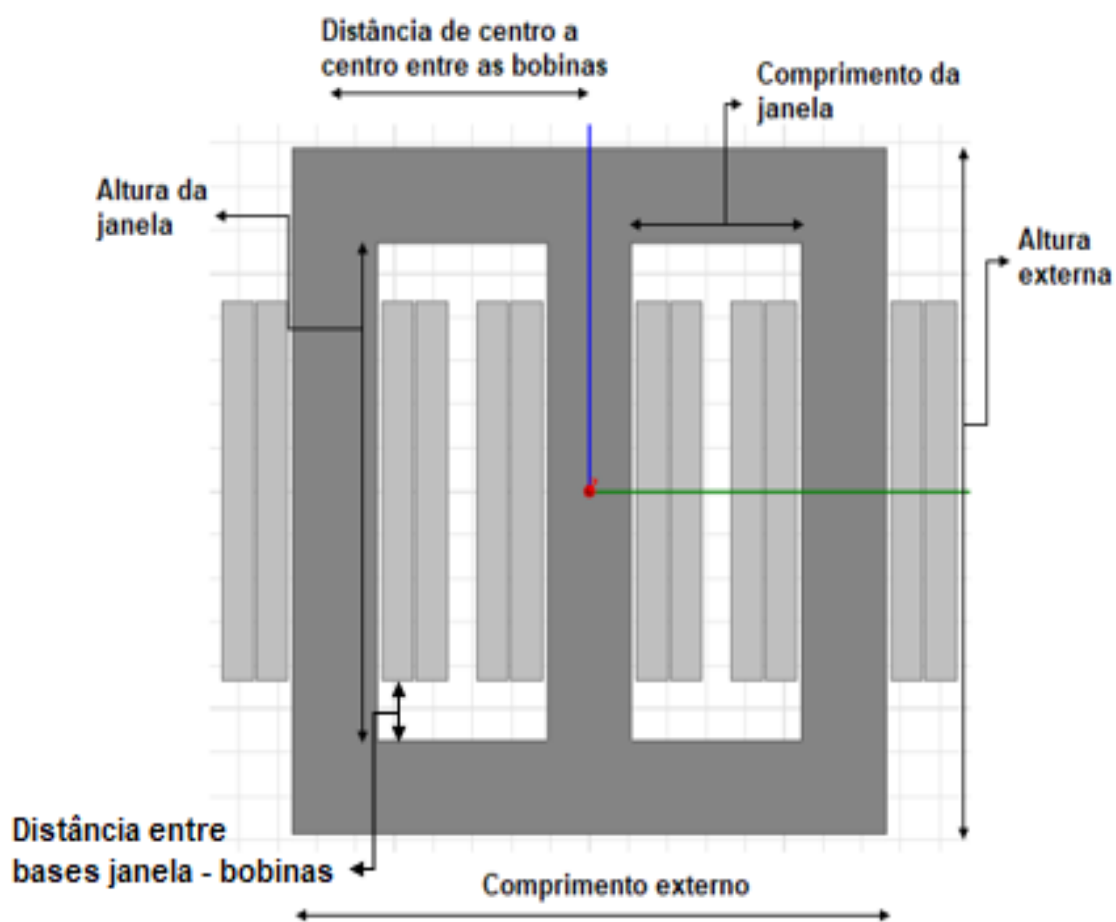


Figura 31: Dimensionais do núcleo indicados na vista frontal.

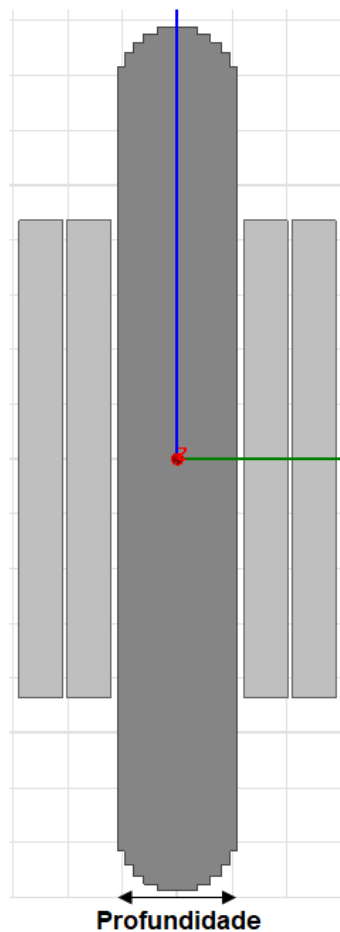


Figura 32: Profundidade do núcleo indicada na vista lateral.

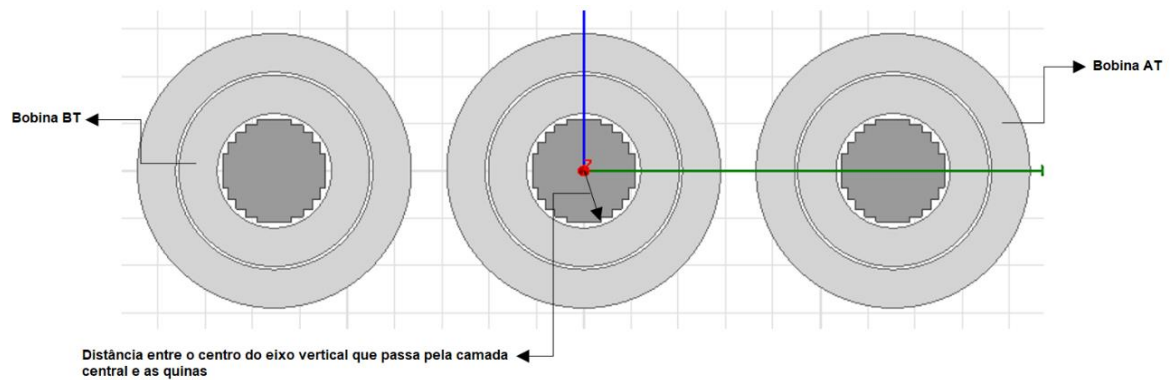


Figura 33: Distância entre o centro do eixo vertical que passa pela camada central do núcleo e as quinas indicada na vista lateral.

O material utilizado nas bobinas AT e BT durante a simulação foi o alumínio. Já as curvas de densidade de fluxo magnético (B) por intensidade de campo magnético (H) e de perdas no núcleo (P) por densidade de fluxo magnético (B) referentes ao Aço de Grão Orientado que compõe o núcleo podem ser observadas através das Figuras 34 e 35 [33]. Lembrando

que 1 kGauss equivale a 0,1 T, 1 Oe equivale a aproximadamente 79,58 A/m e 1 kg equivale a aproximadamente 2,2046 lb.

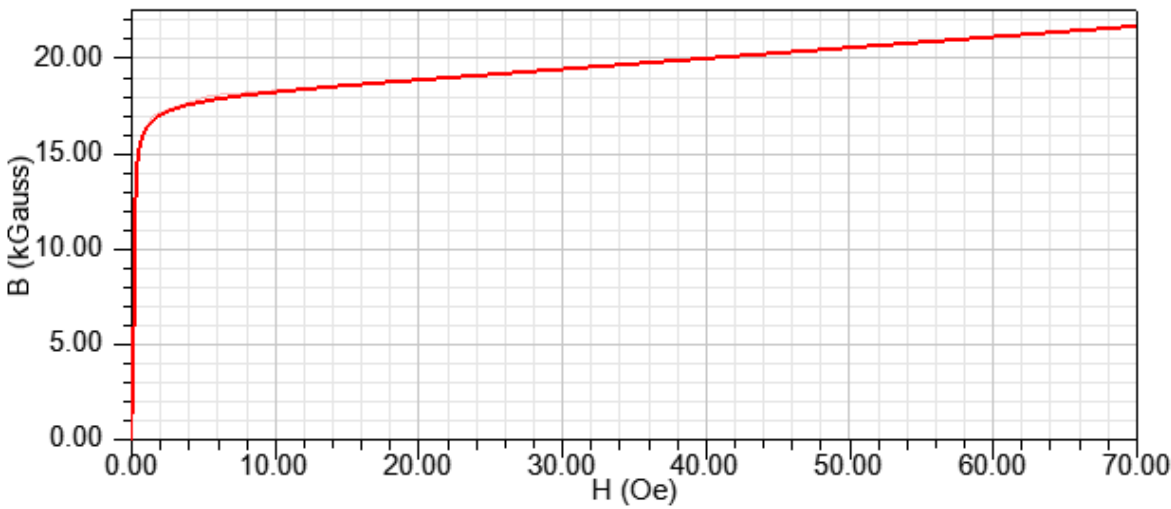


Figura 34 - Curva B x H do material do núcleo [33].

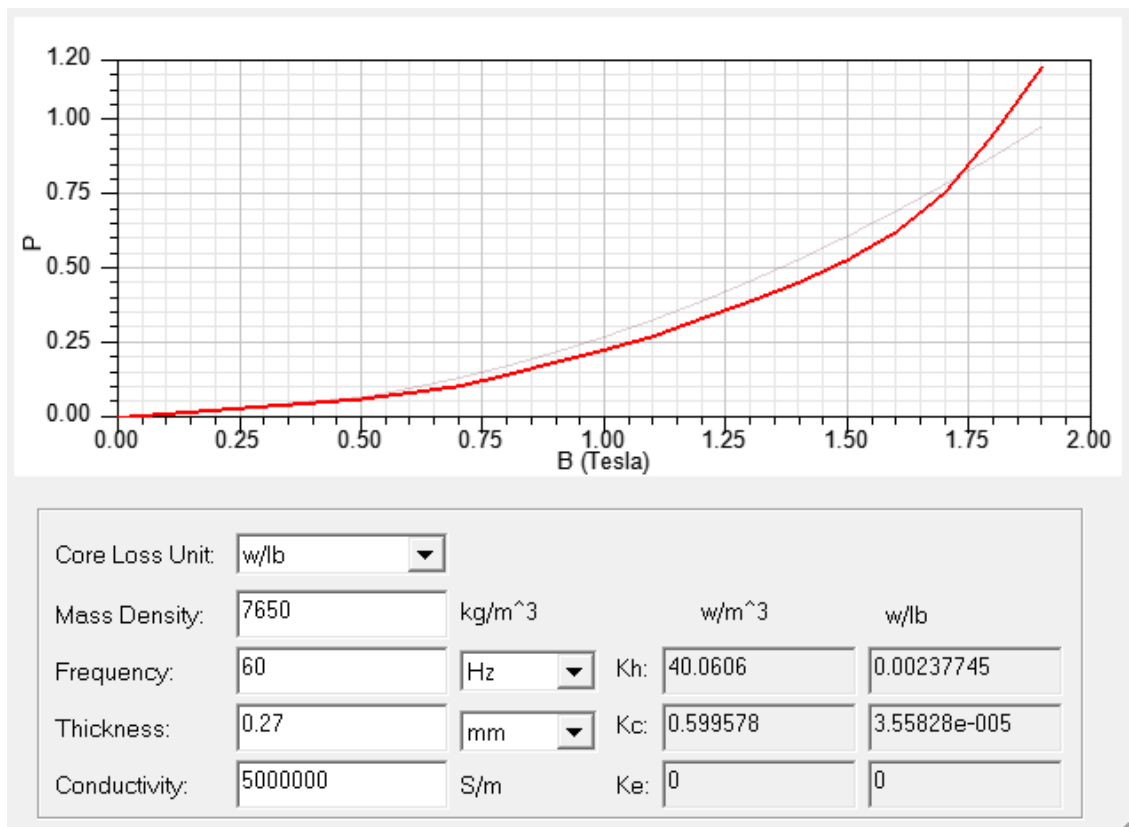


Figura 35 - Curva P x B do material do núcleo [33].

O modelo 3D desenvolvido é apresentado na Figura 36. Foi utilizado o RMxpert para obter os modelos do núcleo e das bobinas. Eles foram editados para que tivessem os

dimensionais expressos nas Tabelas 4 e 5. Ao núcleo, foi criado um novo material no programa, onde foram atribuídas as curvas $B \times H$ e $P \times B$ mostradas nas Figuras 34 e 35. Às bobinas, foi designado o material alumínio, que foi identificado com a cor cinza claro.

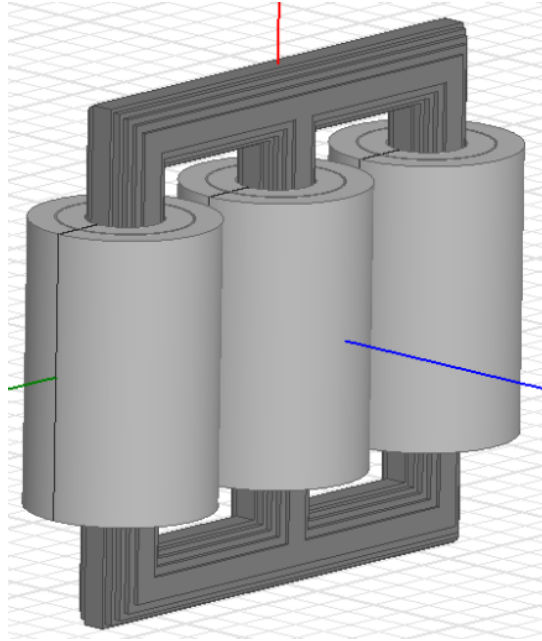


Figura 36 - Modelo 3D do equipamento.

Exportando o modelo acima para a interface 2D, tem-se a seguinte vista observada na Figura 37. Nela também estão indicadas as localizações das fases A, B e C e das bobinas BT e AT.

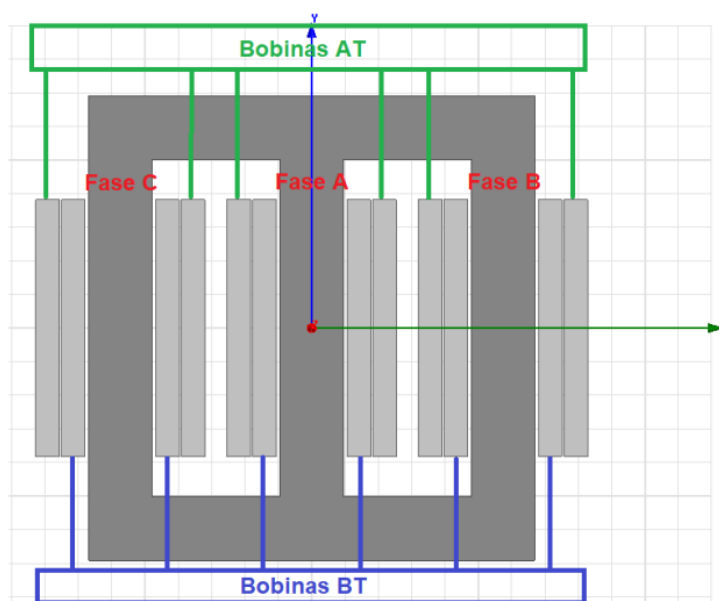


Figura 37 - Modelo 2D do equipamento.

Baseado nas perdas em carga do catálogo, as resistências das bobinas foram ajustadas para $0,58 \Omega$ no lado AT e $0,44 \text{ m}\Omega$ no lado BT. Com o ensaio de curto-circuito, as perdas obtidas na simulação podem ser comparadas com as de catálogo, o que implicará na validação da parametrização desses valores.

A equação (12) é utilizada pelo programa do M.E.F. para calcular as perdas no núcleo, com α e β iguais a 1 e 2, respectivamente [34]. Como visto, essas perdas são proporcionais à B_{max} . Assim, foi considerada a condição limítrofe da região linear, onde B_{max} ficaria em torno de 1,4 T. Este valor corresponde à máxima densidade de fluxo do Aço Silício de Grão Orientado utilizado, antes que o mesmo entre na região de saturação.

No modelo 3D do RMxpert, o programa ajusta automaticamente as distâncias entre as quinas das camadas mais externas de forma igualitária, ao longo dos eixos x, y e z. Quando se exportou para o modelo 2D, considerou-se que o comprimento da perna e a profundidade apresentavam o mesmo valor da distância entre as quinas mais extremas. Ou seja, a seção reta do núcleo foi considerada como sendo a de um quadrado para calcular a densidade de fluxo. Sabe-se, no entanto, que no modelo 3D, o núcleo do transformador de referência é composto por 9 camadas de diferentes dimensões, que vão se afunilando nas extremidades, tornando a área da seção reta mais próxima de um círculo. Abaixo, é possível avaliar o impacto dessa aproximação na quantidade de espiras a ser utilizada no projeto.

A área de um quadrado de lado “l” é dada por:

$$A = l^2 \quad (36)$$

A medida do lado é informada na Tabela 5. Assim:

$$A = 0,216^2 \cong 0,047 \text{ m}^2 \quad (37)$$

Com isso, para o ensaio em vazio, com excitação pelo lado BT e utilizando a equação (18), tem-se para o número de espiras do lado BT:

$$N_2 = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{4,44 \times 60 \times 1,4 \times 0,047} \cong 13 \text{ espiras} \quad (38)$$

Por conseguinte, utilizando as equações (3) e (38), o número de espiras do lado AT é dado por:

$$N_1 \cong \frac{13,8}{0,38} \times 13 \cong 472 \text{ espiras} \quad (39)$$

Se fosse considerada uma aproximação de seção reta circular, a área seria dada por:

$$A = \pi \times r^2 \quad (40)$$

A medida do lado é informada na Tabela 5. Assim:

$$A = \pi \times 0,114^2 \cong 0,041 \text{ m}^2 \quad (41)$$

Com isso, com excitação pelo lado BT e utilizando a equação (18), tem-se para o número de espiras do secundário:

$$N_2 = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{4,44 \times 60 \times 1,4 \times 0,041} \cong 14 \text{ espiras} \quad (42)$$

Por conseguinte, utilizando as equações (3) e (42), o número de espiras do primário é dado por:

$$N_1 \cong \frac{13,8}{0,38} \times 14 \cong 508 \text{ espiras} \quad (43)$$

Isso representa a seguinte diferença percentual:

$$\text{Diferença percentual de espiras} = \left(\frac{14-13}{13} \right) \times 100\% = 7,69\% \quad (44)$$

Por não gerar uma grande discrepância no projeto e por simplificar os cálculos das perdas no núcleo e do custo do equipamento, seguir-se-á levando-se em conta o que a interface 2D do programa considera: uma seção reta quadrada para o núcleo.

3.4. ENSAIO EM VAZIO DO PROJETO BASE

O ensaio em vazio foi realizado aplicando tensão trifásica de fase nominal no lado BT e deixando o lado AT em aberto, durante 500 ms. As expressões das tensões de fase aplicadas no tempo são expressas nas equações (45), (46) e (47):

$$V_{FA} = 380 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (1 - e^{-50t}) \sin(2 \times \pi \times 60 \times t) \quad (45)$$

$$V_{FB} = 380 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (1 - e^{-50t}) \sin\left((2 \times \pi \times 60 \times t) - 2 \times \frac{\pi}{3}\right) \quad (46)$$

$$V_{FC} = 380 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (1 - e^{-50t}) \sin\left((2 \times \pi \times 60 \times t) + 2 \times \frac{\pi}{3}\right) \quad (47)$$

Foi inserida uma parcela de decaimento exponencial na excitação para eliminação mais acelerada do efeito do transitório inicial (surgimento de correntes de *Inrush* elevadas, que prejudicariam a análise em regime permanente).

As Figuras 38, 39, 40 e 41 apresentam, respectivamente, os resultados das tensões de fase aplicadas no lado BT, as correntes de linha circulantes no lado AT, as correntes de linha circulantes no lado BT e as perdas no núcleo.

A simulação de circuito aberto nos primários foi realizada através de fontes de correntes nulas. As correntes de excitação são as que circulam no lado BT durante o ensaio. Como é possível observar, elas possuem elevado conteúdo harmônico, especialmente de terceira ordem, devido à histerese do núcleo. A média aritmética dos valores eficazes das correntes em cada fase é utilizada para encontrar os parâmetros transversais do circuito equivalente. Desse modo, tem-se:

$$|I_{BT}| = \frac{I_{BTA}^{RMS} + I_{BTB}^{RMS} + I_{BTC}^{RMS}}{3} \quad (48)$$

$$|I_{BT}| = \frac{2,88 + 4,27 + 4,36}{3} \cong 3,84 \text{ A} \quad (49)$$

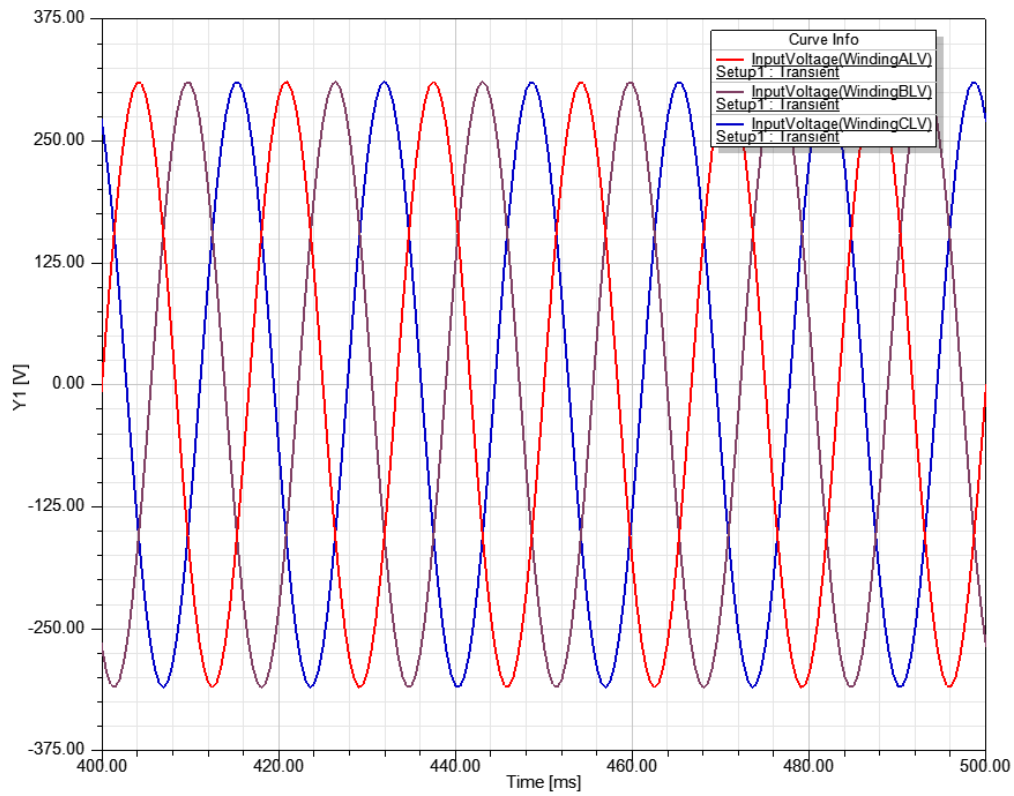


Figura 38 - Tensões no lado BT.

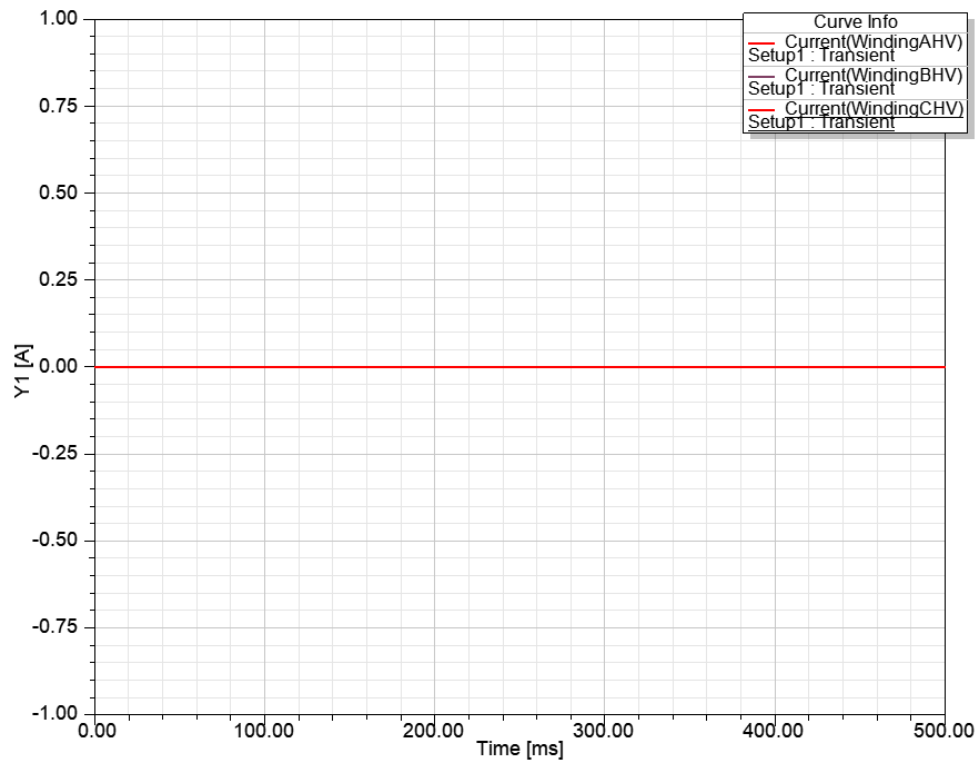


Figura 39 - Correntes no lado AT.

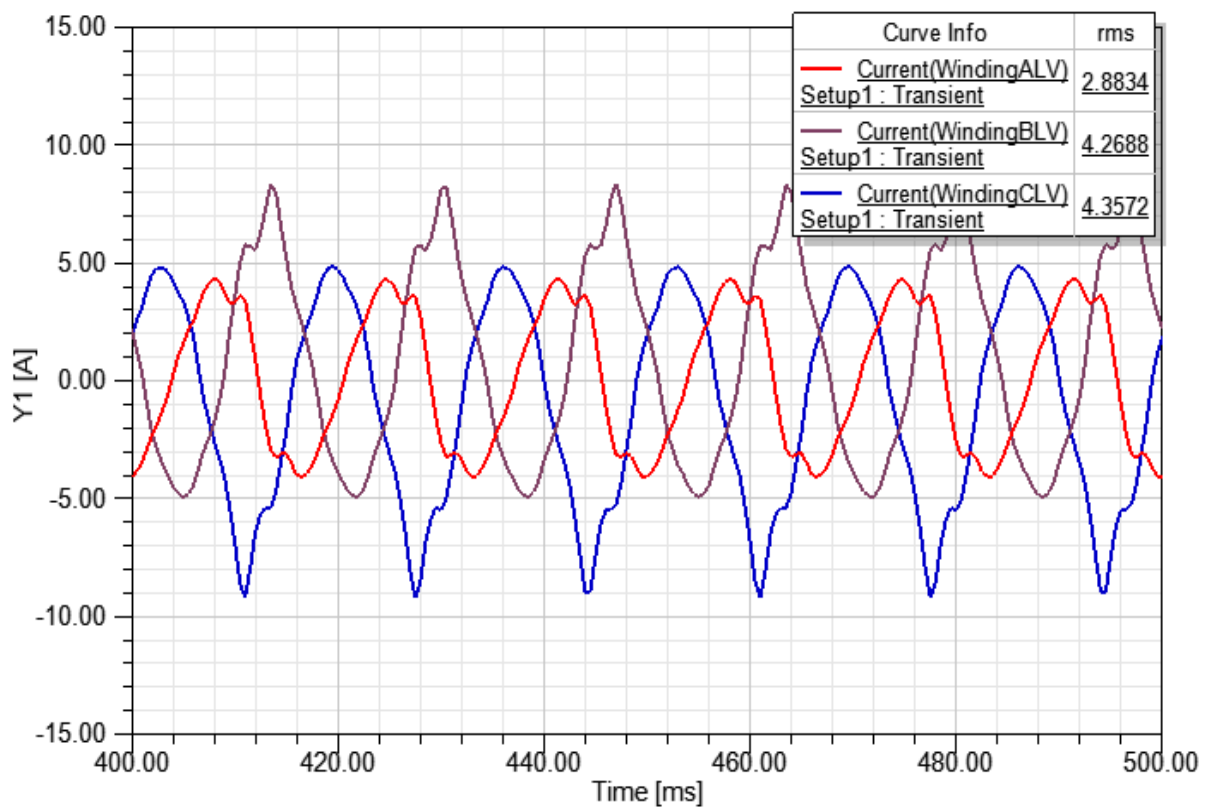


Figura 40 - Correntes no lado BT.

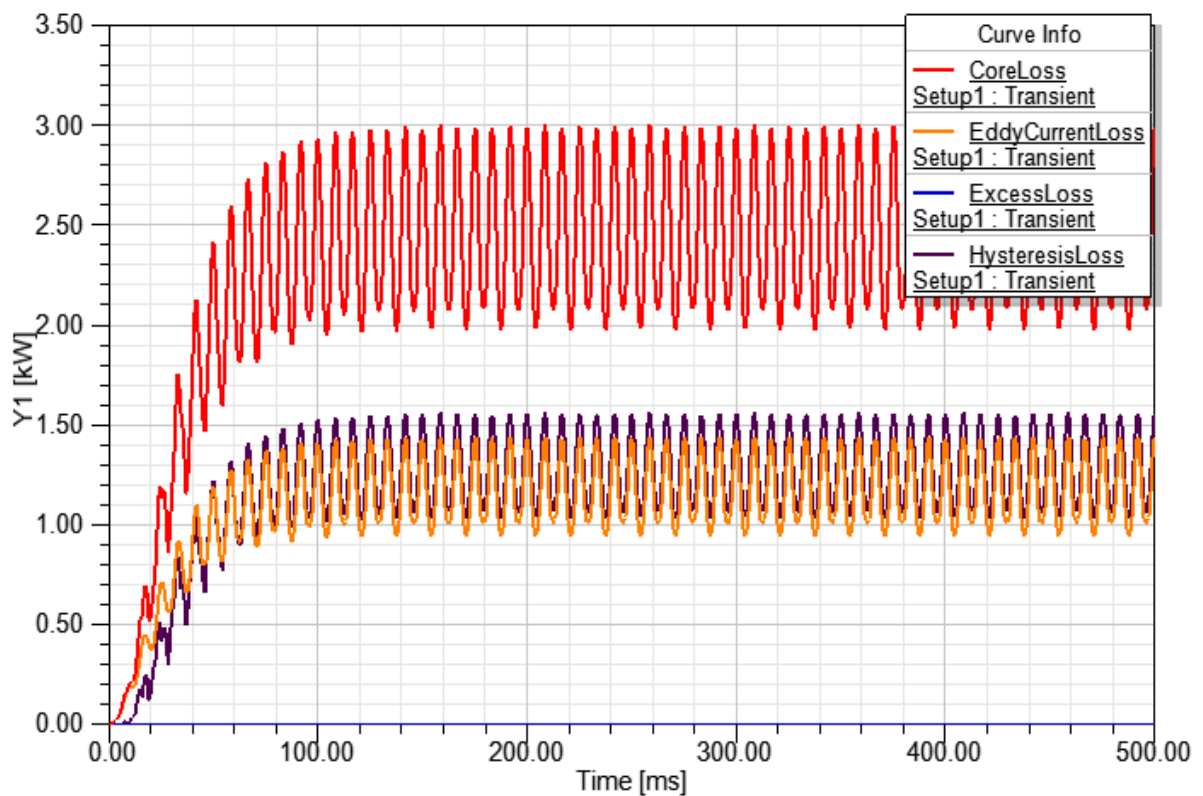


Figura 41 - Perdas no núcleo.

Conforme visto no capítulo 2, as perdas no núcleo P_{CA} são compostas pela soma das perdas por correntes parasitas clássicas, perdas por histerese e perdas por excesso. Pela Figura 41, tem-se:

$$P_{CA} \cong \left(\frac{3,0-2,0}{2} \right) + 2,0 = 2,5 \text{ kW} \quad (50)$$

O valor de catálogo das perdas no núcleo é de 2800 W e o valor encontrado na simulação foi de 2500 W, ou seja, 10,71% menor do que o de referência, o que é um resultado aceitável.

A tensão de fase é $\sqrt{3}$ vezes menor do que a tensão de linha no lado BT por estar ligado em estrela. Além disso, o valor da perda obtido na simulação é trifásico. Logo, para se obter o valor por fase, é necessário dividi-la por 3.

Assim, conforme equações (25), (26) e (27), têm-se os seguintes parâmetros por fase:

$$R_{FeBT} = \frac{\left(\frac{380}{\sqrt{3}} \right)^2}{\frac{2500}{3}} = 57,76 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (51)$$

$$|Z_0|_{BT} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{3,84} \cong 57,13 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (52)$$

$$X_{\mu BT} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{57,13} \right)^2 - \left(\frac{1}{57,76} \right)^2}} \cong 387,86 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (53)$$

Esses valores estão referidos ao lado BT. Calculando a relação entre espiras através da equação (9), tem-se:

$$RT = a = \frac{13800}{380} \cong 36,32 \quad (54)$$

Referindo-nos para os primários, conforme equação (35), têm-se:

$$R_{FeAT} = 36,32^2 \times 57,76 \cong 76,19 \text{ k}\Omega/\text{fase} \quad (55)$$

$$X_{\mu_{AT}} = 36,32^2 \times 387,86 \cong 511,64 \text{ k}\Omega/\text{fase} \quad (56)$$

A Figura 42 mostra os fluxos concatenados nas três fases no lado BT.

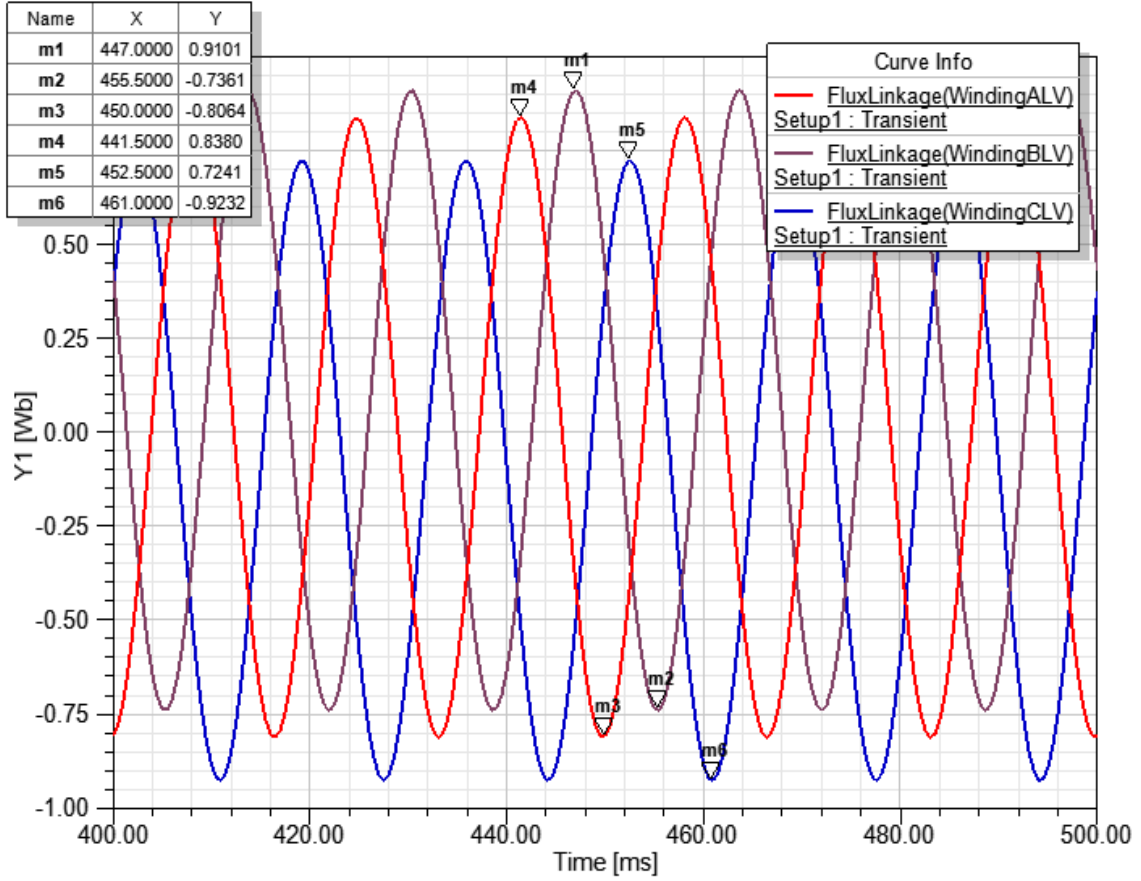


Figura 42 - Fluxo concatenado no lado BT.

Pela imagem acima, o fluxo concatenado apresenta valores mínimos e máximos ligeiramente distintos em cada fase. Esses pequenos desequilíbrios entre fases se devem pelas diferenças dos caminhos magnéticos percorridos pelos fluxos. Dessa forma, o melhor meio de se encontrar um único valor máximo é utilizar a metade do valor pico a pico em cada fase, e em seguida, tomar a média aritmética deles. Assim, tem-se:

$$\lambda_{\max A} \cong \frac{0,81+0,84}{2} = 0,825 \text{ Wb} \quad (57)$$

$$\lambda_{\max B} \cong \frac{0,91+0,74}{2} = 0,825 \text{ Wb} \quad (58)$$

$$\lambda_{\max C} \cong \frac{0,72+0,92}{2} = 0,82 \text{ Wb} \quad (59)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{0,825+0,825+0,82}{3} \cong 0,823 \text{ Wb} \quad (60)$$

Como o fluxo concatenado máximo é dado por:

$$\lambda_{\max} = N\phi_{\max} = NB_{\max}A \quad (61)$$

Então, de acordo com os resultados das equações (37), (38) e (60), tem-se:

$$B_{\max} \cong \frac{0,823}{13 \times 0,047} \cong 1,35 \text{ T} \quad (62)$$

Ou seja, o valor de $B_{\max}$ calculado a partir dos resultados da simulação foi ligeiramente inferior à 1,4 T, devido ao arredondamento do número de espiras.

Ainda é possível verificar as distribuições das densidades e das linhas de fluxo através das regiões do núcleo, como mostram as Figuras 43 e 44. O instante de tempo considerado foi o de 442,88 ms, onde ocorre o $\lambda_{\max}$ encontrado na equação (60).

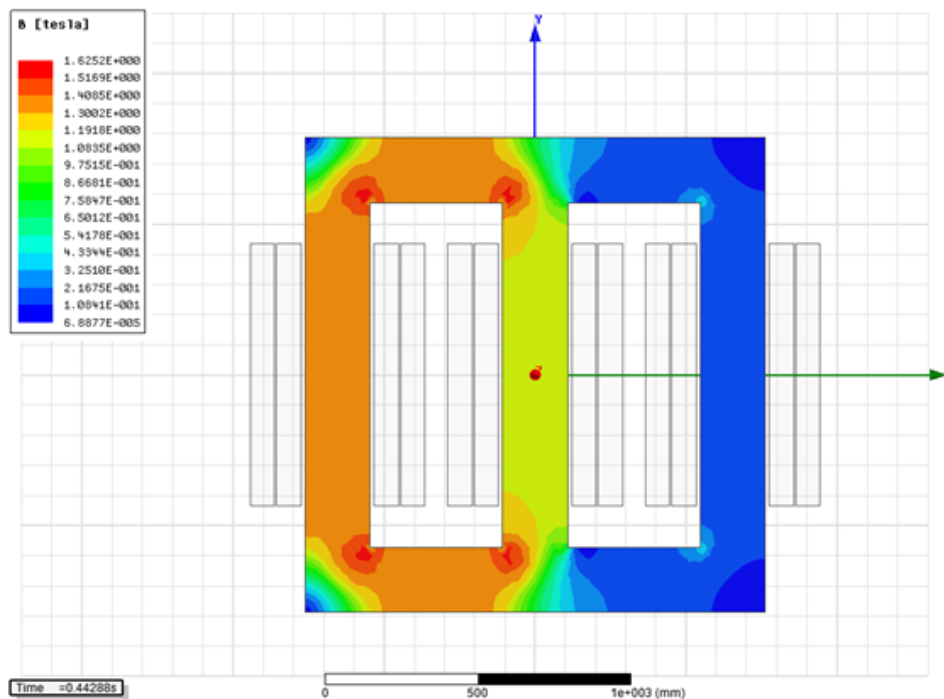


Figura 43 - Distribuição da densidade de fluxo pelo núcleo.

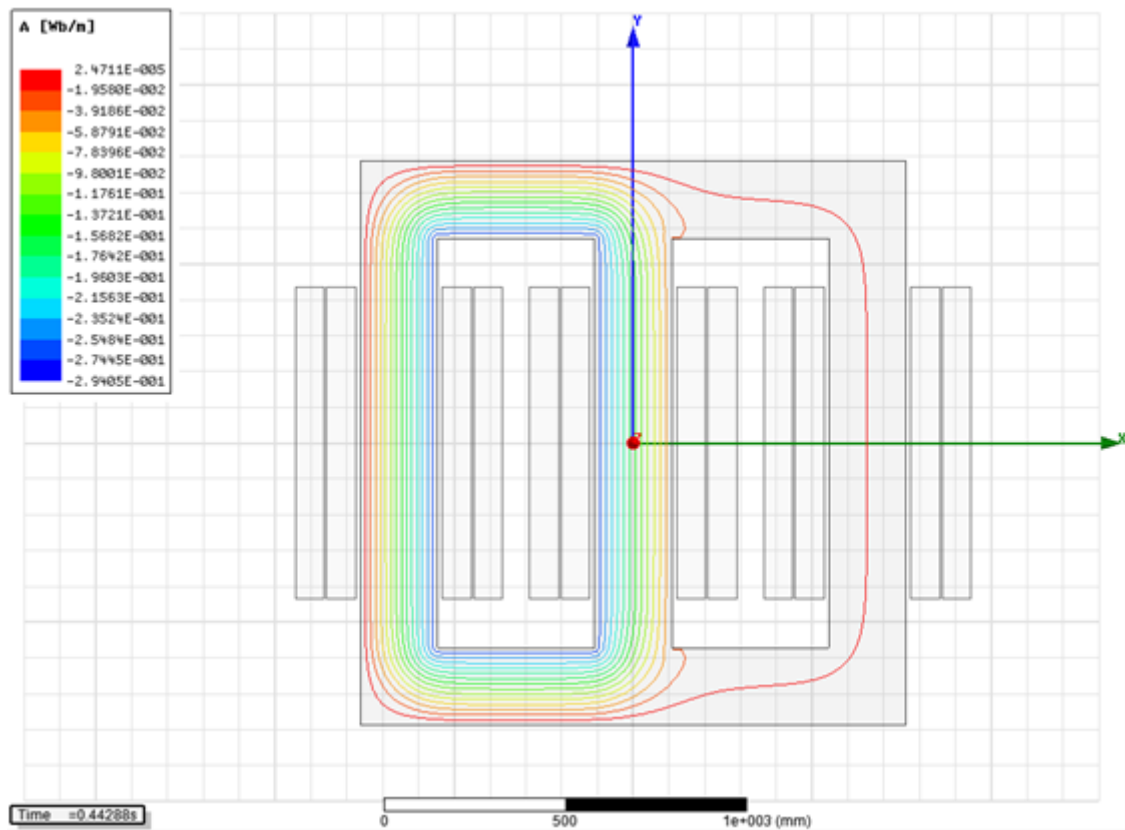


Figura 44 - Distribuição das linhas de fluxo pelo núcleo.

O fluxo ficou mais concentrado entre as fases C e A, pois eram as fases que estavam com os maiores valores de fluxo concatenado instantâneos em módulo, tendo a fase C a maior densidade de fluxo (1,41 T), bem próxima da projetada para ser $B_{\max}$ (1,4 T). Além disso, o menor caminho magnético para as linhas de fluxo que atravessavam a fase C se fecharem é pela fase imediatamente adjacente, que no caso é a A.

Como visto no capítulo 2, a principal premissa considerada no ensaio em vazio é que a queda de tensão na impedância longitudinal pode ser desprezada, uma vez que esta impedância é muito menor do que a impedância transversal e que corrente circulante no teste é muito pequena. A máxima corrente de excitação para um transformador de 1500 kVA da classe de 15 kV é de 1,4% da corrente nominal, como mostra a Tabela 2 [30]. No ensaio realizado, foi encontrado o seguinte valor:

$$I_0 = \frac{3,84}{\left(\frac{1500000}{\sqrt{3} \times 380}\right)} \cong 0,17 \% \quad (63)$$

O valor simulado está abaixo do valor máximo previsto em norma.

3.5. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO DO PROJETO BASE

O ensaio de curto-circuito foi realizado curto-circuitando o lado BT e variando a tensão trifásica de fase aplicada no lado AT, até que se obtivesse a circulação da corrente nominal, durante 500 ms. As Figuras 45, 46, 47, 48 e 49 apresentam, respectivamente, os resultados das tensões de fase aplicadas no lado AT, das tensões no lado BT, as correntes de linha circulantes no lado AT, as correntes de linha circulantes no lado BT e as perdas nas bobinas.

A simulação de curto-circuito nos secundários foi realizada com excitação por fonte de tensão nula. A corrente eficaz que circula no lado AT durante o ensaio, conforme pode ser visto através da Figura 47, é dada por:

$$|I_{AT\text{Simulação}}| = \left| \frac{88,25 + 88,64 + 88,86}{3\sqrt{2}} \right| \cong 62,64 \text{ A} \quad (64)$$

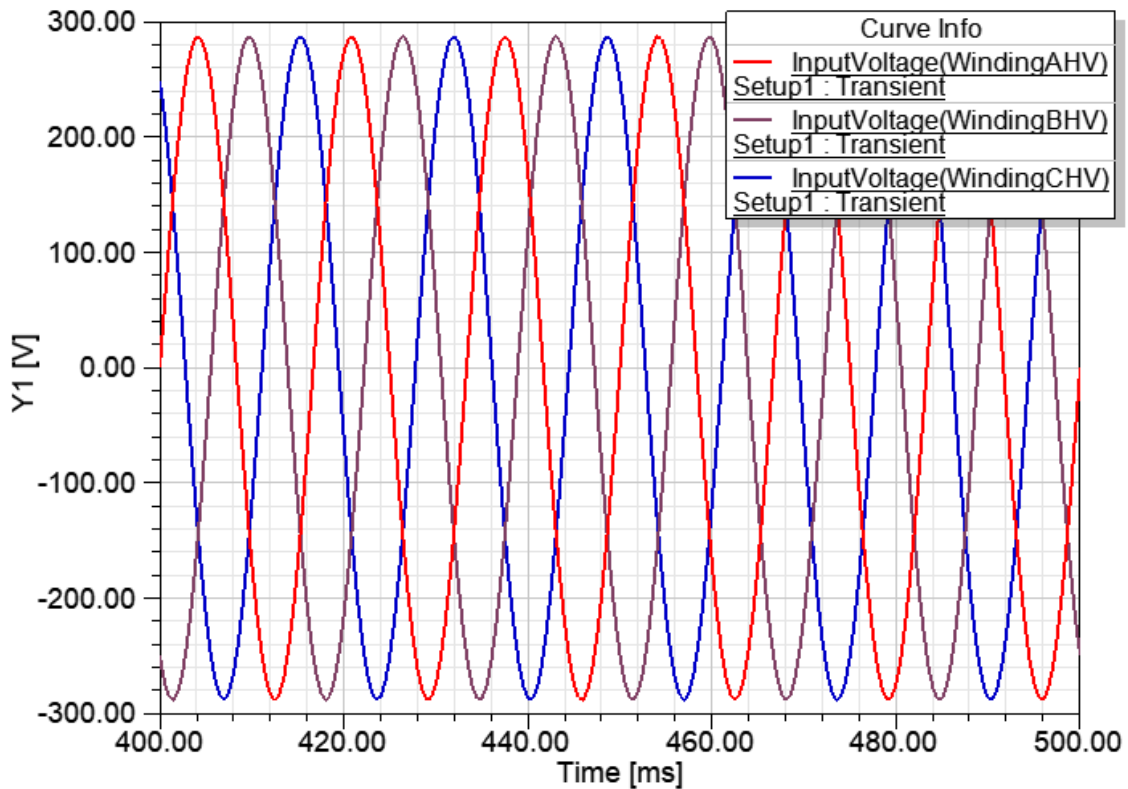


Figura 45 - Tensões no lado AT.

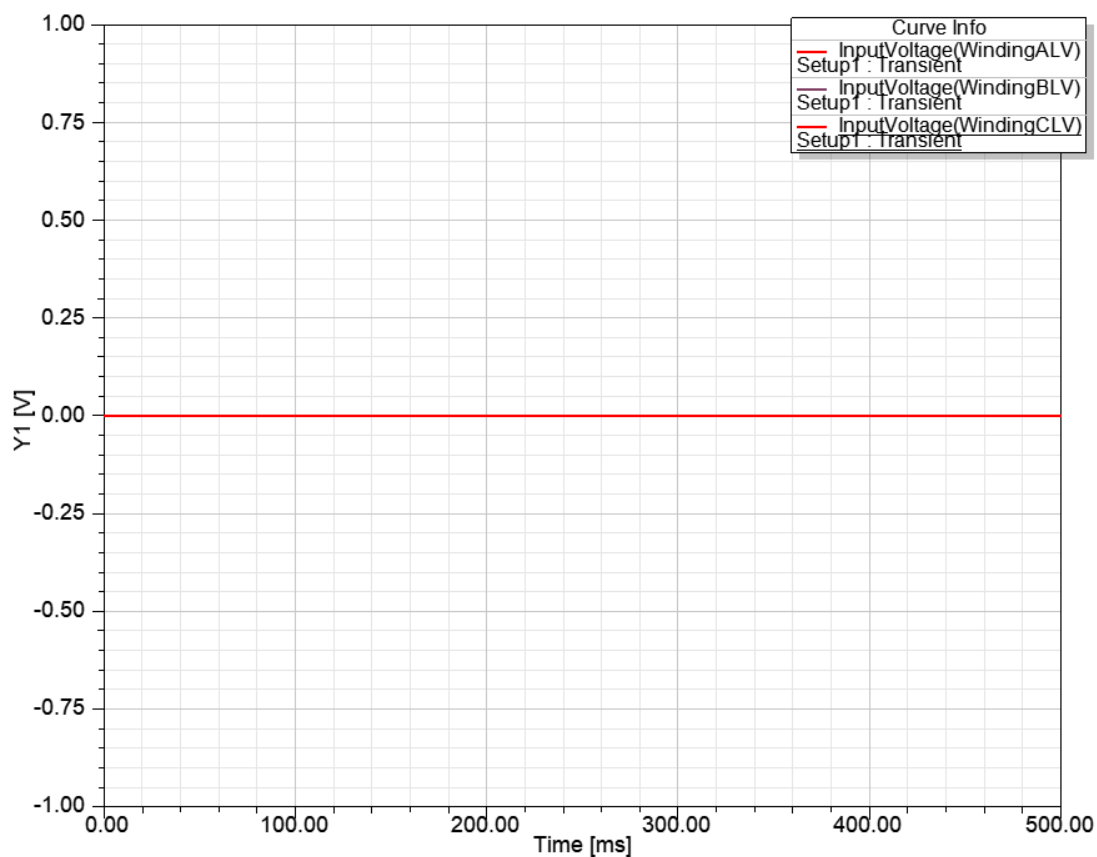


Figura 46 - Tensões no lado BT.

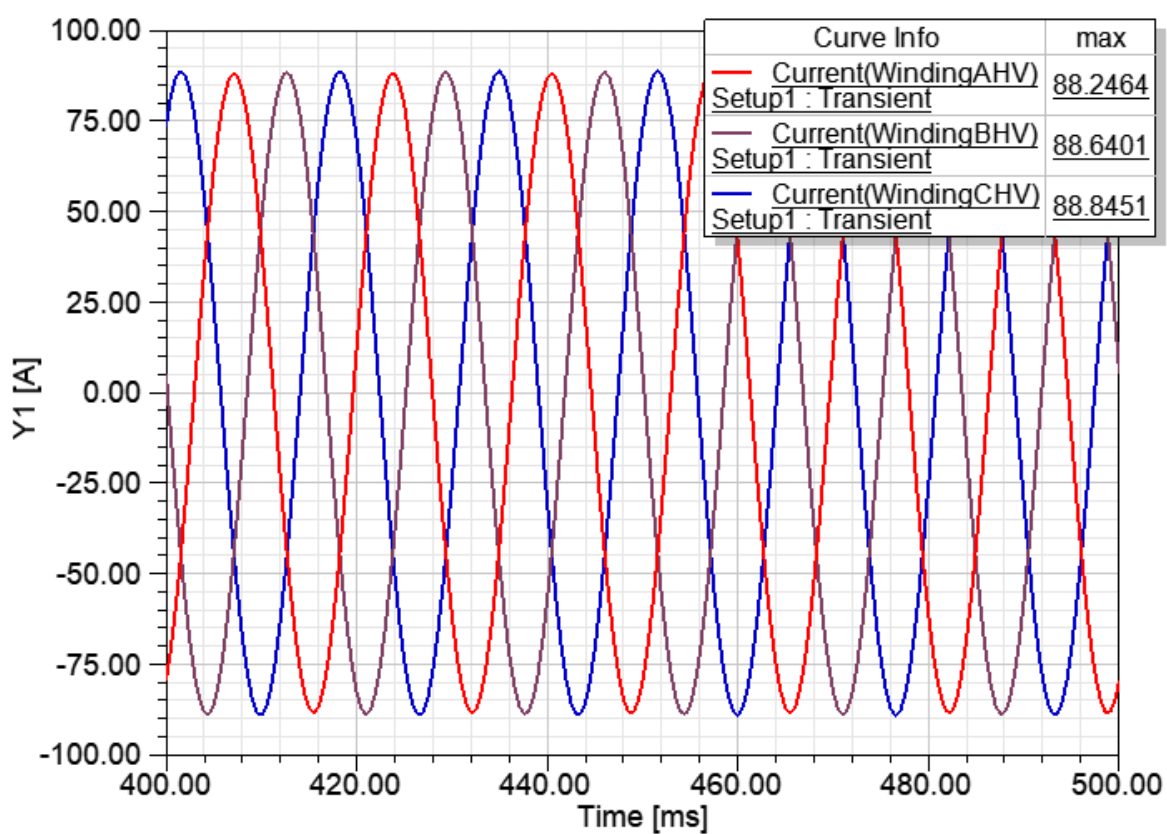


Figura 47 - Correntes no lado AT.

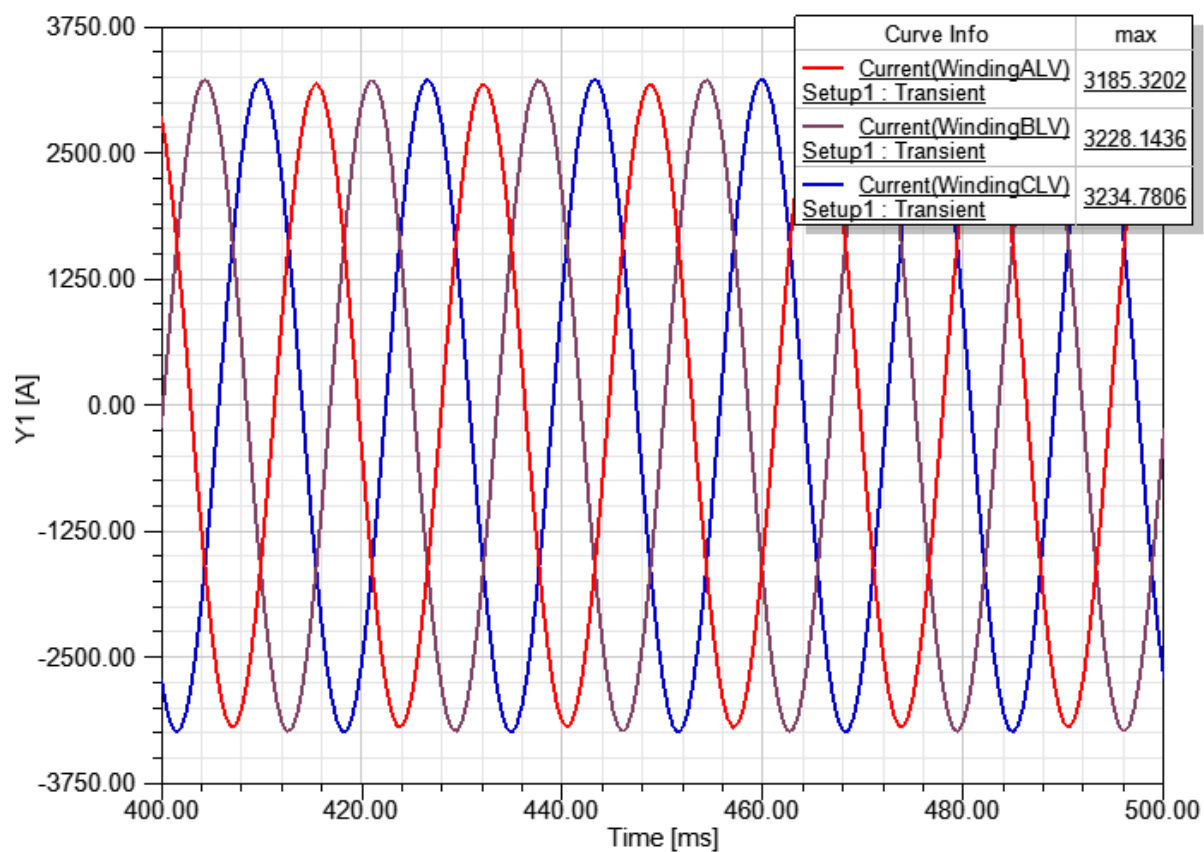


Figura 48 - Correntes no lado BT.

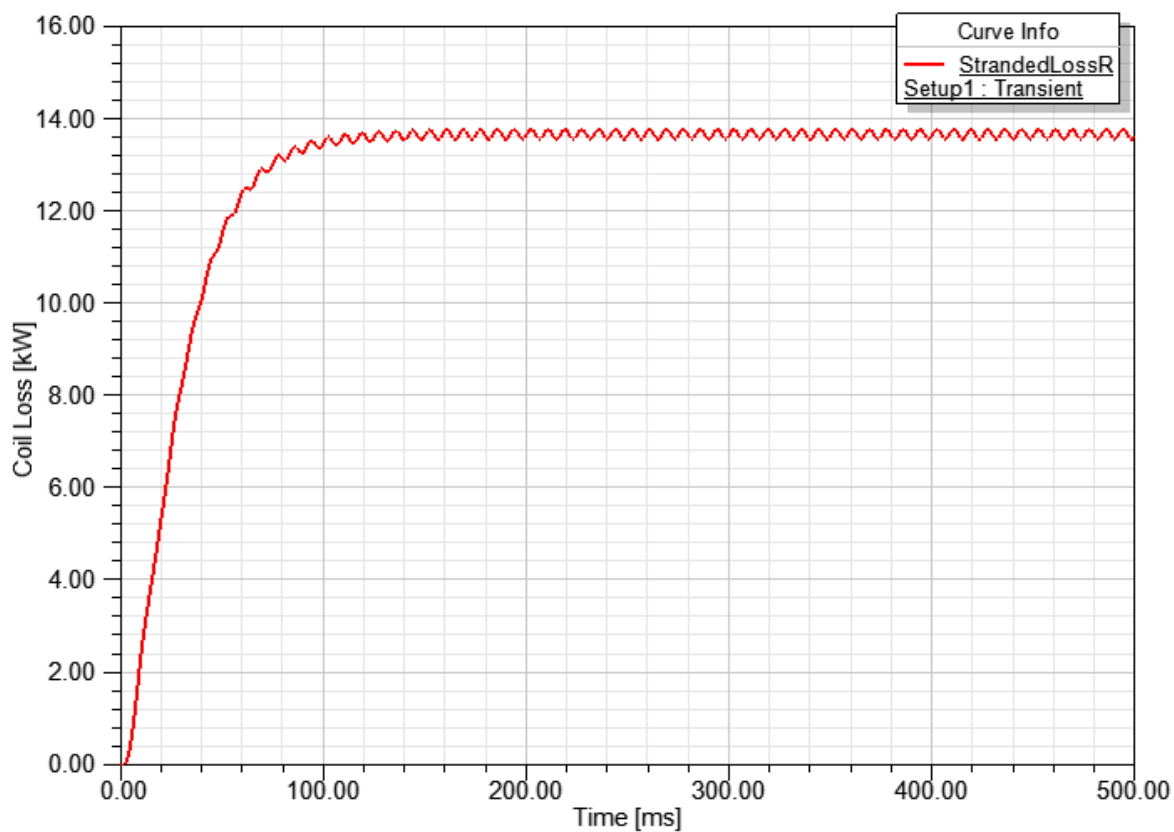


Figura 49 - Perdas nas bobinas.

A corrente de linha nominal circulante no lado BT é dada por:

$$|I_{ATL\text{Teórica}}| = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} \times |V_{ATL}|} \quad (65)$$

$$|I_{ATL\text{Teórica}}| = \frac{1500000}{\sqrt{3} \times 13800} \cong 62,76 \text{ A} \quad (66)$$

Ou seja, o valor encontrado na simulação é aproximadamente igual ao valor teórico.

Conforme visto no capítulo 2, as perdas ôhmicas P_{CC} nos condutores das bobinas são devidas ao Efeito Joule. Conforme mostra a Figura 52, tem-se:

$$P_{CC} \cong \left(\frac{14-12}{5} \times 4 \right) + 12 = 13,6 \text{ kW} \quad (67)$$

Já a tensão de fase aplicada no lado AT tem valor eficaz de 203,23 V, como mostra a Figura 50.

Assim, conforme equações (29), (30) e (31), têm-se os seguintes parâmetros por fase:

$$|Z_{CC}| = \frac{203,23}{62,64} \cong 3,24 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (68)$$

$$R_{CC} = \frac{\frac{13600}{3}}{62,64^2} \cong 1,16 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (69)$$

$$X_{CC} = \sqrt{3,24^2 - 1,16^2} \cong 3,03 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (70)$$

O valor da tensão de curto-circuito em relação à tensão nominal é dado por:

$$\frac{V_{CC\text{fase}}}{V_{F1\text{nominal}}} (\%) = \frac{203,23}{13800} \times \sqrt{3} \cong 2,55\% \quad (71)$$

O valor é inferior ao limite máximo de 6% previsto na Tabela 2.

Considerando a simetria no modelo, é possível, através das equações (32) e (33), determinar as resistências e reatâncias longitudinais dos enrolamentos primários e secundários, como mostrado abaixo:

$$X_1 = X_2 = \frac{3,03}{2} \cong 1,52 \, \Omega/\text{fase} \quad (72)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{1,16}{2} = 0,58 \, \Omega/\text{fase} \quad (73)$$

Esses valores já estão referidos ao lado AT.

Utilizando a impedância por fase do enrolamento secundário e referida a esse mesmo lado, calculada através do ensaio de curto-circuito, além de usar a corrente de excitação circulante nesse lado, é possível calcular a queda de tensão longitudinal ΔE_{BT} :

$$|\Delta E_{BT}| = \frac{|Z_{CC}|}{2a^2} \times |I_0| \quad (74)$$

$$|\Delta E_{BT}| = \frac{3,24}{2 \times 36,32^2} \times 3,84 \cong 0,01 \, \text{V} \quad (75)$$

Ou seja, a tensão induzida de linha vista no terminal primário deve ser dada por:

$$|E_1| = \left(\frac{|V_2|}{\sqrt{3}} - |\Delta E_{BT}| \right) \times a \times \sqrt{3} \quad (76)$$

$$|E_1| = \left(\frac{380}{\sqrt{3}} - 0,01 \right) \times 36,32 \times \sqrt{3} \cong 13,8 \, \text{kV} \quad (77)$$

A Figura 50 mostra as tensões induzidas de fase no lado AT no ensaio em vazio. A partir dela, tem-se:

$$|E_1| = \left| \frac{11,26}{\sqrt{2}} \times \sqrt{3} \right| \cong 13,79 \, \text{kV} \quad (78)$$

Portanto, os valores calculado e simulado foram próximos entre si. A queda de tensão na impedância de dispersão devido à corrente excitação de fato pôde ser desprezada.

A aproximação do ensaio de curto-circuito se mostrou eficiente, uma vez que, com o secundário em curto e com uma impedância de magnetização muito maior do que a de dispersão (no projeto em questão, cerca de 23260 vezes maior), a corrente no ramo transversal pôde ser desprezada. É comum, para diferentes tipos de aplicação, representar o transformador apenas como uma impedância longitudinal equivalente ou até mesmo com uma reatância indutiva longitudinal equivalente, como é o caso dos estudos de curtos-circuitos e fluxo de potência, por exemplo. No caso desse transformador, a reatância indutiva equivalente por fase representa 93,52% da impedância total longitudinal por fase.

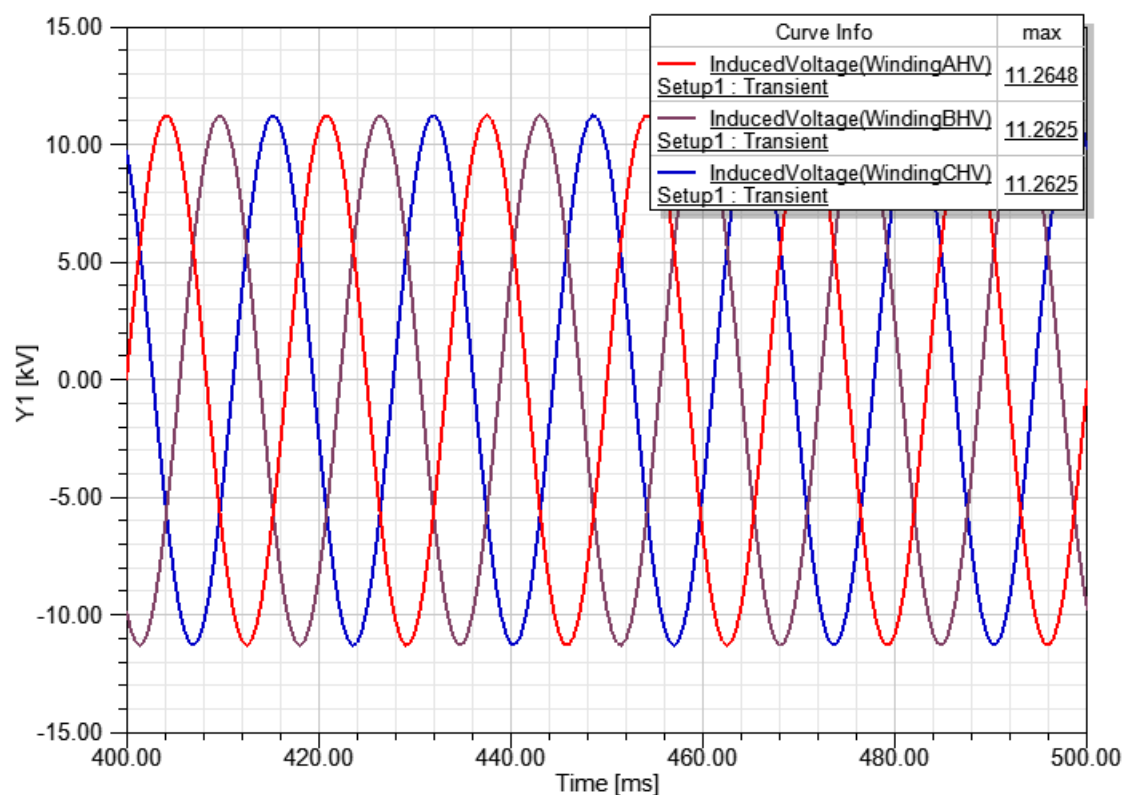


Figura 50 - Tensões de fase induzidas no lado AT.

3.6. CIRCUITO EQUIVALENTE, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO DO PROJETO BASE

Com as informações obtidas a partir das simulações e dos cálculos realizados para encontrar os parâmetros referidos ao lado AT, é possível montar o circuito equivalente mostrado na Figura 51. Para isso, foi feita a aproximação do modelo do equipamento trifásico para um banco de três transformadores monofásicos conectados em estrela e

aterrados de ambos os lados. Com isso, as indutâncias de acoplamento entre os enrolamentos não são mostradas no circuito, mas seus resultados também foram plotados no *software*, como mostram as figuras 52, 53 e 54.

As indutâncias de magnetização e de dispersão são calculadas a partir das equações (2) e (1). Assim, tem-se:

$$L_{\mu} = \frac{511640}{2 \times \pi \times 60} \cong 1,36 \text{ kH/fase} \quad (79)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1,52}{2 \times \pi \times 60} \cong 4,03 \text{ mH/fase} \quad (80)$$

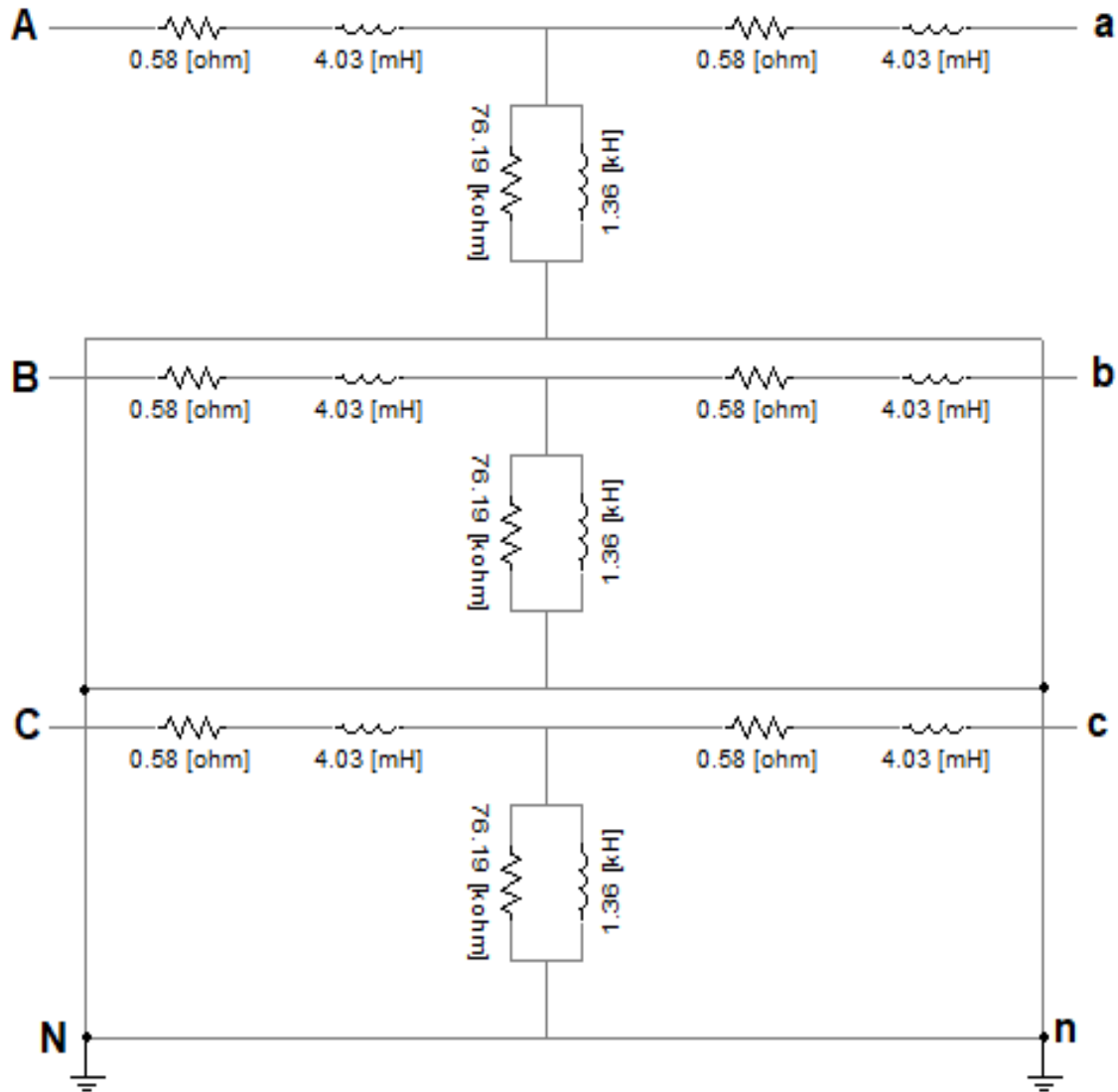


Figura 51 - Circuito equivalente do projeto base do transformador referido ao lado AT.

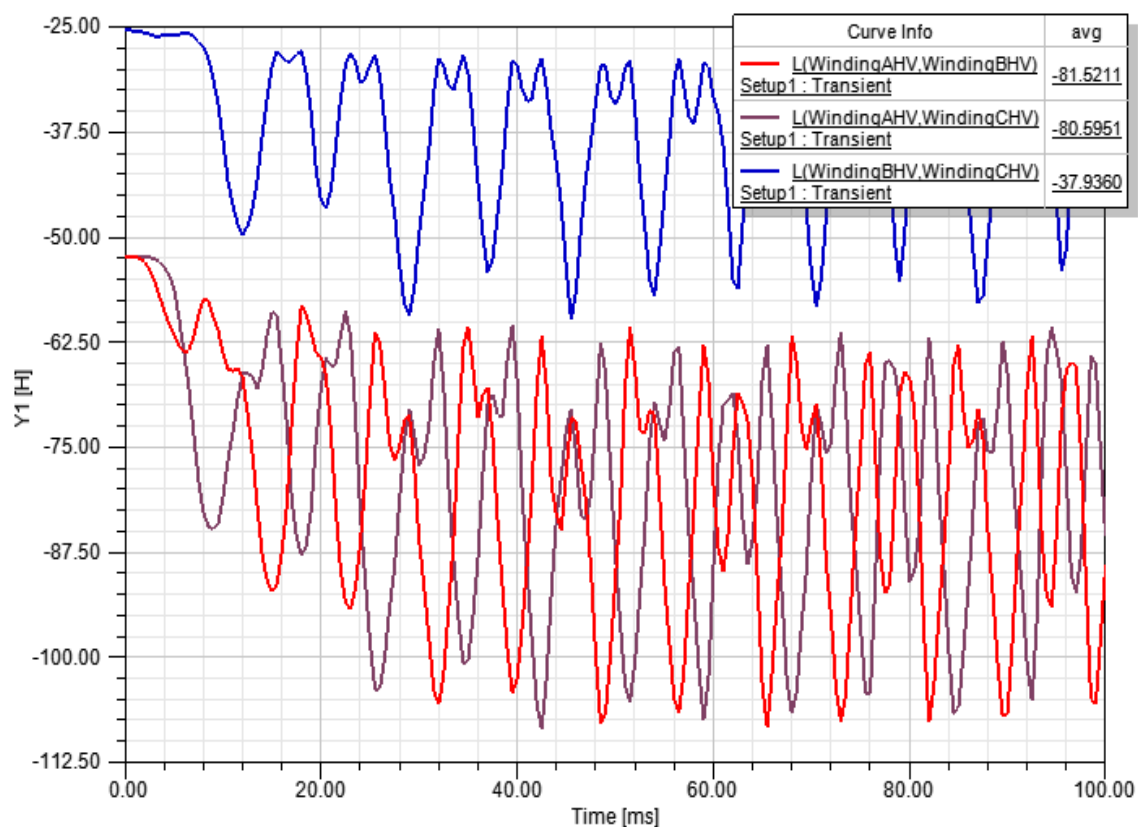


Figura 52 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT.

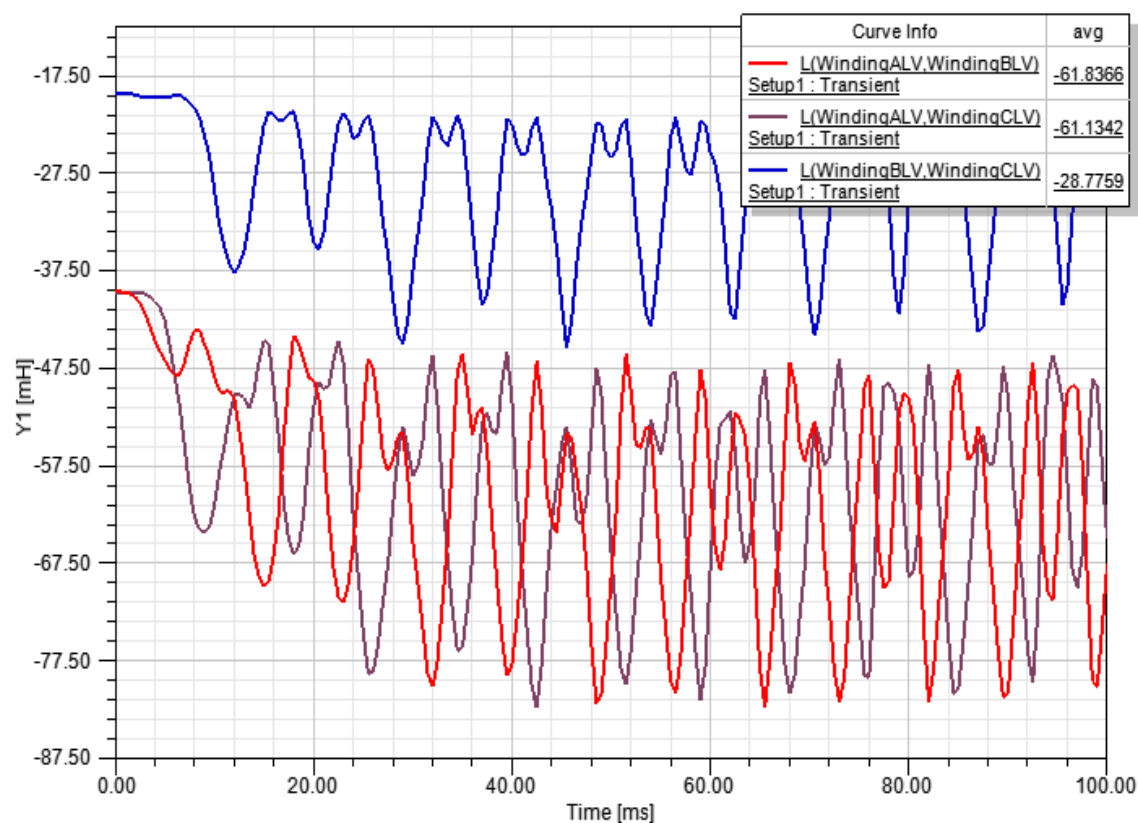


Figura 53 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da BT.

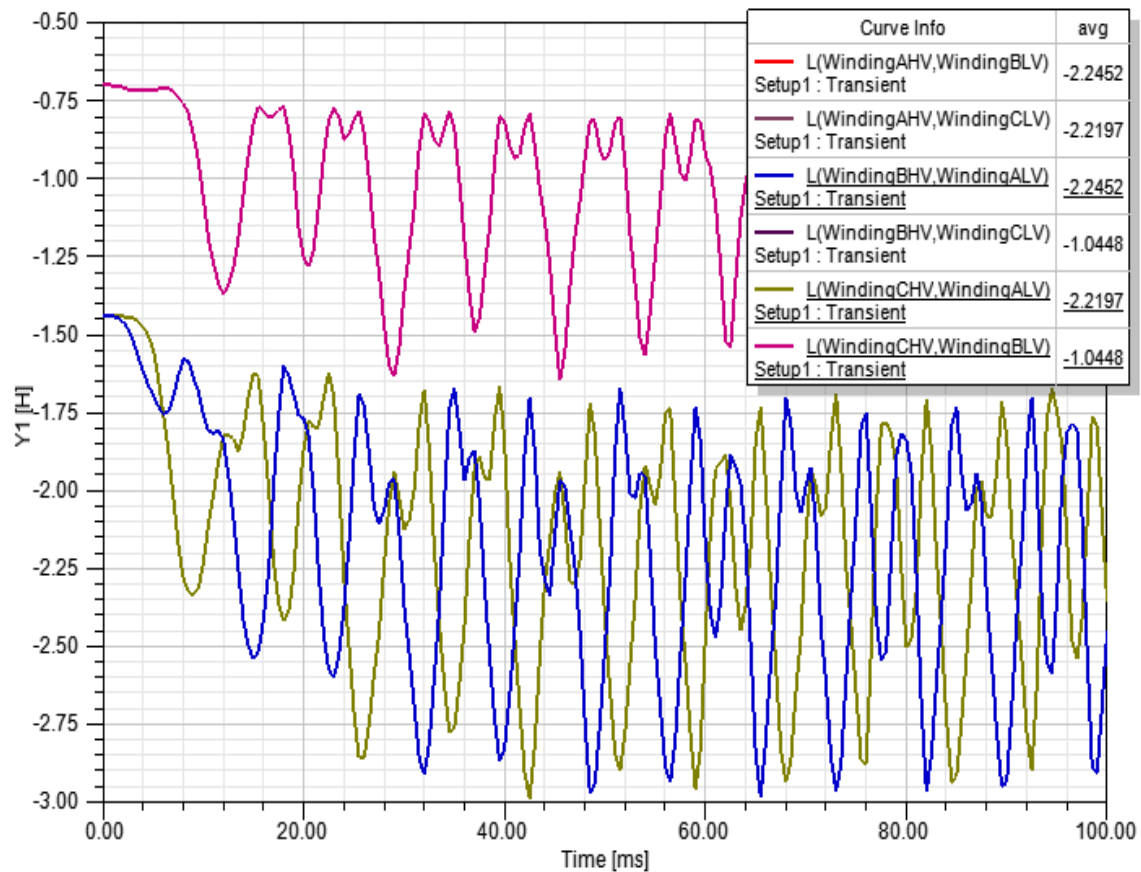


Figura 54 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT e da BT.

Já o rendimento do transformador para atendimento a um patamar de carga de 100% e fator de potência unitário, pode ser calculado através da equação (20). Desse modo, tem-se:

$$\eta(\%) = \frac{1500}{1500+13,6+2,5} \times 100 \cong 98,94\% \quad (81)$$

Para confirmar os resultados, excitou-se o primário com tensão nominal e o secundário com corrente nominal, para garantir que a potência trifásica de saída seria a potência nominal. Nesse caso, a corrente circula no sentido do secundário para o primário e a tensão nominal é aplicada nos terminais do primário. Ou seja, a tensão induzida no primário representa a tensão em vazio e a tensão terminal do primário é a tensão em plena carga. Nesse cenário, foram checadas as perdas do núcleo e nas bobinas, que apresentaram resultados iguais aos apresentados nos ensaios em vazio e de curto-circuito. A tensão de fase em vazio no lado AT pode ser observada na Figura 55.

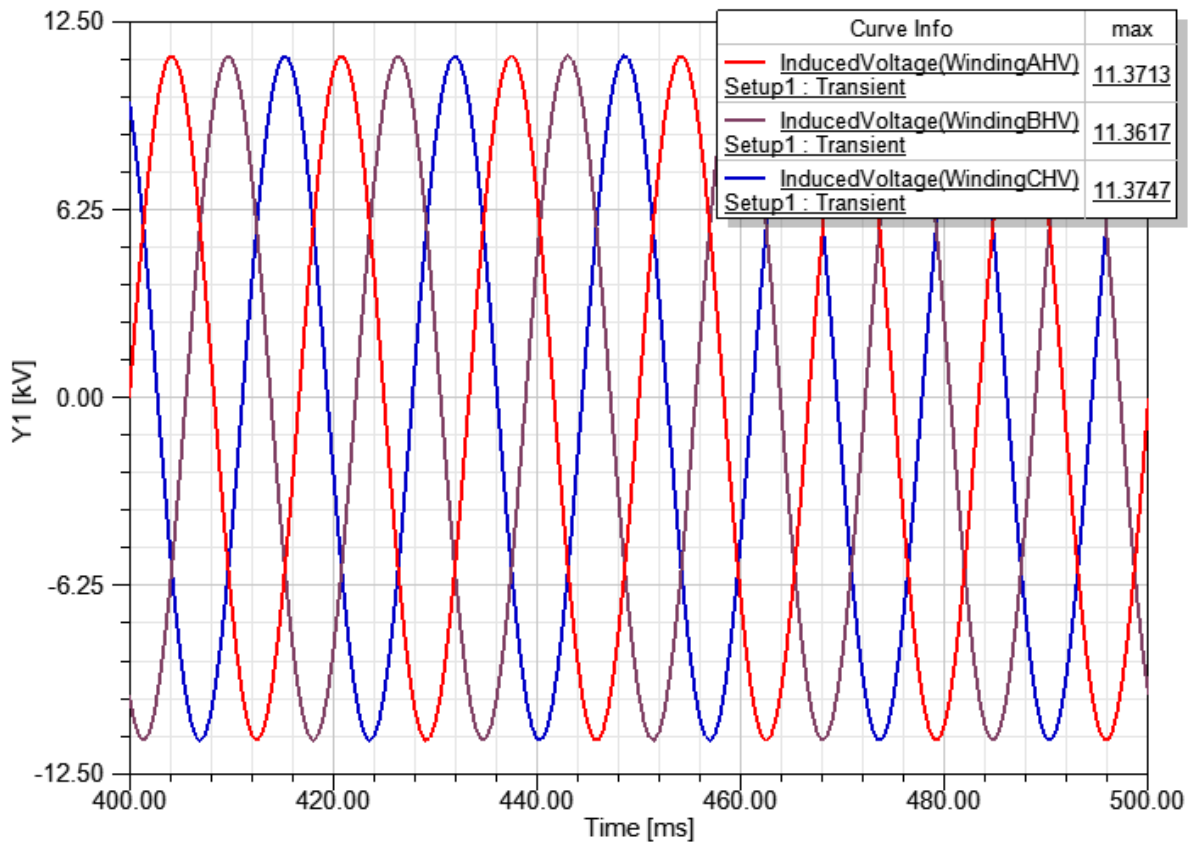


Figura 55 – Tensão de fase em vazio no lado AT.

Ou seja, a tensão de fase em vazio obtida na simulação é dada por:

$$|V_{\text{vazio}}| = \frac{(11,37+11,36+11,38) \times 10^3}{3\sqrt{2}} \cong 8039,80 \text{ V} \quad (82)$$

Pelos parâmetros obtidos através do modelo, pode-se calcular o valor da tensão de fase em vazio, com corrente nominal e fator de potência unitário da seguinte forma:

$$V_{\text{vazio}} = V_{\text{plena carga}} + (R_{\text{CC}} + j X_{\text{CC}}) \times I_{\text{ATNominal}} \quad (83)$$

$$V_{\text{vazio}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} + (1,16 + j 3,03) \times 62,76 = 8040,24 + j 190,16 \text{ V} \quad (84)$$

$$V_{\text{vazio}} = 8042,49 \angle 1,36^\circ \text{ V} \quad (85)$$

Os valores obtidos através da simulação e do cálculo analítico a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios foram muito próximos entre si.

Com esse dado, é possível calcular a regulação de tensão, conforme equação (21):

$$\text{Regulação de tensão (\%)} = \frac{8042,49 - \frac{13800}{\sqrt{3}}}{\frac{13800}{\sqrt{3}}} \times 100 \cong 0,94\% \quad (86)$$

O valor encontrado é bem baixo, o que representa uma característica positiva para o equipamento. Mesmo variando a carga de 0% à 100%, a tensão fornecida a ela praticamente permanece constante.

CAPÍTULO 4

OTIMIZAÇÃO DO PROJETO E ANÁLISE DE *PAYBACK*

Neste capítulo, é descrita a implementação da otimização das perdas no núcleo e nas bobinas, através da técnica de AGs e da mudança de material, respectivamente. São realizados para o novo projeto os mesmos procedimentos implementados para o projeto base e os resultados são comparados. Finalmente, são realizados os cálculos para o tempo de retorno de investimento no novo projeto proposto, se comparado com o projeto base.

4.1.ESCOLHA DOS PARÂMETROS A SEREM OTIMIZADOS

O transformador apresentou 13,6 kW de perdas nas bobinas e 2,5 kW de perdas no núcleo, com perdas totais de 16,1 kW. Esses valores mostram que o projeto está enquadrado na categoria de perdas C [30]. Esta categoria apresenta valores máximos de 3,6 kW de perdas em vazio e 17,6 kW de perdas totais, para uma potência de 1500 kVA. A Tabela de perdas em vazio e totais por potência nominal foi apresentada no capítulo 2.

O objetivo deste trabalho é otimizar o projeto, de forma que o equipamento passe a ser enquadrado na categoria de perdas A, que é a mais eficiente. Os limites máximos para esta categoria são de 2,64 kW de perdas em vazio e 14,65 kW de perdas totais, para uma potência de 1500 kVA.

Ao mesmo tempo, tem-se o intuito de atingir esse objetivo com o mínimo custo de fabricação da parte ativa possível. A parte ativa é constituída pelo núcleo e pelas bobinas. Para isso, foi implementada a otimização através de AGs Multiobjetivos. As funções objetivo a serem minimizadas são as de custo total de fabricação da parte ativa e as das perdas no núcleo. As perdas nas bobinas são minimizadas através da mudança de material de alumínio para cobre, mantendo os dimensionais do projeto base.

O projeto base prevê enrolamentos de alumínio, pois o coeficiente de dilatação desse material e da resina são bem próximos, o que faz com que as tensões mecânicas

ocasionadas pelo aquecimento sejam reduzidas, evitando o risco de fissuras. Além disso, a moldagem da resina no enrolamento AT é realizada a vácuo, com velocidade e temperatura sob controle, impedindo a formação de bolhas de ar, que são responsáveis pela ocorrência de descargas parciais. Essa ionização deteriora, a médio e longo prazos, a isolamento da bobina e a vida útil do equipamento.

A mudança para o cobre, na prática, exigiria cuidados adicionais, como a utilização de uma outra resina, que tivesse um coeficiente de dilatação próximo desse novo material, por exemplo. Além disso, o foco deste trabalho não é realizar um estudo de descargas parciais. De qualquer forma, a norma apresenta uma tolerância de 10 pC de descargas parciais admissíveis [30]. Ou seja, nesse contexto, é permitida a troca de material das bobinas de alumínio para cobre.

4.2.A OTIMIZAÇÃO

O fluxograma de AGs utilizados pode ser observado na Figura 56.

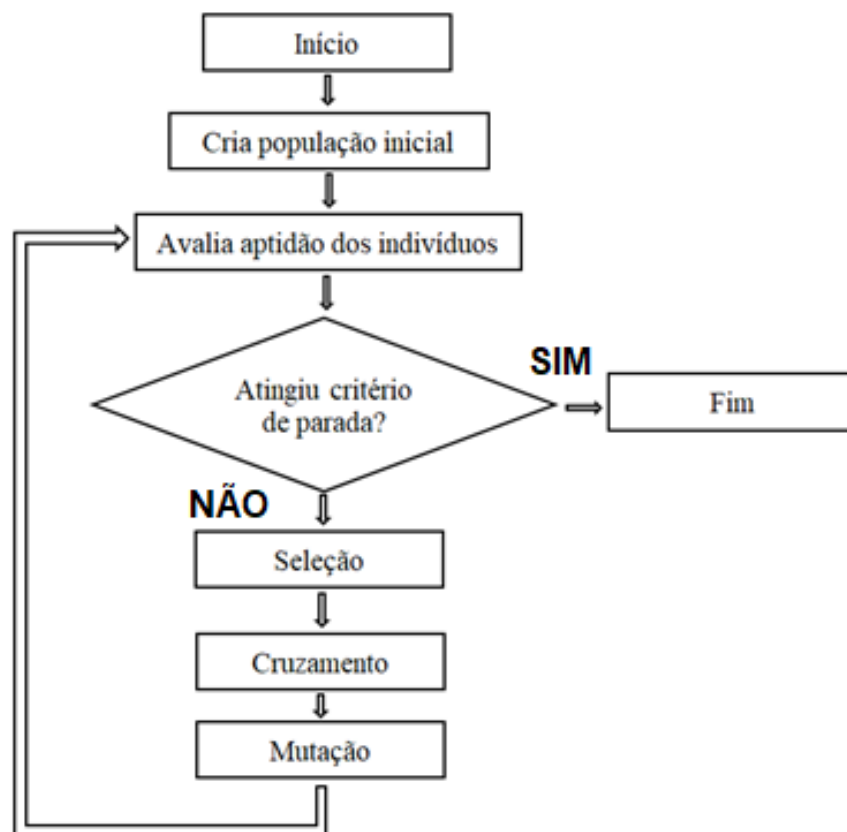


Figura 56 - Fluxograma dos AGs.

O objetivo é reduzir as perdas no núcleo, através da redução de seu volume (e consequentemente de sua massa), e reduzir as perdas nas bobinas, substituindo o material utilizado de alumínio por cobre. As alterações nas dimensões do núcleo e no material das bobinas devem levar o transformador para a categoria de eficiência A da norma [30], ao mínimo custo de fabricação possível.

O processo foi implementado através da interface *Optimization Toolbox* do Matlab. A definição das variáveis pode ser observada na Tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis do problema de otimização.

x_1	Área frontal do núcleo, em m^2
x_2	Profundidade do núcleo, em m

A Função Objetivo de Custo (FOC) para a fabricação da parte ativa do transformador é dada em uma parcela pelo custo dos materiais das bobinas e do núcleo somada a outra que relaciona o próprio custo dos materiais com a mão de obra de montagem, através de um fator de correção de custo:

$$\begin{aligned}
 FOC = & \left((\text{Fator de empilhamento} \times \text{Área frontal do núcleo} \times \right. \\
 & \text{Profundidade do núcleo} \times \text{Densidade do Aço Silício de Grão Orientado} \times \\
 & \text{Preço do Aço Silício de Grão Orientado/kg}) + (3 \times \\
 & \text{Área da base da bobina BT} \times \text{Altura da bobina BT} \times \\
 & \text{Densidade do material da bobina BT} \times \text{Preço do material da bobina BT/} \\
 & \text{kg}) + (3 \times \text{Área da base da bobina AT} \times \text{Altura da bobina AT} \times \\
 & \text{Densidade do material da bobina AT} \times \text{Preço do material da bobina AT/} \\
 & \left. \text{kg}) \right) \times (1 + \text{Fator de correção de custo}^2)
 \end{aligned} \tag{87}$$

O volume do núcleo é encontrado pelo produto da profundidade com a área frontal. A área frontal, por sua vez, é encontrada através da subtração da área externa com a soma das áreas das duas janelas. As áreas são encontradas através do produto entre base e altura. Para efeitos de cálculo analítico, considera-se a área aproximada a partir do modelo 2D, que é um corte no plano xy em z igual a 0, onde fica localizada a camada de maior dimensão em x e em y. Já para a profundidade, considera-se a distância entre as quinas

das camadas mais extremas ao longo do eixo z. Dessa forma, a partir da Tabela 5, tem-se:

$$\text{Área externa} \cong 1,53 \times 1,58 \cong 2,42 \text{ m}^2 \quad (88)$$

$$\text{Área janela 1} = \text{Área janela 2} \cong 1,14 \times 0,44 \cong 0,50 \text{ m}^2 \quad (89)$$

$$\begin{aligned} \text{Área frontal} &= \text{Área externa} - (\text{Área janela 1} + \text{Área janela 2}) = 2,42 - \\ &2 \times 0,50 = 1,42 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (90)$$

$$\text{Volume} = \text{Área frontal} \times \text{Profundidade} \cong 1,42 \times 0,22 \cong 0,31 \text{ m}^3 \quad (91)$$

De acordo com Allegheny Technologies Incorporated [33], o fator de empilhamento das lâminas de Aço Silício de Grão Orientado com espessura de 0,27 mm é de 0,965, com uma densidade de 7650 kg/m³.

Para encontrar a massa do núcleo, basta multiplicar a densidade do material pelo volume e pelo fator de empilhamento. Logo:

$$\begin{aligned} \text{Massa} &= \text{Densidade} \times \text{Volume} \times \text{Fator de empilhamento} \cong 7650 \times 2,2046 \times \\ &0,31 \times 0,965 \cong 5045,22 \text{ lb} \end{aligned} \quad (92)$$

Considerando as bobinas inteiramente ocupadas por material condutor e sem camadas isolantes, o volume delas pode ser encontrado através da multiplicação entre a área da base e a altura delas. A área da base é calculada pela fórmula da área da coroa circular, ou seja, produto entre π e a diferença entre os quadrados do raio externo e do raio interno. Como são 3 bobinas BT e 3 AT, os respectivos volumes BT e AT devem ser multiplicados por 3 e depois somados entre si, de forma a encontrar o volume total das bobinas.

O fator de correção de custo está ligado ao processo de fabricação. Existe um custo fixo referente aos salários da equipe de montagem de, aproximadamente, 7 profissionais, e que neste caso, foi estimado no valor de US\$ 7.000,00. Com isso, quando uma quantidade menor de material é utilizada, entende-se que os funcionários da equipe apresentam mais horas ociosas, ou seja, horas paradas sem trabalhar, uma vez que montarão mais rápido

os transformadores da linha de produção. Além disso, quando são utilizados materiais mais baratos na montagem, tem-se o entendimento de que o valor de entrada de pedido na venda também será menor, “valendo menos a pena” fabricar esse transformador do que um outro que utilize materiais mais caros e que serão potenciais alavancadores do montante de entrada de pedidos, que é um fundamental *KPI - Key Performance Indicator* para qualquer setor de vendas. Ou seja, no primeiro cenário, o custo deve subir para cobrir as horas ociosas da equipe de montagem, e no segundo cenário, ele sobe, pois seria fabricado sob demanda específica, e não de forma seriada.

Com isso, foi estimado um fator de correção dado pela seguinte expressão, que provoca este efeito:

$$\text{Fator de correção de custo} = \frac{7000}{(\text{Fator de empilhamento} \times \$/\text{kg} \times \text{Densidade} \times \text{Volume})_{\text{Núcleo}} + (\$/\text{kg} \times \text{Densidade} \times \text{Volume})_{\text{Bobinas}}} \quad (93)$$

Isto é, quanto maior for a quantidade de material (massa) e/ou quanto mais caro for o material utilizado na fabricação, mais o custo fixo fica diluído na montagem, o que representa uma queda no custo total. Entretanto, ao mesmo tempo que barateia esse custo por um lado, quanto mais material utilizado e/ou quanto mais caro ele for, o custo total, por outro lado, também cresce, como mostra a equação (87).

Este fator será, via de regra, menor do que 1, visto que os materiais custarão mais do que US\$ 7.000,00. Assim, para reduzir a influência dessa parcela na função objetivo de custo e para evitar que a diferença entre os preços obtidos na função com e sem o fator de correção seja sempre de US\$ 7.000,00 para qualquer custo de material, optou-se por considerar o quadrado do seu valor na fórmula.

Como visto anteriormente, foi considerado um fator de empilhamento de 0,965 para as lâminas de Aço Silício de Grão Orientado com espessura de 0,27 mm e densidade de 7650 kg/m³ [33]. Seu preço considerado foi de US\$ 2,50/kg [35].

Já a densidade do alumínio é de 2700 kg/m³ [36]. Seu preço considerado foi de US\$ 3,06/kg [37].

O preço é expresso em dólar americano, pelos materiais se tratarem de *commodities* internacionais, e em valor líquido, ou seja, sem impostos, uma vez que essas taxas variam de acordo com o local onde esses produtos são comercializados. Dessa forma, para o projeto base, tem-se o seguinte custo:

$$\begin{aligned} \text{Custo de fabricação do projeto base} = & ((0,965 \times 1,42 \times 0,216 \times 7650 \times 2,5) + \\ & (3 \times \pi \times (0,202^2 - 0,12^2) \times 0,87 \times 2700 \times 3,06) + (3 \times \pi \times (0,29^2 - \\ & 0,209^2) \times 0,87 \times 2700 \times 3,06)) \times \left(1 + \left(\frac{7000}{10187,62}\right)^2\right) \cong \text{US\$ } 14.997,37 \end{aligned} \quad (94)$$

A densidade do cobre é de 8960 kg/m³ [38]. Seu preço considerado foi de US\$ 9,79/kg [39].

Assim, o novo projeto, considerando o cobre no material das bobinas ao invés do alumínio, possui as seguintes funções objetivo a serem minimizadas:

$$\begin{aligned} \text{FOC} = & ((0,965 \times x_1 \times x_2 \times 7650 \times 2,5) + (3 \times \pi \times (0,202^2 - \\ & 0,12^2) \times 0,87 \times 8960 \times 9,79) + (3 \times \pi \times (0,29^2 - 0,209^2) \times 0,87 \times \\ & 8960 \times 9,79)) \times (1 + \text{Fator de correção de custo}^2) \end{aligned} \quad (95)$$

onde:

$$\begin{aligned} \text{Fator de correção de custo} = & \frac{7000}{((0,965 \times x_1 \times x_2 \times 7650 \times 2,5) + (3 \times \pi \times (0,202^2 - 0,12^2) \times 0,87 \times 8960 \times 9,79) + (3 \times \pi \times (0,29^2 - 0,209^2) \times 0,87 \times 8960 \times 9,79))} \end{aligned} \quad (96)$$

A Função Objetivo de Perdas no Núcleo (FOPN) em W é expressa pela Equação de Bertotti vista em (12) e abaixo. Como citato anteriormente, o programa de M.E.F. utilizado considera esta relação para gerar os resultados de perda no núcleo e por isso ela foi utilizada.

$$\begin{aligned}
FOPN = 0,965 \times x_1 \times x_2 \times 16865.36 \times & \left(\left(0,00237745 \times \left(\frac{380}{4,44 \times 60 \times x_2^2 \times 26} \right)^2 \times \right. \right. \\
& 60 \Big) + \left(3,55828 \times 10^{-5} \times \left(\left(\frac{380}{4,44 \times 60 \times x_2^2 \times 26} \right) \times 60 \right)^2 \right) + \left(0 \times \right. \\
& \left. \left. \left(\left(\frac{380}{4,44 \times 60 \times x_2^2 \times 26} \right) \times 60 \right)^{1,5} \right) \right) \quad (97)
\end{aligned}$$

As condições de contorno consideradas foram as seguintes:

$$1,32 \leq x_1 \leq 1,52 \quad (98)$$

$$0,18 \leq x_2 \leq 0,22 \quad (99)$$

Essas faixas foram escolhidas, pois o intuito era escolher uma região de valores com limites superiores e inferiores próximos às dimensões utilizadas no projeto base, uma vez que essa já é uma solução consolidada. Outros intervalos poderiam ter sido propostos para se alcançarem reduções mais significativas de volume, mas sob pena do novo projeto ficar muito distante do projeto de referência, podendo se tornar inexecutável na prática e afetando outros parâmetros não analisados nesse trabalho. Não é necessário promover mudanças bruscas no *design* para se conseguir uma otimização satisfatória de projeto.

O processo foi parametrizado com população de 100 indivíduos. A seleção foi feita através de torneios realizados entre 2 indivíduos escolhidos aleatoriamente na população. O vencedor de cada torneio (indivíduo mais apto) é selecionado para o cruzamento.

Na reprodução, foi considerada a probabilidade de 70% dos indivíduos selecionados se cruzarem, através da recombinação em um único ponto, gerando novos indivíduos (filhos).

O tipo de mutação escolhida foi a adaptativa, isto é, é calculado o valor de aptidão de cada indivíduo e comparado com o valor médio da função de avaliação da população: se

o primeiro for menor do que o segundo, então a solução é considerada de baixa qualidade, e portanto, a taxa de mutação deve ser mantida alta, para tentar produzir indivíduos aptos. Se o cenário for o inverso, a solução passa a ser considerada de alta qualidade e a taxa de mutação deve ser mantida baixa, para evitar a interrupção na geração de indivíduos aptos. Se uma taxa de mutação constante fosse considerada e aplicada igualmente a todos os indivíduos, isso poderia beneficiar a geração de indivíduos inaptos e prejudicar o surgimento de indivíduos aptos.

O critério de parada escolhido foi de, no máximo, 1600 gerações, ou a solução estar dentro de uma tolerância de 0,0001.

Os resultados encontrados para as funções objetivo de custo e perdas no núcleo, bem como para os parâmetros dimensionais construtivos obtidos, podem ser observados na Tabela 7.

Já os gráficos do processo de otimização podem ser observados nas Figuras 57, 58, 59, 60 e 61.

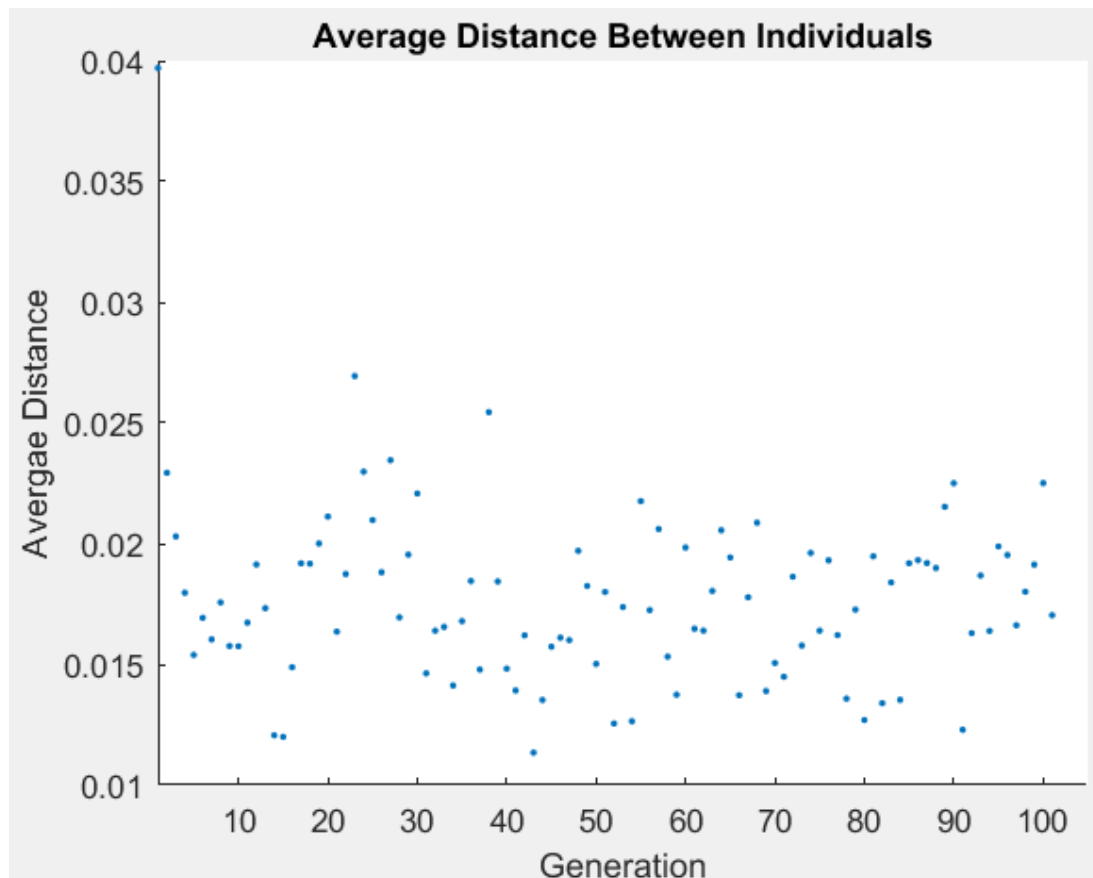


Figura 57 - Distância média entre os indivíduos através das gerações.

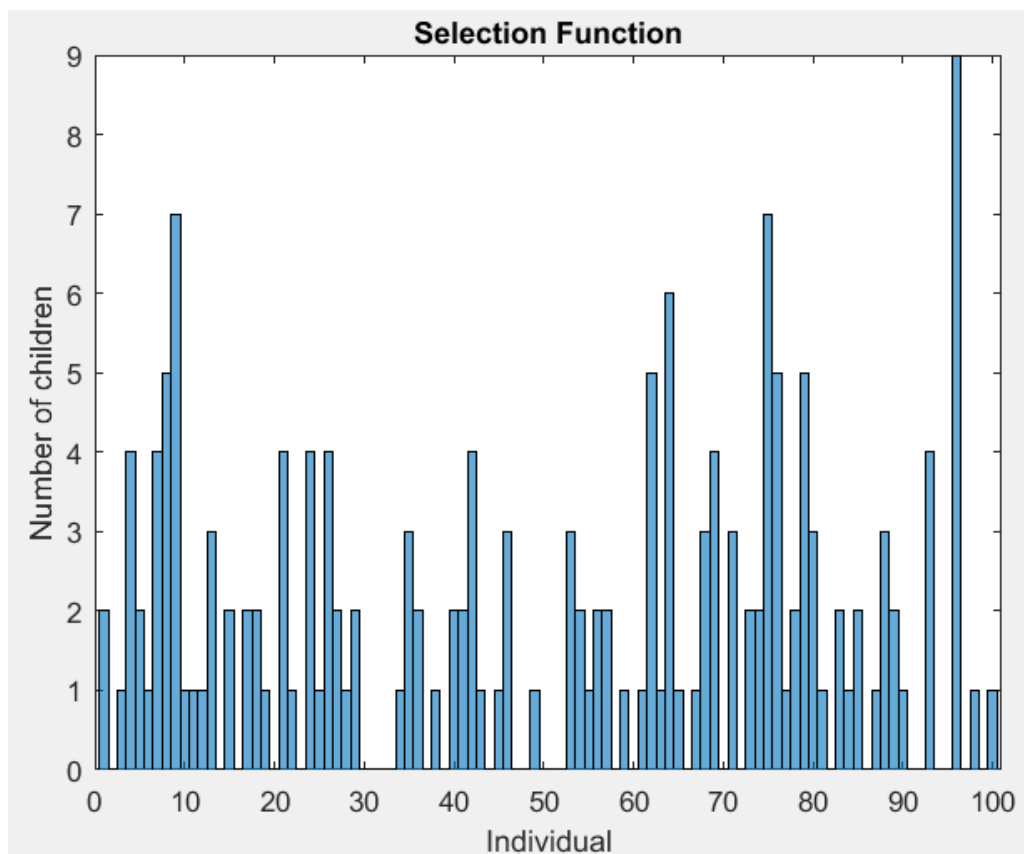


Figura 58 - Filhos dos cruzamentos dos indivíduos.

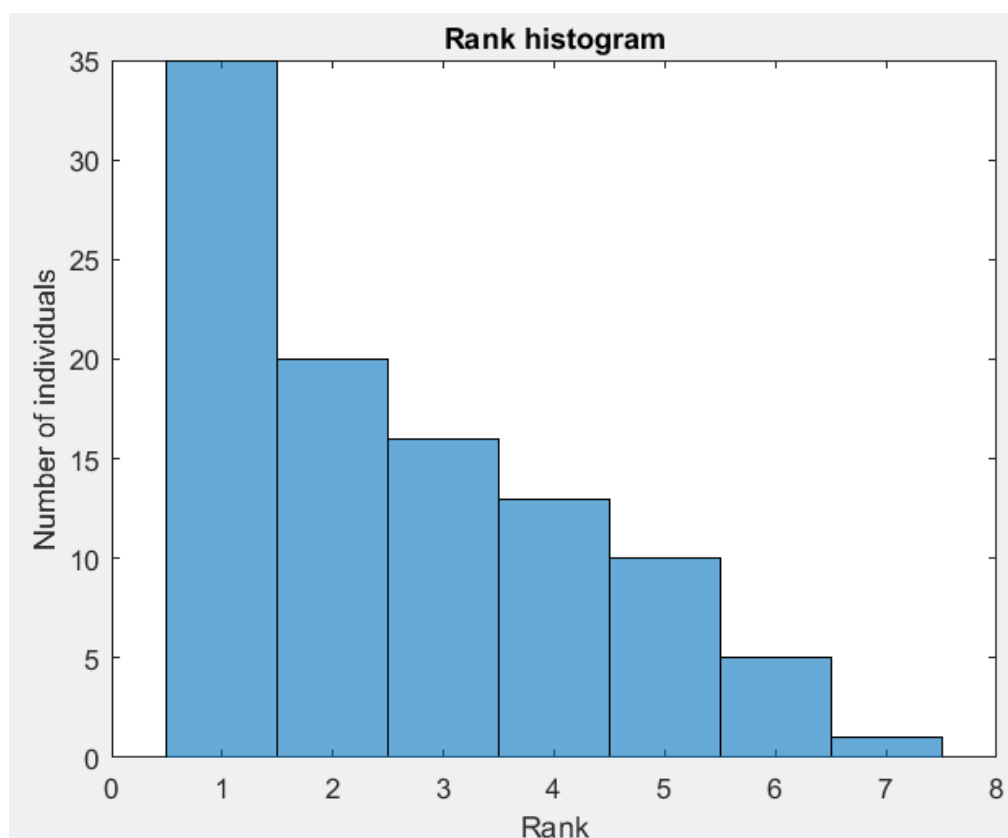


Figura 59 - Histograma de classificação.

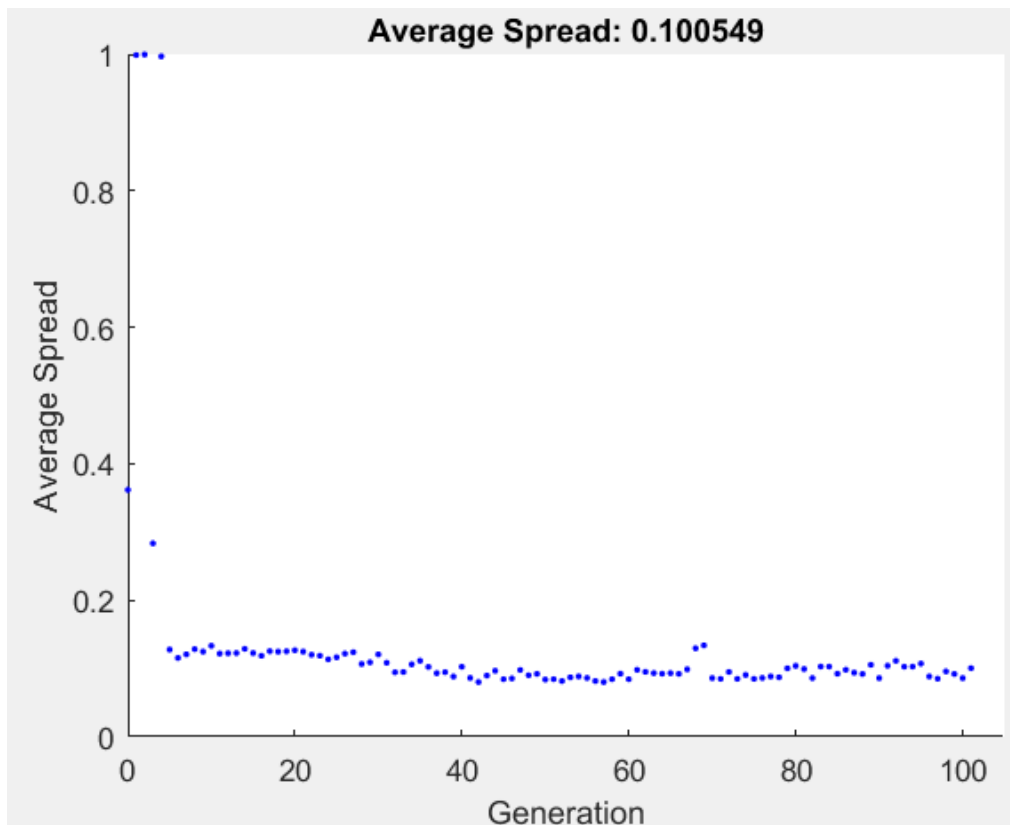


Figura 60 - Espalhamento médio x iterações.

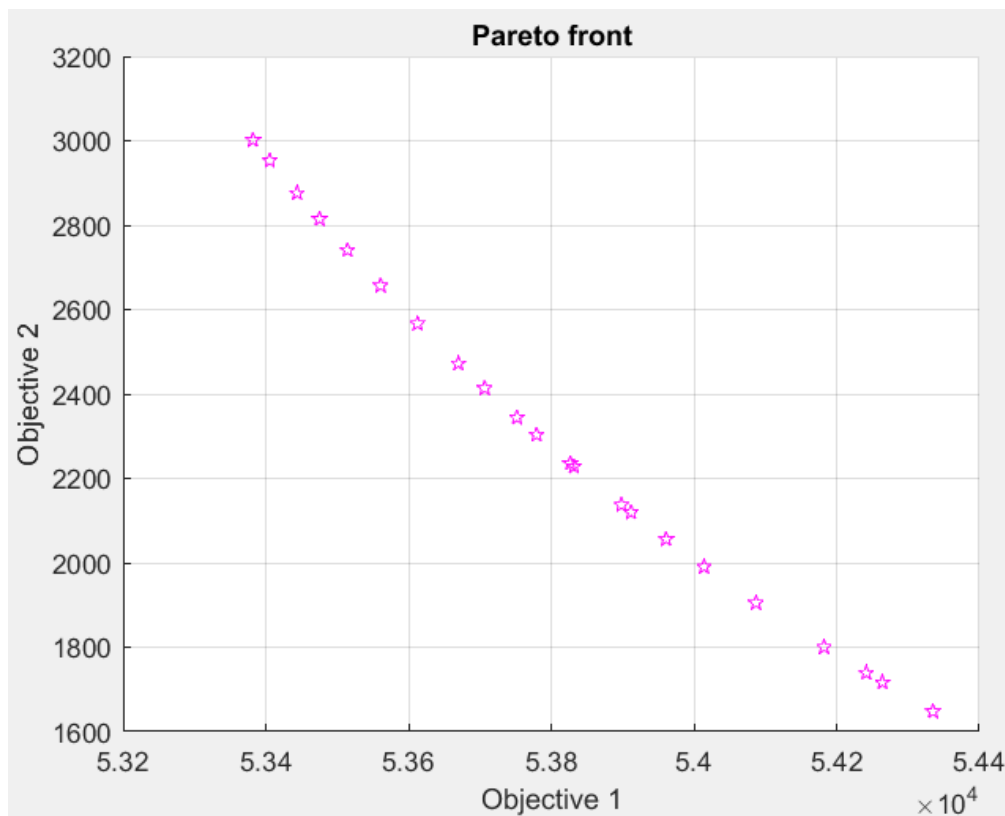


Figura 61 - Fronteira de Pareto (*Objective 1* - Perdas no Núcleo; *Objective 2* - Custo do Equipamento).

Tabela 7 - Resultados do novo projeto do transformador.

Função Objetivo	Valor
Custo Fabricação do Projeto (US\$)	53.831,79
Perdas Núcleo (W)	2.228,26
Parâmetro Construtivo	Valor
Área do núcleo (m ²)	1,32
Profundidade do núcleo (m)	0,20

Como é possível observar na Figura 57, nas primeiras gerações (iterações), a distância média (desvio padrão) entre os indivíduos das populações era um pouco maior, chegando a 4,0%. Essa taxa vai caindo e oscila ao longo das gerações, e quando chega na 102^a, que representa a última iteração, essa diversidade entre os indivíduos já fica próxima dos 2,0%, sem muitas diferenças significativas entre as soluções possíveis produzidas, apontando para a convergência.

Já a Figura 58 mostra a quantidade de filhos que foram gerados por cada indivíduo da população da última geração. Os filhos são oriundos dos cruzamentos entre os indivíduos da população da geração anterior. Alguns deles passaram também pelo processo de mutação, conforme explicado anteriormente.

A Figura 59 mostra o histograma de classificação da última iteração. Os indivíduos de classificação “1” representam as soluções ótimas e formam a Fronteira de Pareto. Nesse caso, foram 35 soluções ótimas. Os indivíduos de classificação “2” são soluções possíveis para o problema e melhores que os indivíduos de classificação “3”, mas não são melhores que os indivíduos de classificação “1”. A mesma lógica vale para as demais classificações.

A Figura 60 representa o espalhamento médio entre as soluções que formam a Fronteira de Pareto. Essa dispersão é pequena quando os valores finais das funções objetivo não mudam muito entre as iterações, ou seja, quando os pontos da Fronteira de Pareto são distribuídos uniformemente. O resultado encontrado foi de 10,06%, o que indica uma distribuição uniforme ao longo da Fronteira.

Por fim, a Figura 61 mostra a Fronteira de Pareto. Ela é composta pelas 35 soluções ótimas do problema, ou seja, quando não é possível melhorar o resultado de uma função

objetivo sem piorar o resultado da outra função objetivo e vice-versa. No cenário do problema, o eixo x representa a FOC e o eixo y representa a FOPN.

Como qualquer um dos pontos da Fronteira de Pareto é uma solução ótima possível, optou-se por escolher uma solução mediana nas perdas no núcleo e no custo. Isso porque, a diferença entre a solução de maior e a de menor perda é de 1,35 kW, sendo a diferença de custo de US\$ 953,17. Ou seja, uma solução intermediária minimiza os efeitos do aumento de custo e reduz o impacto inicial ao *budget* do cliente, ao mesmo tempo que o proporciona e o permite verificar que ele está adquirindo um equipamento tecnicamente superior ao do projeto base, no que se refere às perdas no ferro, nesse caso.

Com uma área esperada menor para a seção reta no núcleo, a densidade de fluxo seria maior, caso o número de espiras não fosse aumentado. Por isso, escolheu-se elevar para 26 um dos termos do denominador de $B_{\max}$, conforme mostra a equação (94), e manter o ponto de operação de $B_{\max}$ em torno de 1,4 T, como no caso do projeto base. Para isso, dentre as soluções obtidas na otimização, foi escolhida a que indicava a profundidade do núcleo de 0,20 m. Uma densidade de fluxo maior levaria a uma operação próxima da região de saturação. Já uma densidade de fluxo menor não forneceria a máxima condição de perdas no núcleo, dentro da região linear. Além disso, como visto, esse ponto de operação de 1,4 T representava o ponto médio na Fronteira de Pareto entre aumento de custo e diminuição de perdas.

4.3.NOVO PROJETO PÓS-OTIMIZAÇÃO

Com os novos dados dimensionais obtidos através do algoritmo e a substituição do material das bobinas de alumínio por cobre (representado em laranja), foi possível chegar ao novo projeto otimizado, conforme mostram as Figuras 62 e 63.

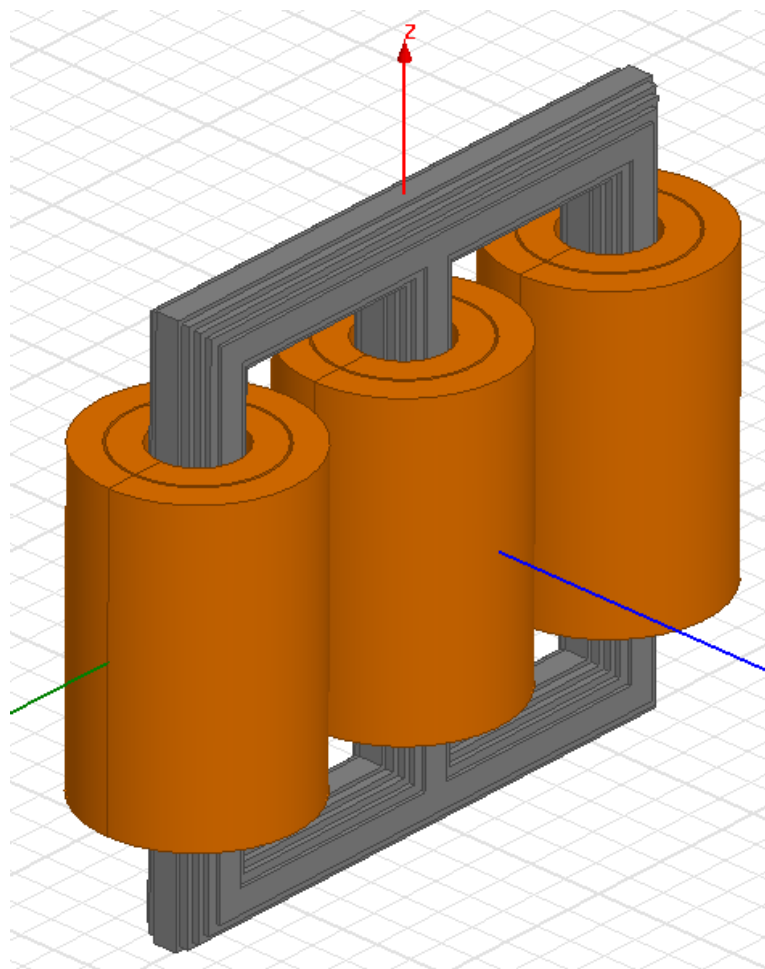


Figura 62 - Projeto do novo transformador – 3D.

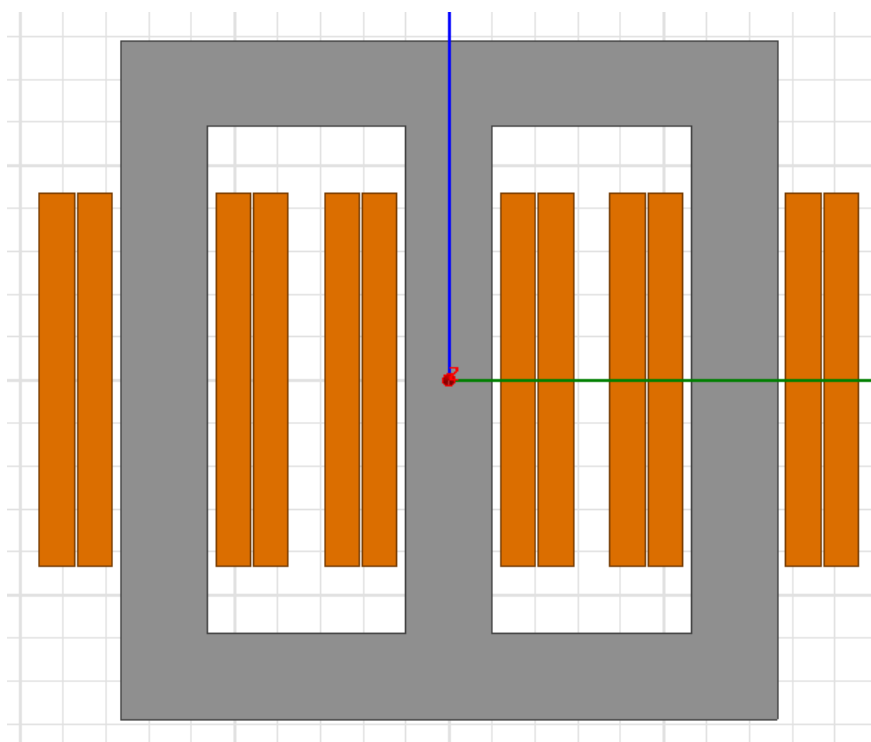


Figura 63 - Vista frontal 2D do novo transformador.

Tabela 8 - Comparativo volumétrico de material entre projetos.

Projeto Base - Núcleo Ferromagnético		
Dimensional externo	Base (m)	1,53
	Altura (m)	1,58
	Área (m ²)	2,42
Dimensional das janelas	Base (m)	0,44
	Altura (m)	1,14
	Área (m ²)	1,00
Seção transversal das pernas	Profundidade (m)	0,22
Total	Área (m ²)	1,42
	Volume (m ³)	0,31
Projeto Otimizado - Núcleo Ferromagnético		
Dimensional externo	Base (m)	1,53
	Altura (m)	1,58
	Área (m ²)	2,42
Dimensional das janelas	Base (m)	0,47
	Altura (m)	1,18
	Área (m ²)	1,10
Seção transversal das pernas	Profundidade (m)	0,20
Total	Área (m ²)	1,32
	Volume (m ³)	0,26
Comparativo - Projeto Núcleo		
Projeto base	Volume (m ³)	0,31
Projeto otimizado		0,26
Diferença	%	-16,13%
Projeto Base = Projeto Otimizado - Bobinas		
Base bobina BT	Área (m ²)	0,08
Altura bobina BT	Altura (m)	0,87
Volume bobina BT (m ³)	Volume (m ³)	0,21
Base bobina AT	Área (m ²)	0,13
Altura bobina AT	Altura (m)	0,87
Volume bobina AT (m ³)	Volume (m ³)	0,34
Total	Volume (m ³)	0,55

Assim, é possível fazer um comparativo entre os volumes das partes ativas de ambos os projetos. O volume total da parte ativa é dado pela soma entre o volume total das bobinas e o volume do núcleo. A Tabela 8 mostra essa comparação volumétrica entre o projeto base o projeto otimizado.

O novo volume do núcleo é dado por:

$$\text{Área externa} \cong 1,53 \times 1,58 \cong 2,42 \text{ m}^2 \quad (100)$$

$$\text{Área janelas} \cong 2 \times 1,18 \times 0,465 \cong 1,10 \text{ m}^2 \quad (101)$$

$$\text{Área frontal} = 2,42 - 1,10 = 1,32 \text{ m}^2 \quad (102)$$

$$\text{Volume} = 1,32 \times 0,20 \cong 0,26 \text{ m}^3 \quad (103)$$

Essa redução de volume foi importante para amenizar a consequência financeira da mudança de material das bobinas. Como o cobre é muito mais caro que o alumínio, caso não houvesse redução no volume do material do núcleo, o aumento do custo do projeto seria ainda maior.

A nova área da seção reta do núcleo é dada por:

$$A = 0,20^2 \cong 0,04 \text{ m}^2 \quad (104)$$

Com isso, com excitação pelo lado BT e utilizando a equação (18), tem-se para o número de espiras do secundário:

$$N_2 = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{4,44 \times 60 \times 1,4 \times 0,04} \cong 15 \text{ espiras} \quad (105)$$

O número de espiras no secundário aumentou de 13 para 15. Como o comprimento e a seção das bobinas foram mantidos os mesmos, são utilizados condutores de cobre de bitola 13,33% menor do que os condutores de alumínio.

Uma vez que o numerador de $B_{\max}$ na equação (97) estava representando a tensão eficaz de linha e não de fase, o termo 26 expresso no denominador representa o produto de N_2 com $\sqrt{3}$, que utilizando a equação (105), de fato será aproximadamente igual a 26.

Por conseguinte, utilizando as equações (3) e (105), o número de espiras primário é dado por:

$$N_1 \cong \frac{13,8}{0,38} \times 15 \cong 545 \text{ espiras} \quad (106)$$

A perda nos enrolamentos é dada por:

$$P_{\text{enrolamentos}} = 3R_{BT}I_{BT}^2 + 3R_{AT}I_{AT}^2 \quad (107)$$

$$P_{\text{enrolamentos}} = 3\rho_{BT}\left(\frac{l_{BT}}{A_{BT}}\right)I_{BT}^2 + 3\rho_{AT}\left(\frac{l_{AT}}{A_{AT}}\right)I_{AT}^2 \quad (108)$$

onde:

R_{BT} – Resistência no lado de baixa tensão em Ω ;

I_{BT} – Corrente no lado de baixa tensão em A;

R_{AT} - Resistência no lado de alta tensão em Ω ;

I_{AT} – Corrente no lado de alta tensão em A;

ρ_{BT} – Resistividade do material utilizado no lado de baixa tensão em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

l_{BT} – Comprimento do condutor de baixa tensão em m;

A_{BT} – Área da seção transversal do condutor de baixa tensão em mm^2 ;

ρ_{AT} – Resistividade do material utilizado no lado de alta tensão em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

l_{AT} – Comprimento do condutor de alta tensão em m;

A_{AT} – Área da seção transversal do condutor de alta tensão em mm^2 .

As correntes nominais entre projetos são constantes. Os comprimentos também foram considerados constantes. O projeto otimizado possui mais espiras, então, como foi visto, a bitola dos novos condutores são 87% da dos antigos.

A resistividade do alumínio é de $0,0282 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, enquanto a do cobre é de $0,0172 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ [40]. Logo, a substituição dos materiais representa uma queda de 39% na resistividade.

Levando-se em conta os efeitos da redução da bitola e da redução da resistividade, a relação entre as resistências dos condutores de cobre e alumínio é dada por:

$$\frac{R_{\text{Cu}}}{R_{\text{Al}}} \cong \frac{0,61}{0,87} \cong 0,70 \quad (109)$$

Baseado nessa redução de 30%, as resistências das bobinas foram ajustadas para $0,41 \text{ } \Omega$ no lado AT e $0,31 \text{ m}\Omega$. Com o ensaio de curto-circuito, as perdas obtidas na simulação devem ter a mesma proporção de redução, o que implicará na validação da parametrização desses valores.

4.4. ENSAIO EM VAZIO PÓS-OTIMIZAÇÃO

O ensaio em vazio foi realizado com a mesma metodologia descrita no tópico 4.4. Os resultados das tensões de fase aplicadas no lado BT, das correntes de linha circulantes no lado AT, das correntes de linha circulantes no lado BT e das perdas no núcleo podem ser observados através das Figuras 64, 65, 66 e 67.

A corrente de excitação no lado BT durante o ensaio é calculada através da equação (48). Assim como no projeto base, essa corrente apresentou elevado conteúdo de terceira harmônica. Desse modo, tem-se:

$$|I_{\text{BT}}| = \frac{2,73 + 4,06 + 4,17}{3} \cong 3,65 \text{ A} \quad (110)$$

As perdas no núcleo P_{CA} podem ser vistas na Figura 66. Desprezando as distorções, tem-se:

$$P_{\text{CA}} \cong \left(\frac{2,65 - 1,75}{2} \right) + 1,75 = 2,20 \text{ kW} \quad (111)$$

O valor previsto na otimização foi de 2228,26 W e o valor encontrado na simulação foi de 2200 W, ou seja, 1,27% menor do que o de referência, o que é um valor aceitável.

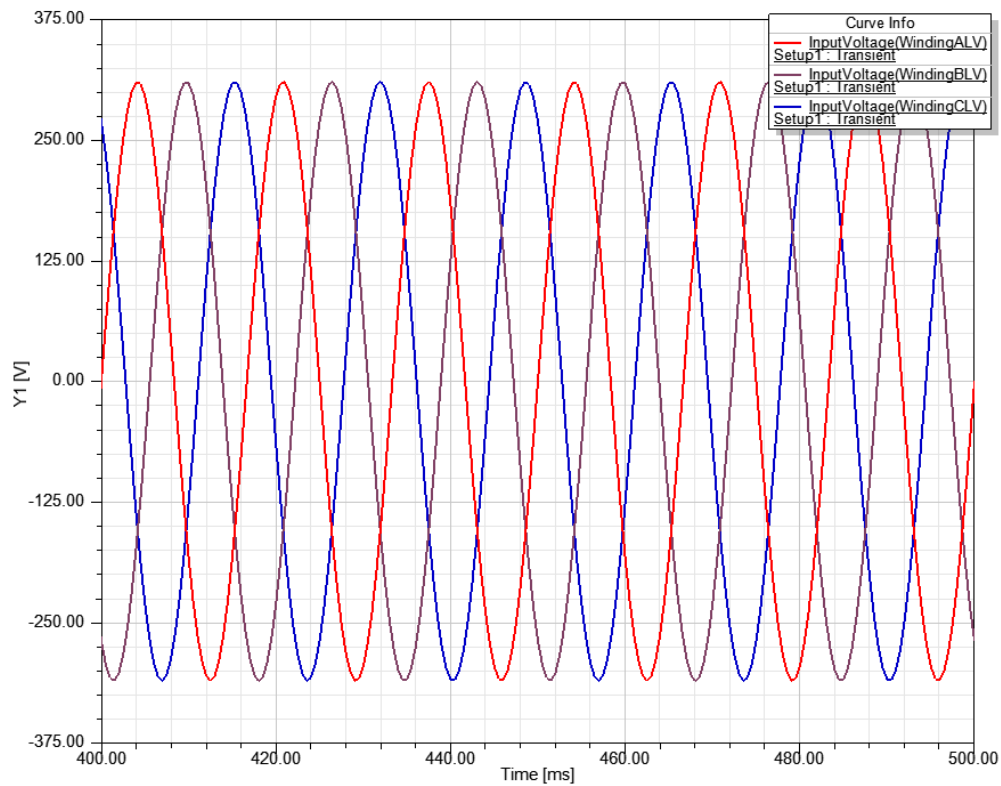


Figura 64 - Tensões no lado BT.

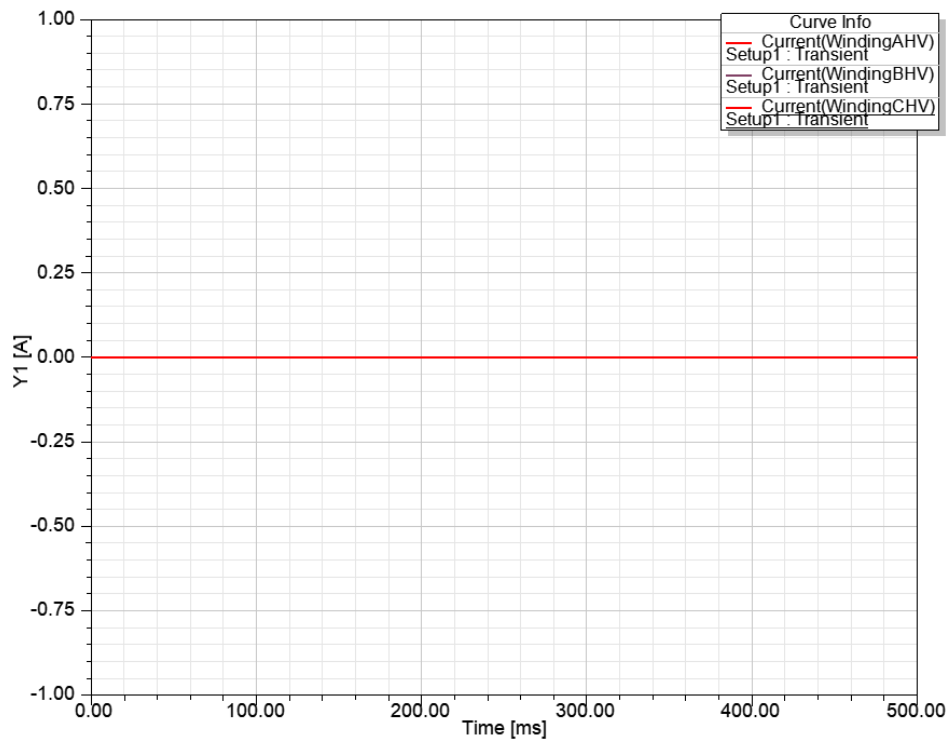


Figura 65 - Correntes no lado AT.

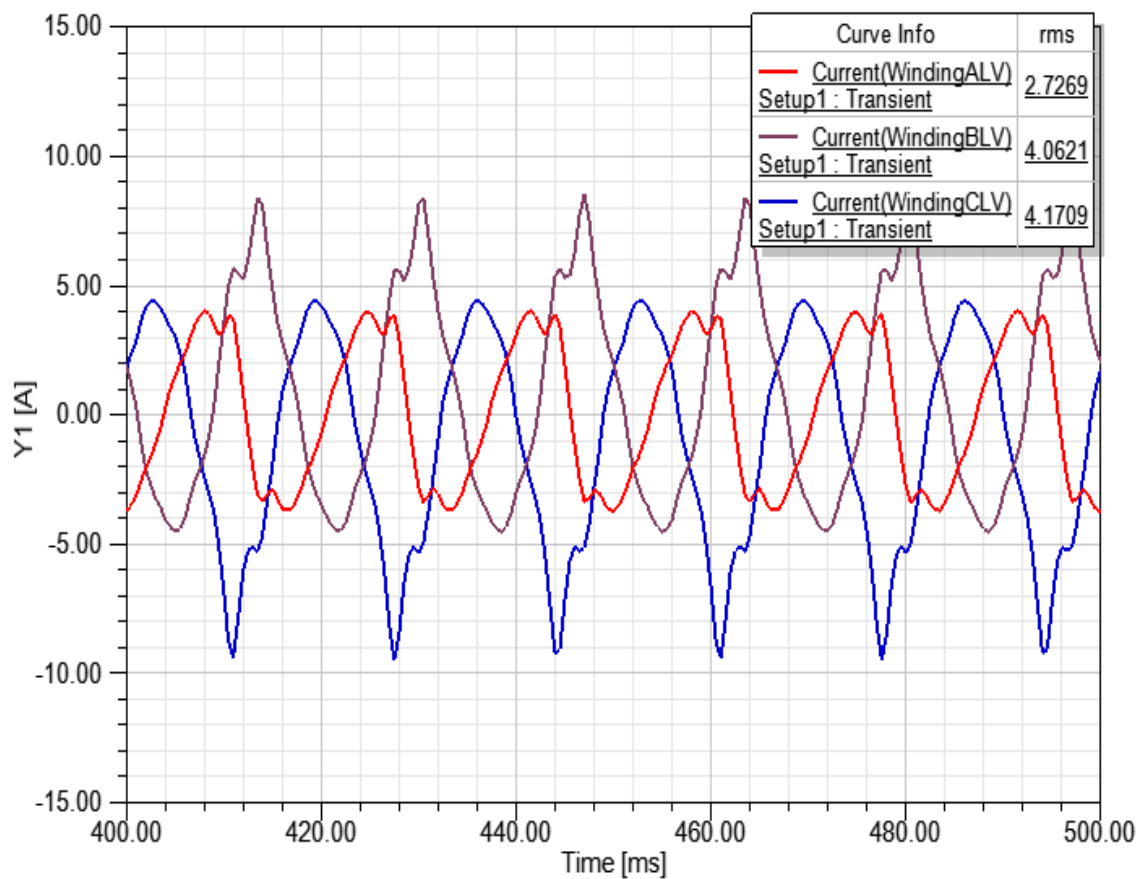


Figura 66 - Correntes no lado BT.

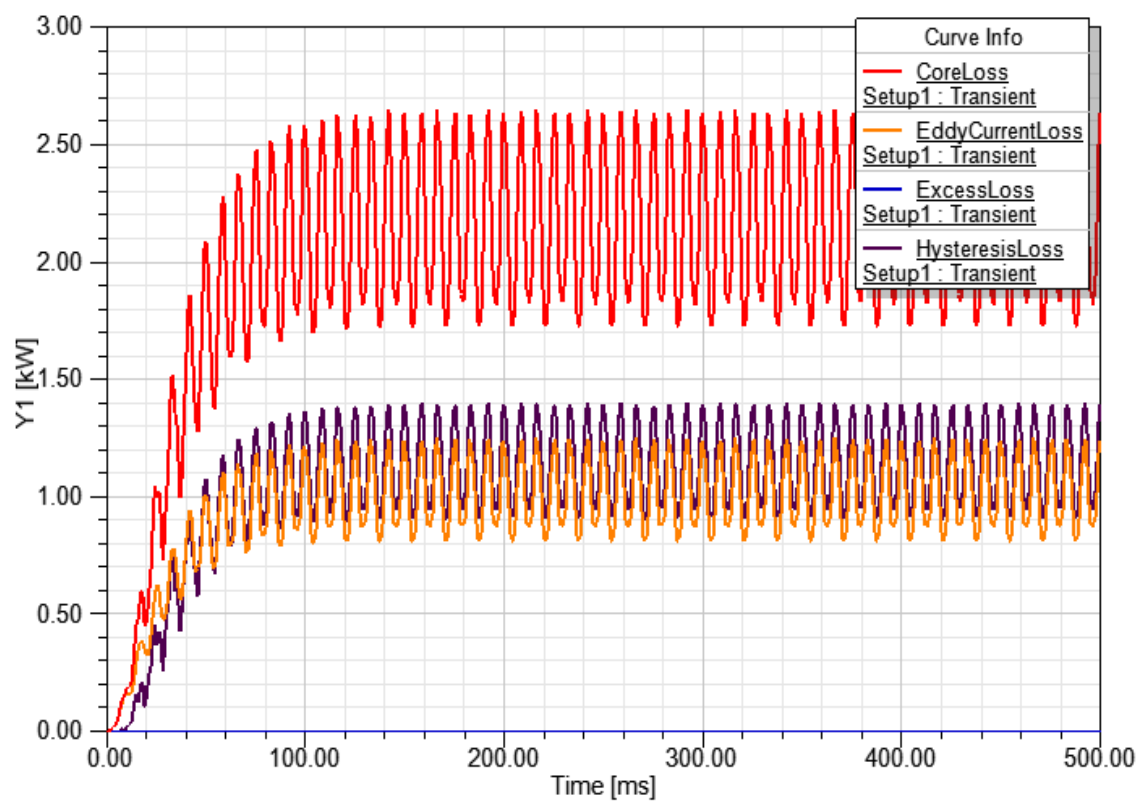


Figura 67 - Perdas no núcleo.

Assim, é possível determinar os parâmetros transversais do modelo por fase:

$$R_{Fe_{BT}} = \frac{\left(\frac{380}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{2200}{3}} \cong 65,64 \Omega/\text{fase} \quad (112)$$

$$|Z_0|_{BT} = \frac{\frac{380}{\sqrt{3}}}{3,65} \cong 60,11 \Omega/\text{fase} \quad (113)$$

$$X_{\mu_{BT}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{60,11}\right)^2 - \left(\frac{1}{65,64}\right)^2}} \cong 149,62 \Omega/\text{fase} \quad (114)$$

Esses valores estão referidos ao lado BT. Referindo-nos para os primários, conforme equações (24), (25) e (26), têm-se:

$$R_{Fe_{AT}} = 36,32^2 \times 65,64 \cong 86,59 \text{ k}\Omega/\text{fase} \quad (115)$$

$$X_{\mu_{AT}} = 36,32^2 \times 149,62 \cong 197,37 \text{ k}\Omega/\text{fase} \quad (116)$$

A Figura 68 mostra os fluxos concatenados nas três fases no lado BT.

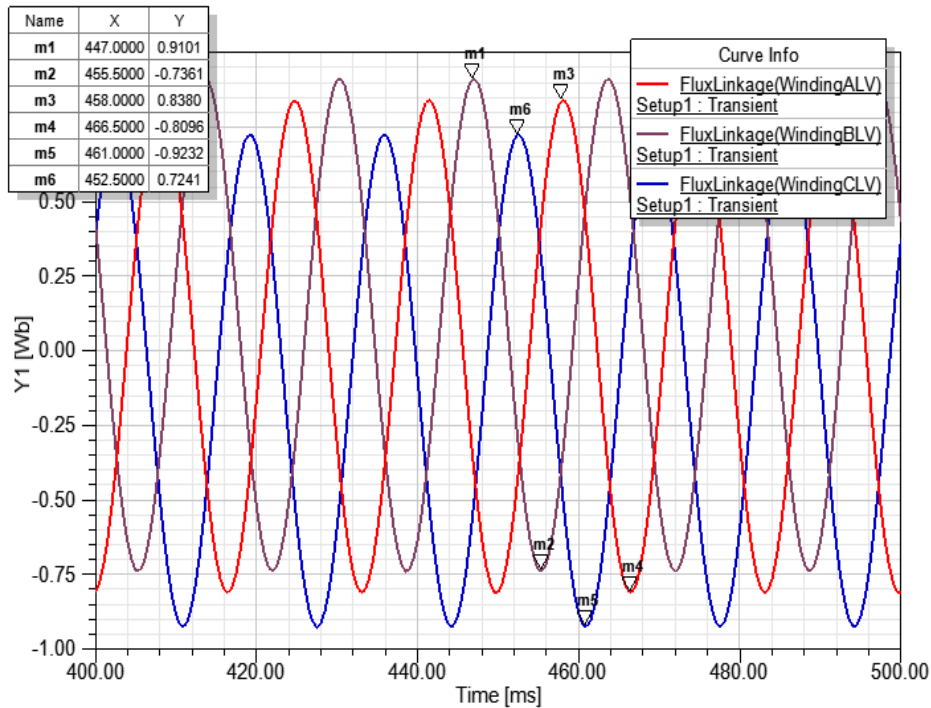


Figura 68 - Fluxo concatenado no lado BT.

Pela imagem acima, o fluxo concatenado apresenta valores mínimos e máximos ligeiramente distintos em cada fase. Esses pequenos desequilíbrios entre fases se devem pelas diferenças dos caminhos magnéticos percorridos pelos fluxos. Dessa forma, o melhor meio de se encontrar um único valor máximo é utilizar a metade do valor pico a pico em cada fase, e em seguida, tomar a média aritmética deles. Assim, tem-se:

$$\lambda_{\max A} \cong \frac{0,81+0,84}{2} = 0,825 \text{ Wb} \quad (117)$$

$$\lambda_{\max B} \cong \frac{0,91+0,74}{2} = 0,825 \text{ Wb} \quad (118)$$

$$\lambda_{\max C} \cong \frac{0,72+0,92}{2} = 0,82 \text{ Wb} \quad (119)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{0,825+0,825+0,82}{3} \cong 0,823 \text{ Wb} \quad (120)$$

Como o fluxo concatenado máximo é dado por:

$$\lambda_{\max} = N\phi_{\max} = NB_{\max}A \quad (121)$$

Então, de acordo com os resultados das equações (37), (38) e (58), tem-se:

$$B_{\max} \cong \frac{0,823}{15 \times 0,04} \cong 1,37 \text{ T} \quad (122)$$

Ou seja, o valor de $B_{\max}$ calculado a partir dos resultados da simulação foi ligeiramente inferior à 1,4 T, devido ao arredondamento do número de espiras.

Ainda é possível verificar as distribuições das densidades e das linhas de fluxo através das regiões do núcleo, como mostram as Figuras 69 e 70. O instante de tempo considerado foi o de 442,88 ms, onde ocorre o $\lambda_{\max}$ encontrado na equação (120).

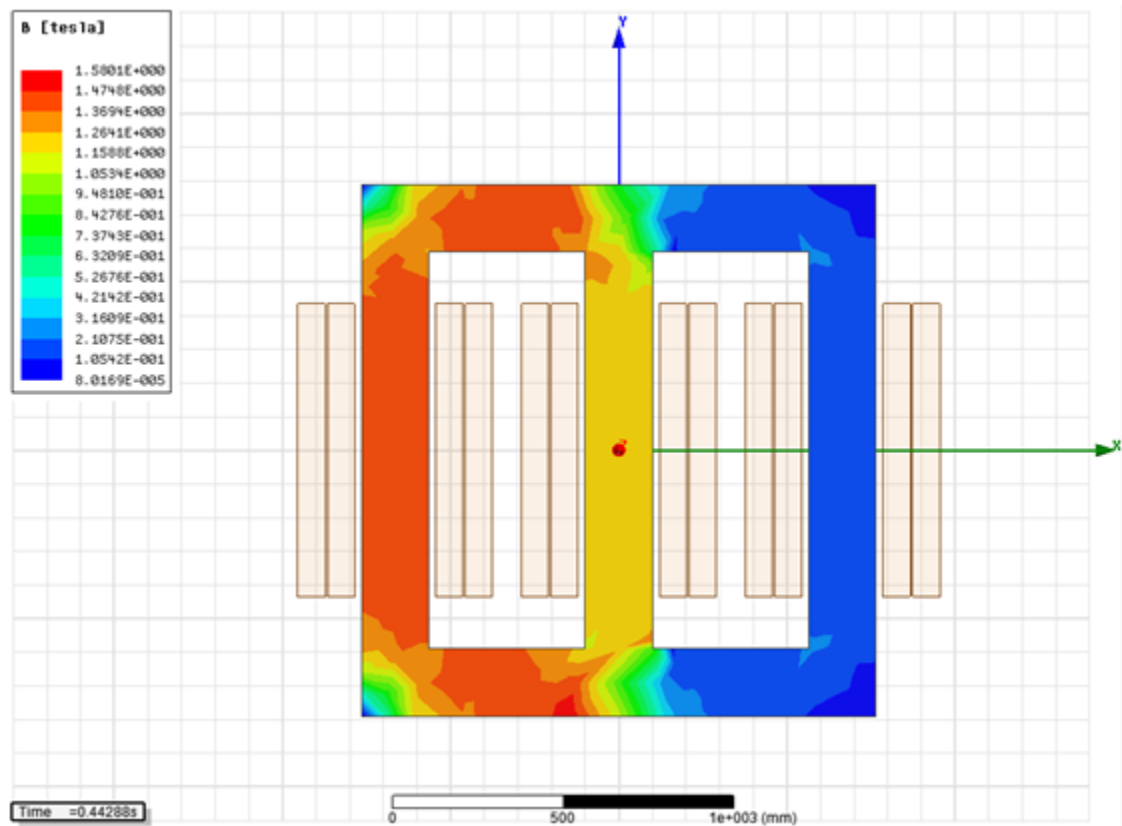


Figura 69 - Distribuição da densidade de fluxo pelo núcleo.

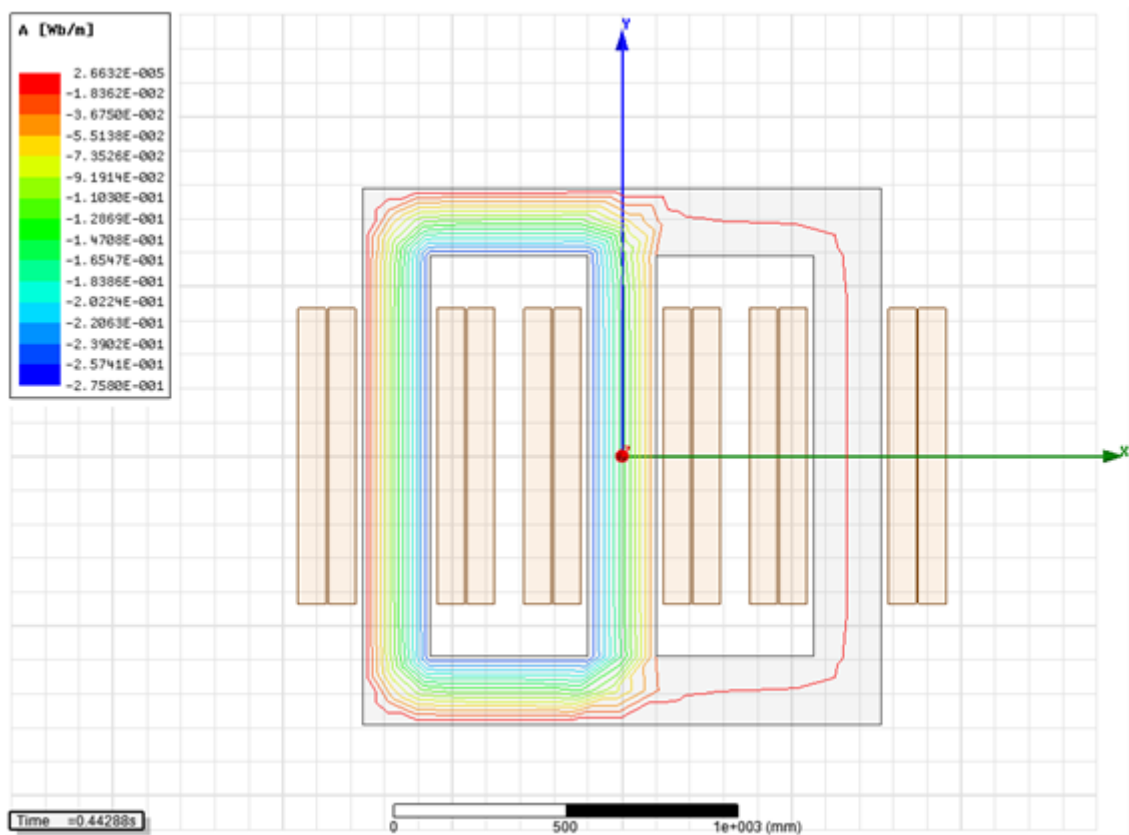


Figura 70 - Distribuição das linhas de fluxo pelo núcleo.

O fluxo ficou mais concentrado entre as fases C e A, pois eram as fases que estavam com os maiores valores de fluxo concatenado instantâneos em módulo, tendo a fase C a maior densidade de fluxo (1,48 T), bem próxima da projetada para ser $B_{\max}$ (1,4 T). Além disso, o menor caminho magnético para as linhas de fluxo que atravessavam a fase C se fecharem é pela fase imediatamente adjacente, que no caso é a A.

A massa do núcleo para esse projeto é dada por:

$$\text{Massa} = 7650 \times 2,2046 \times 0,26 \times 0,965 \cong 4231,48 \text{ lb} \quad (123)$$

Como visto no capítulo 2, a principal premissa considerada no ensaio em vazio é que a queda de tensão na impedância longitudinal pode ser desprezada, uma vez que esta impedância é muito menor do que a impedância transversal e que corrente circulante no teste é muito pequena. A máxima corrente de excitação para um transformador de 1500 kVA da classe de 15 kV é de 1,4% da corrente nominal, como mostra a Tabela 2 [30]. No ensaio realizado, foi encontrado o seguinte valor:

$$I_0 = \frac{3,65}{\left(\frac{1500000}{\sqrt{3} \times 380}\right)} \cong 0,16 \% \quad (124)$$

O valor simulado está abaixo do valor máximo previsto em norma.

4.5. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO PÓS-OTIMIZAÇÃO

O ensaio de curto-circuito foi realizado com a mesma metodologia descrita no tópico 4.5. As Figuras 71, 72, 73, 74 e 75 apresentam, respectivamente, os resultados das tensões de fase aplicadas no lado AT, das tensões no lado BT, as correntes de linha circulantes no lado AT, as correntes circulantes no lado BT e as perdas nas bobinas.

A corrente eficaz que circula no lado AT durante o ensaio, conforme pode ser visto através da Figura 68, é dada por:

$$\left| I_{AT\text{Simulação}} \right| \cong \left| \frac{87,68 + 88,17 + 88,34}{3\sqrt{2}} \right| \cong 62,27 \text{ A} \quad (125)$$

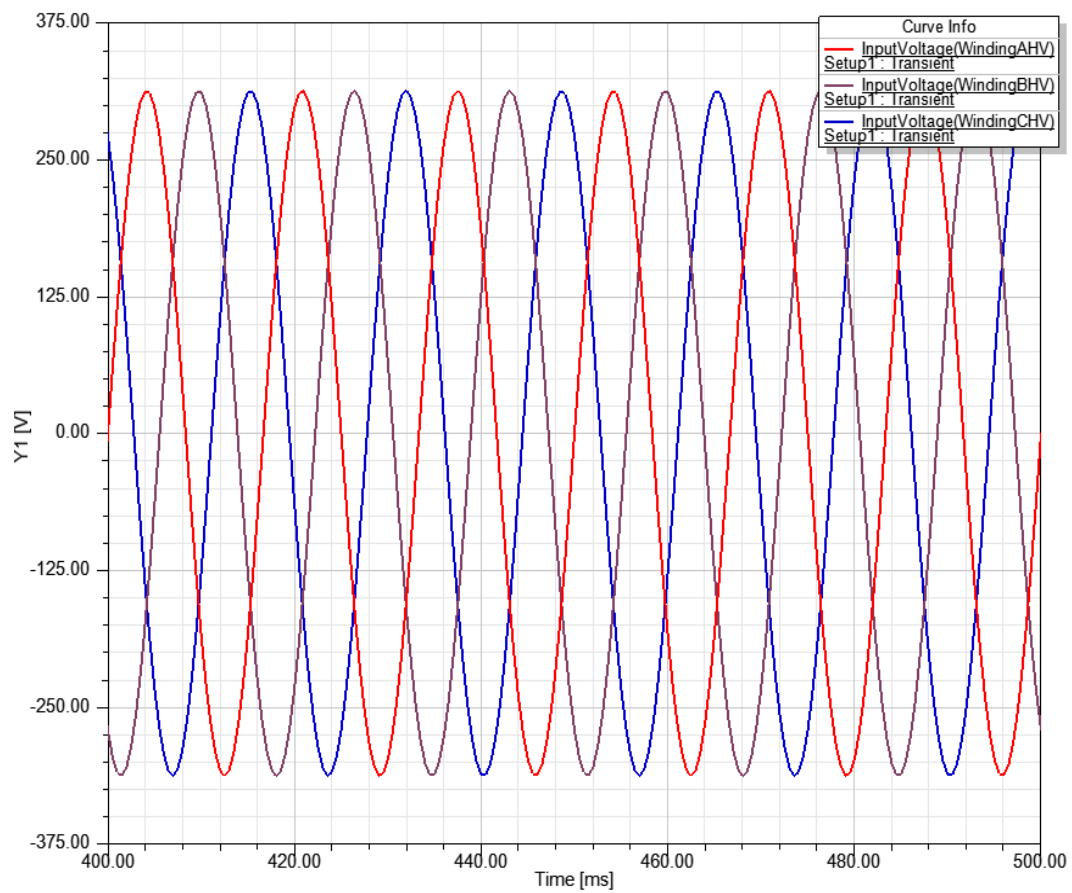


Figura 71 - Tensões no lado AT.

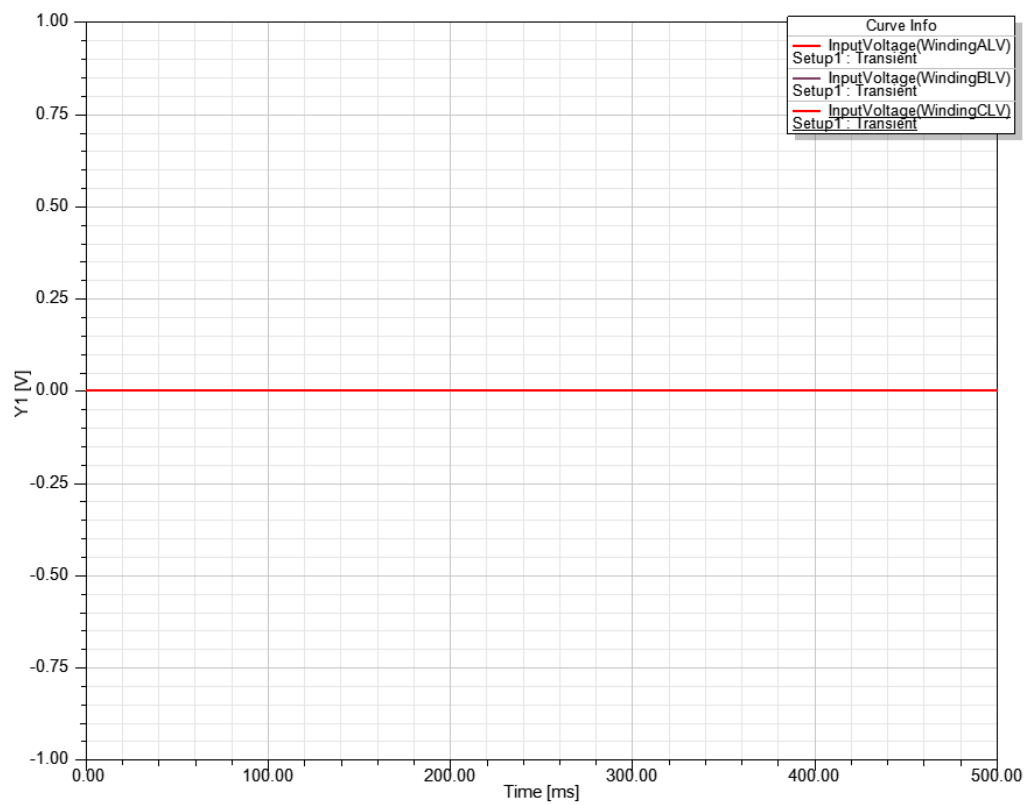


Figura 72 - Tensões no lado BT.

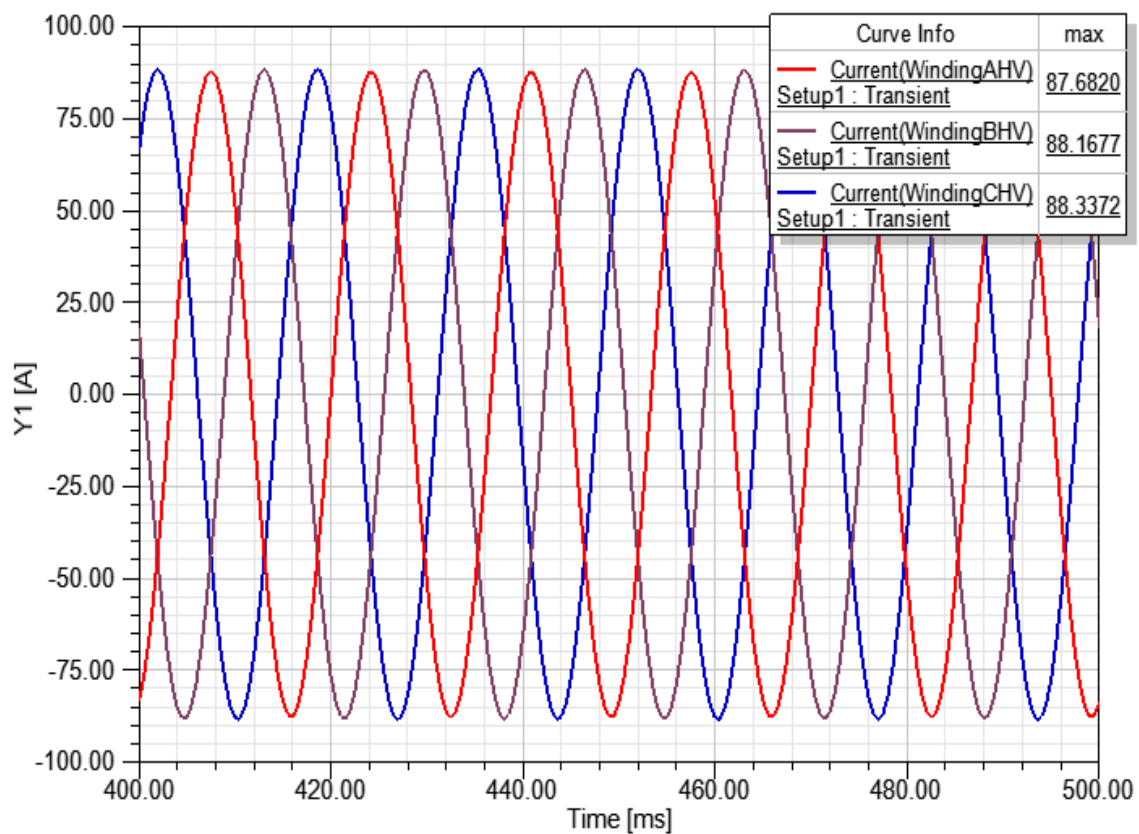


Figura 73 - Correntes no lado AT.

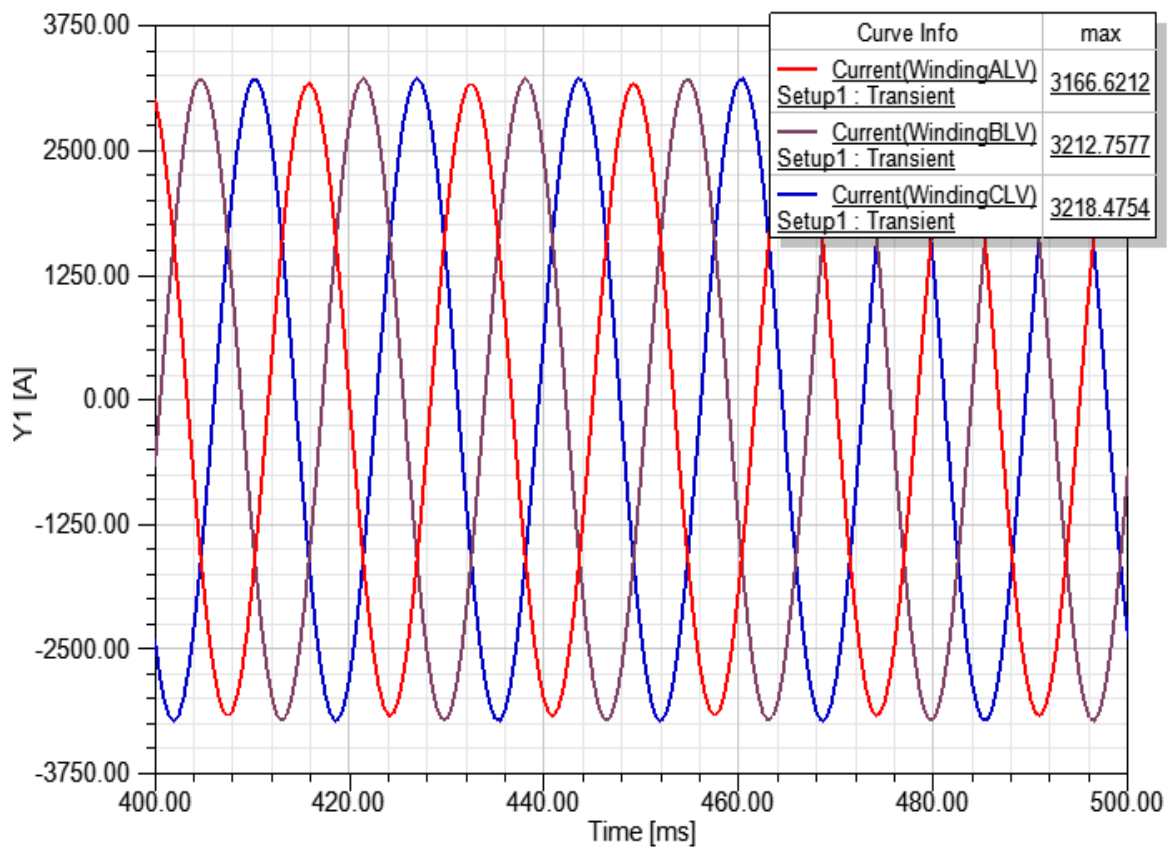


Figura 74 - Correntes no lado BT.

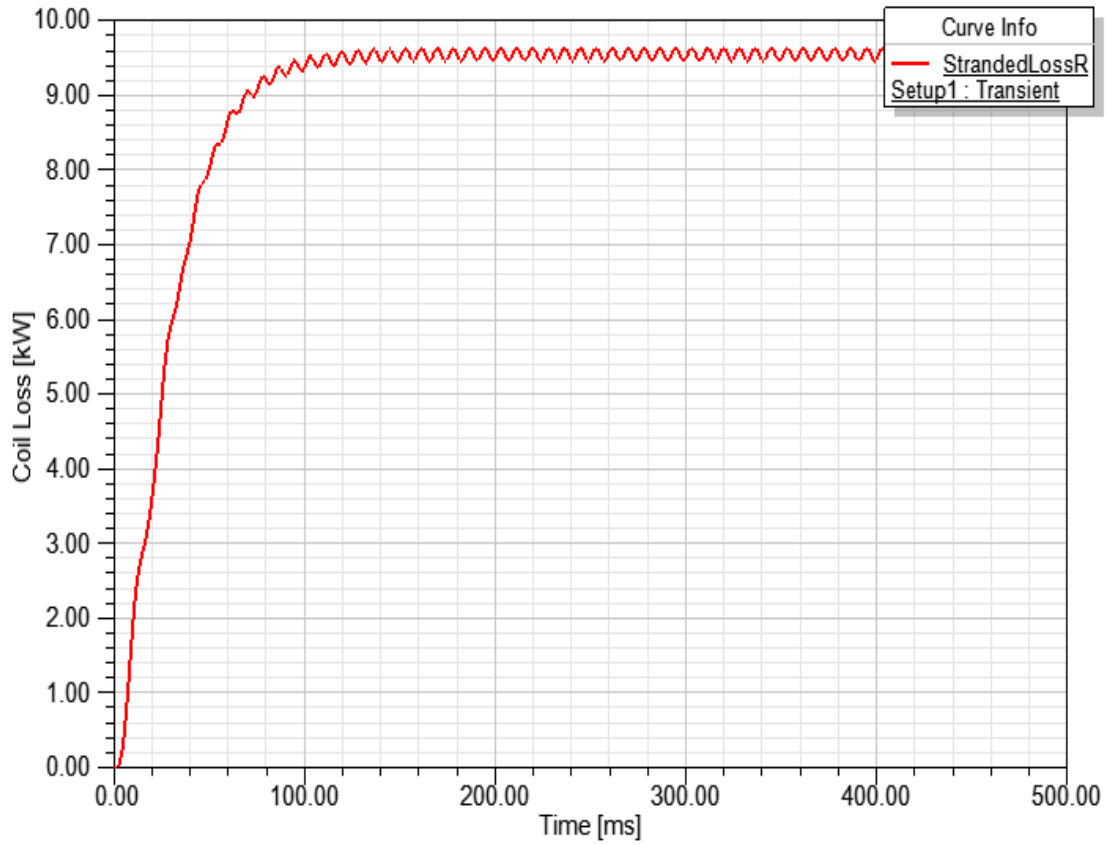


Figura 75 - Perdas nas bobinas.

Ou seja, o valor encontrado na simulação é aproximadamente igual ao valor teórico encontrado através da equação (66).

Conforme visto no capítulo 2, as perdas ôhmicas P_{CC} nos condutores das bobinas são devidas ao Efeito Joule. Conforme mostra a Figura 69, tem-se:

$$P_{CC} \cong \frac{10^{-9}}{5} \times 2,5 + 9 = 9,5 \text{ kW} \quad (126)$$

Já a tensão de fase aplicada no lado AT foi de 233,83 V, como mostra a Figura 71.

A tensão de fase é $\sqrt{3}$ vezes menor do que a tensão de linha no lado AT. Assim, conforme equações (30), (31) e (32), têm-se os seguintes parâmetros por fase:

$$|Z_{CC}| = \frac{233,83}{62,27} \cong 3,76 \text{ } \Omega/\text{fase} \quad (127)$$

$$R_{CC} = \frac{\frac{9500}{3}}{62,27^2} \cong 0,82 \, \Omega/\text{fase} \quad (128)$$

$$X_{CC} = \sqrt{3,76^2 - 0,82^2} \cong 3,67 \, \Omega/\text{fase} \quad (129)$$

O valor da tensão de curto-circuito em relação à tensão nominal é dado por:

$$\frac{V_{CC\text{fase}}}{V_{F1\text{nominal}}} (\%) = \frac{233,83}{13800} \times \sqrt{3} = 2,93\% \quad (130)$$

O valor é inferior ao limite máximo de 6% previsto na Tabela 2.

Considerando a simetria no modelo, é possível, através das equações (33) e (34), determinar as resistências e reatâncias longitudinais dos enrolamentos primários e secundários, como mostrado abaixo:

$$X_1 = X_2 = \frac{3,67}{2} \cong 1,84 \, \Omega/\text{fase} \quad (131)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{0,82}{2} = 0,41 \, \Omega/\text{fase} \quad (132)$$

Esses valores já estão referidos ao lado AT.

Utilizando a equação (74), é possível calcular a queda de tensão longitudinal:

$$|\Delta E_{BT}| = \frac{3,76}{2 \times 36,32^2} \times 3,65 \cong 0,01 \, \text{V} \quad (133)$$

Ou seja, a tensão induzida de linha vista no terminal primário deve ser dada por:

$$|E_1| = \left(\frac{|V_2|}{\sqrt{3}} - |\Delta E_{BT}| \right) \times a \times \sqrt{3} \quad (134)$$

$$|E_1| = \left(\frac{380}{\sqrt{3}} - 0,01 \right) \times 36,32 \times \sqrt{3} \cong 13,8 \, \text{kV} \quad (135)$$

A Figura 76 mostra as tensões induzidas de fase induzidas no lado AT no ensaio em vazio. A partir dela, tem-se:

$$|E_1| = \left| \frac{11,27}{\sqrt{2}} \times \sqrt{3} \right| \cong 13,8 \text{ kV} \quad (136)$$

Portanto, os valores calculado e simulado foram iguais entre si. A queda de tensão na impedância de dispersão devido à corrente excitação de fato pôde ser desprezada.

A aproximação do ensaio de curto-circuito se mostrou eficiente, uma vez que, com o secundário em curto e com uma impedância de magnetização muito maior do que a de dispersão (no projeto em questão, cerca de 21088 vezes maior), o ramo transversal pôde ser desprezado. No caso desse transformador, a reatância indutiva equivalente por fase representa 97,61% da impedância total longitudinal por fase.

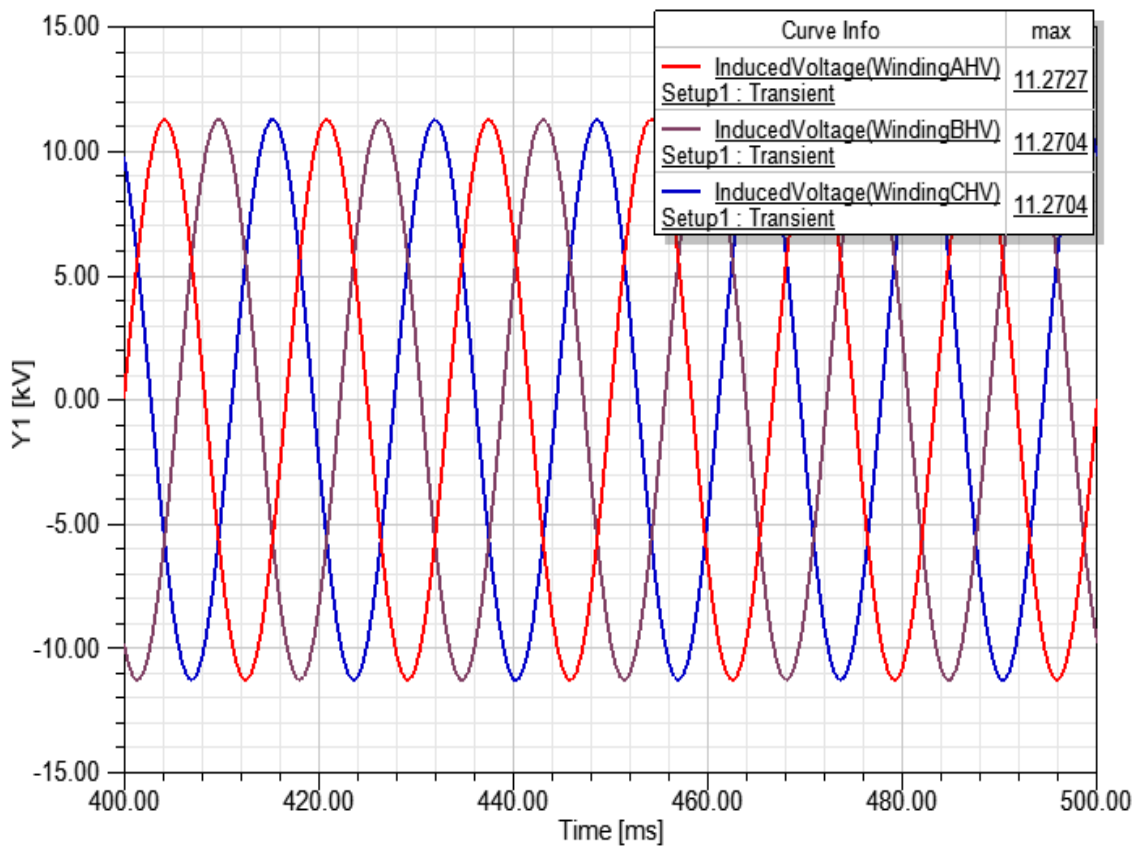


Figura 76 - Tensões de fase induzidas no lado AT.

4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE, RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO DO PROJETO PÓS-OTIMIZAÇÃO

Com as informações obtidas a partir das simulações e dos cálculos realizados para encontrar os parâmetros, é possível montar o circuito equivalente mostrado na Figura 77.

As indutâncias de magnetização e de dispersão são calculadas a partir das equações (2) e (1). Assim, tem-se:

$$L_{\mu} = \frac{197370}{2 \times \pi \times 60} \cong 523,54 \text{ H/fase} \quad (137)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1,84}{2 \times \pi \times 60} \cong 4,88 \text{ mH/fase} \quad (138)$$

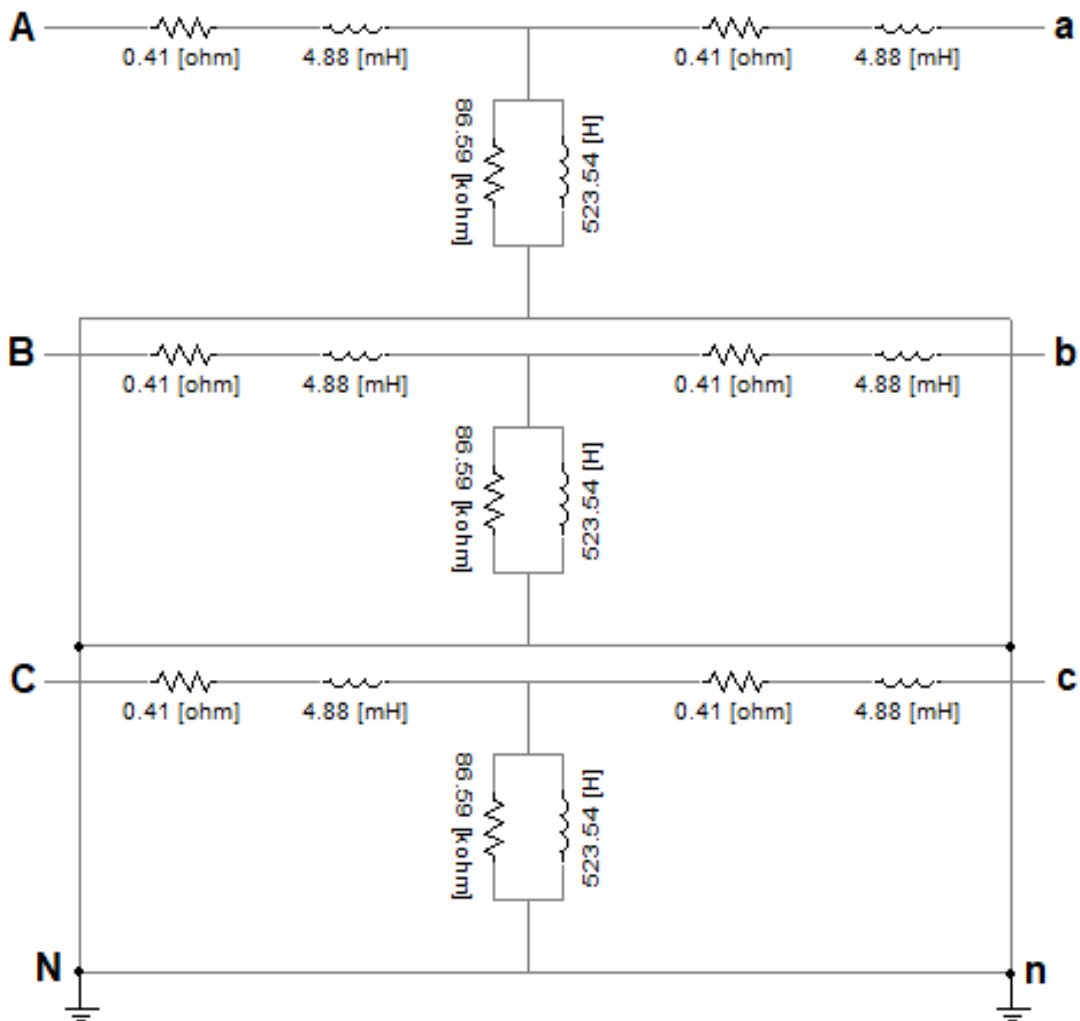


Figura 77 - Circuito equivalente do projeto otimizado do transformador.

As indutâncias de acoplamento entre os enrolamentos não são mostradas no circuito, mas seus resultados também foram plotados no *software*, como mostram as figuras 78, 79 e 80.

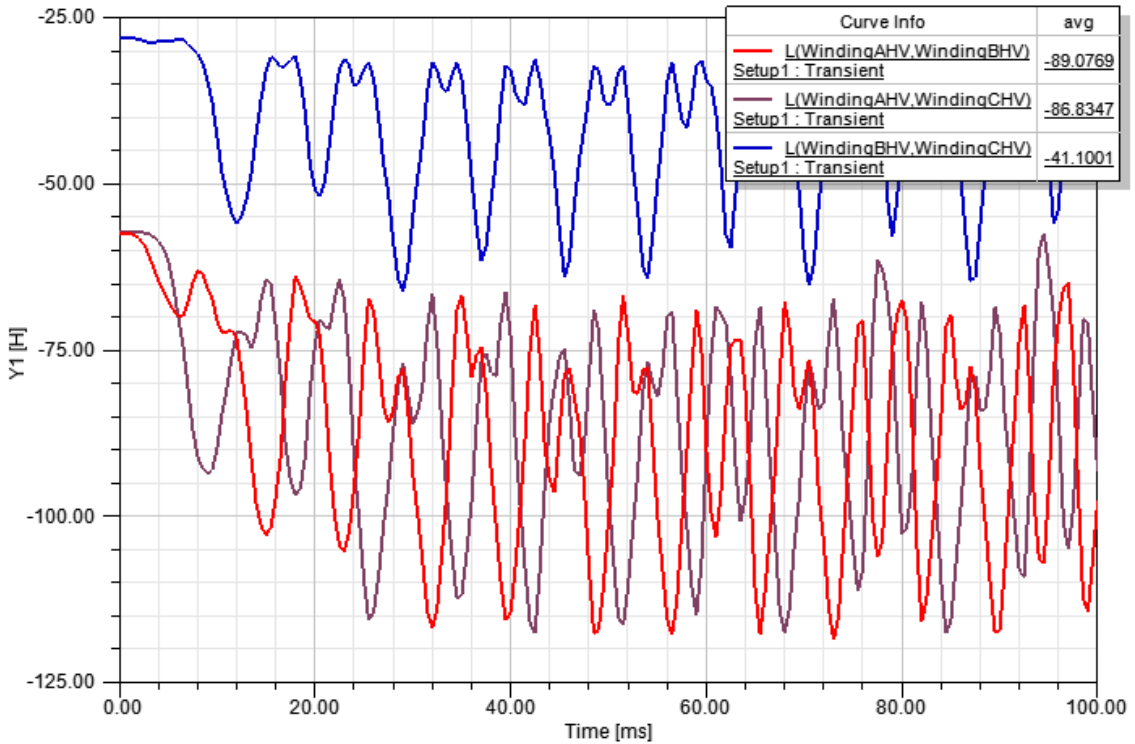


Figura 78 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT.

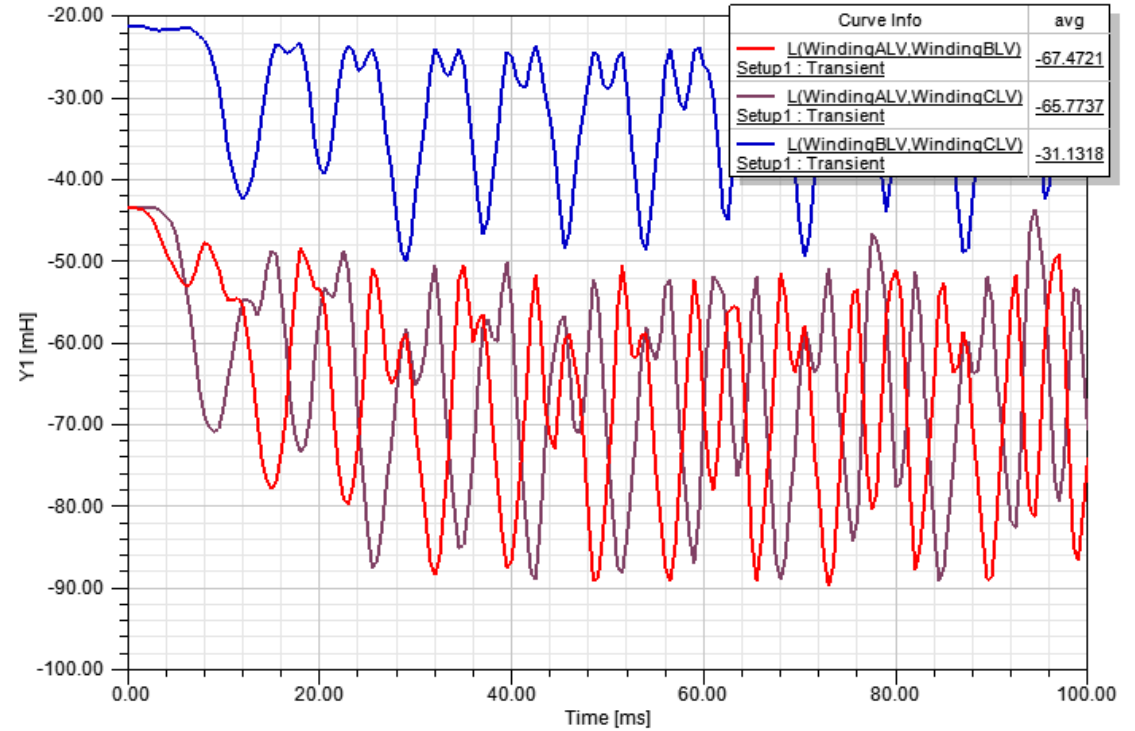


Figura 79 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da BT.

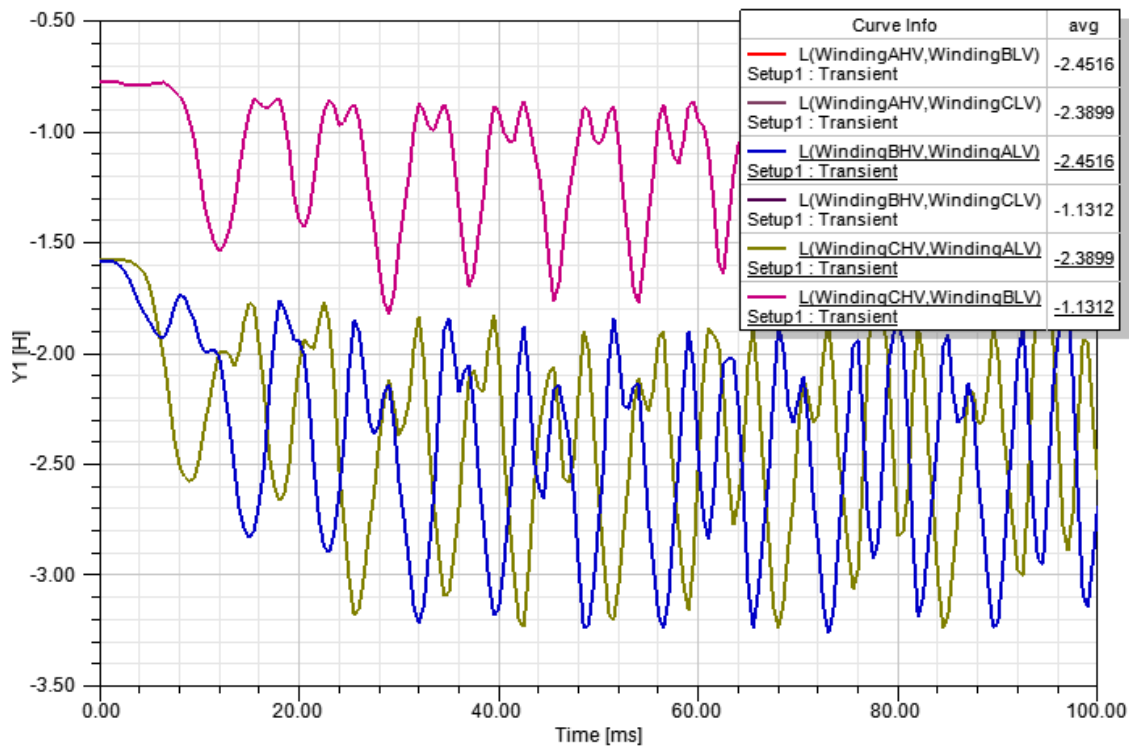


Figura 80 – Indutâncias de acoplamento entre as fases da AT e da BT.

Já o rendimento do transformador para atendimento a um patamar de carga de 100% e um fator de potência unitário, pode ser calculado através da equação (20). Desse modo, tem-se:

$$\eta(\%) = \frac{1500}{1500+2,2+9,5} \times 100 \cong 99,23\% \quad (139)$$

Com isso, é possível constatar que o objetivo da otimização foi alcançado, uma vez que o novo transformador passa a atender aos requisitos da norma para ser enquadrado na categoria A de perdas [30].

Para confirmar os resultados, excitou-se o primário com tensão nominal e o secundário com corrente nominal, para garantir que a potência trifásica de saída seria a potência nominal. Nesse caso, a corrente circula no sentido do secundário para o primário e a tensão nominal é aplicada nos terminais do primário. Ou seja, a tensão induzida no primário representa a tensão em vazio e a tensão terminal do primário é a tensão em plena carga. Nesse cenário, foram checadas as perdas do núcleo e nas bobinas, que apresentaram resultados iguais aos apresentados nos ensaios em vazio e de curto-circuito. A tensão de fase em vazio no lado AT pode ser observada na Figura 81.

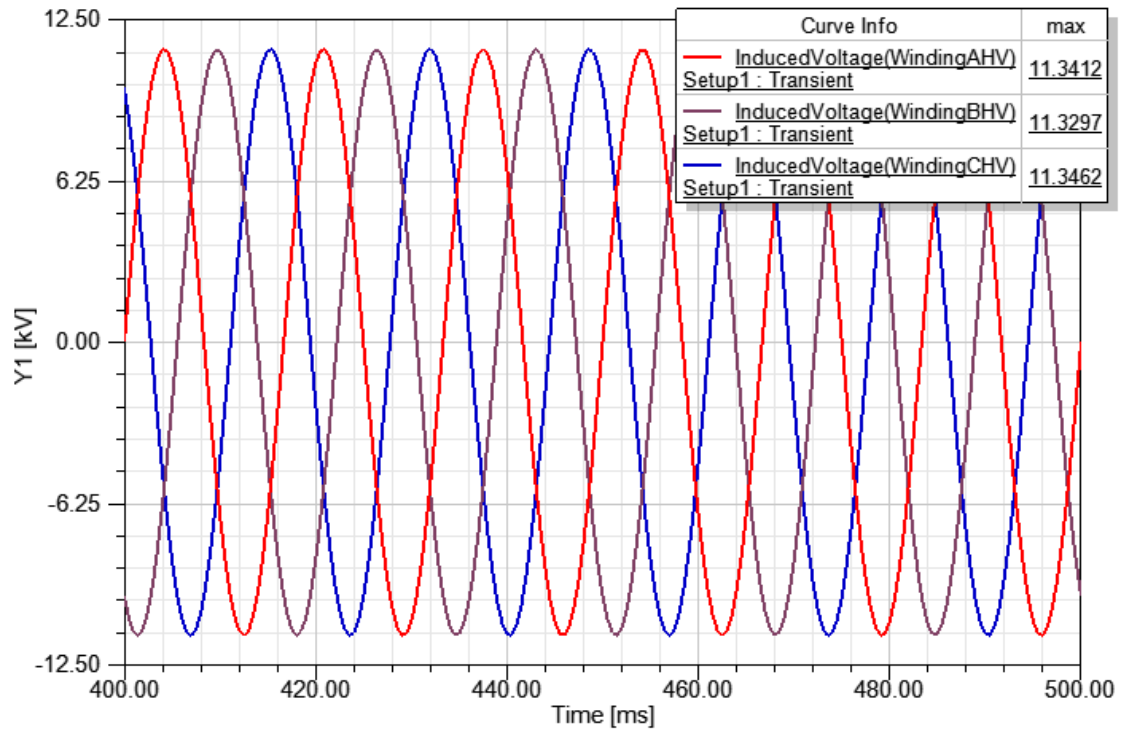


Figura 81 – Tensão de fase em vazio no lado AT.

Ou seja, a tensão de fase em vazio obtida na simulação é dada por:

$$|V_{\text{vazio}}| = \frac{(11,34+11,33+11,35) \times 10^3}{3\sqrt{2}} \cong 8018,59 \text{ V} \quad (140)$$

Pelos parâmetros obtidos através do modelo, pode-se calcular o valor da tensão de fase em vazio, com corrente nominal e fator de potência unitário da seguinte forma:

$$V_{\text{vazio}} = V_{\text{plena carga}} + (R_{\text{CC}} + j X_{\text{CC}}) \times I_{\text{ATNominal}} \quad (141)$$

$$V_{\text{vazio}} = \frac{13800}{\sqrt{3}} + (0,82 + j 3,67) \times 62,76 = 8018,90 + j 230,33 \text{ V} \quad (142)$$

$$V_{\text{vazio}} = 8022,21 \angle 1,65^\circ \text{ V} \quad (143)$$

Os valores obtidos através da simulação e do cálculo analítico a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios foram muito próximos entre si.

Com esse dado, é possível calcular a regulação de tensão, conforme equação (21):

$$\text{Regulação de tensão (\%)} = \frac{8022,21 - \frac{13800}{\sqrt{3}}}{\frac{13800}{\sqrt{3}}} \times 100 \cong 0,69\% \quad (144)$$

O valor encontrado é bem baixo, o que representa uma característica positiva para o equipamento. Mesmo variando a carga de 0% à 100%, a tensão fornecida à ela praticamente permanece constante.

4.7. COMPARATIVO DE ÍNDICES DE DESEMPENHO ENTRE PROJETOS

A Tabela 9 mostra o comparativo das impedâncias longitudinais, das relações X/R, dos rendimentos e regulações de tensão entre cada um dos projetos.

Tabela 9 - Comparativo de impedância, relação X/R, rendimento e regulação de tensão entre projetos de simulação.

	Projeto Base	Projeto Otimizado
Impedância Longitudinal/fase Referida ao Lado AT (Ω)	3,24	3,76
Relação X/R	2,61	4,48
Rendimento (%)	98,94	99,23
Regulação de Tensão (%)	0,94	0,69

Primeiramente, é possível comparar os resultados de impedância e rendimento do projeto base implementado na simulação com os dados de catálogo. As informações de relação X/R e a regulação de tensão não estão disponíveis no catálogo. Então, elas são comparadas somente entre os projetos de simulação.

Como exposto no início do capítulo, os dados de catálogo utilizados foram de um transformador de 1600 kVA – 10,0 kV/0,4 kV. Sua impedância de dispersão é de 6% na base do transformador. Transformando para ohms e referindo para o lado AT, tem-se:

$$Z_{\text{Catálogo AT}} = 0,06 \times \frac{10^2}{1,6} = 3,75 \Omega/\text{fase} \quad (145)$$

Como mostra a Tabela 9, o projeto base apresentou uma impedância de 3,24 Ω /fase, que é 13,6% menor que a de catálogo. Essa diferença pode ser explicada pela simplificação na modelagem das bobinas, onde as camadas isolantes entre o alumínio foram desprezadas.

Já em relação ao rendimento, para o transformador do catálogo, tem-se:

$$\eta_{\text{Catálogo}}(\%) = \frac{1600}{1600+2,8+13,6} \times 100 \cong 98,99\% \quad (146)$$

Ou seja, praticamente igual ao da simulação.

Comparando agora as simulações dos projetos base e otimizado, houve um aumento de 0,29% no rendimento, o que representa um ganho significativo, uma vez que transformadores em geral já são dispositivos que apresentam elevada performance, tornando mais difícil uma melhora desse parâmetro.

A impedância longitudinal por fase apresentou um aumento de 16,05%, gerando um impacto positivo no que tange a limitações de níveis de curto-circuito, por exemplo. Uma vez que os valores das correntes de falta diminuem, seria necessário dimensionar disjuntores com capacidades de interrupção menores, incorrendo em menores custos a nível do sistema de proteção.

A regulação de tensão, que já era baixa, reduziu em 26,6%. Assim, o valor da tensão terminal ficou ainda menos sujeito à variação de carga, tornando o transformador mais robusto.

Por outro lado, a relação X/R mais do que dobrou. Isso acarreta na diminuição do amortecimento da componente contínua da corrente de curto-circuito, no que diz respeito ao estudo de transitórios.

4.8.CÁLCULO DO TEMPO DE *PAYBACK*

De acordo com SIEMENS [41], a análise de *payback* visa determinar o tempo de retorno de um investimento em um ativo de custo inicial maior quando comparado a um equipamento de custo inicial menor, porém de menor rendimento, de modo a concluir qual aquisição seria mais vantajosa para cada tipo de aplicação.

No cenário desse estudo de caso, pode-se comparar o projeto otimizado com o projeto base. Estão sendo levados em conta apenas os valores de custo da parte ativa de cada um dos projetos. Parte-se da premissa que as margens de venda adotadas seriam iguais. Os impostos também estão sendo desconsiderados, porém também teriam alíquotas percentuais iguais entre projetos (PIS/COFINS 9,25%, IPI 0% e ICMS 4%).

Primeiramente, é necessário calcular a perda de energia dos transformadores dentro do período de um ano. Assim, tem-se:

$$E_{Loss} = (P_0 + P_k \times \%carga) \times 8760 \quad (147)$$

onde:

E_{Loss} – Energia perdida em kWh;

P_0 – Perdas no núcleo em kW;

P_k – Perdas em carga em kW;

$\%carga$ – Patamar de carga;

8760 – Quantidade de horas em um ano.

Em seguida, deve-se calcular a diferença entre as perdas de energia de ambos os projetos dentro do período de um ano. Assim, tem-se:

$$E_{\Delta} = E_{Loss}^C - E_{Loss}^A \quad (148)$$

onde:

E_{Δ} – Diferença de perdas de energia entre os modelos em kWh;

E_{Loss}^C – Perdas de energia do transformador da Categoria C em kWh;

E_{Loss}^A – Perdas de energia do transformador da Categoria A em kWh.

A economia de energia por ano é dada por:

$$P_E = E_{\Delta} \times C \quad (149)$$

onde:

P_E – Economia de energia por ano na comparação entre os projetos em US\$;

C – Custo médio em US\$/kWh.

Por fim, o tempo de *payback* é dado por:

$$TPB = \frac{P_i^A - P_i^C}{P_E} \quad (150)$$

onde:

TPB – Tempo de *payback* em anos;

P_i^A – Preço do transformador da Categoria A em US\$;

P_i^C – Preço do transformador da Categoria C em US\$.

O ensaio de curto-circuito é realizado com corrente nominal. Ou seja, o patamar de carga nesse cenário é de 100%. Assim, considerando as perdas no núcleo e nas bobinas encontradas nas simulações para ambos os projetos, têm-se os seguintes cálculos:

$$E_{Loss}^B = (2,5 + 13,6 \times 1) \times 8760 = 141.036,00 \text{ kWh} \quad (151)$$

$$E_{Loss}^A = (2,2 + 9,5 \times 1) \times 8760 = 102.492,00 \text{ kWh} \quad (152)$$

$$E_{\Delta} = 141.036,00 - 102.492,00 = 38.544,00 \text{ kWh} \quad (153)$$

Considerando o custo médio do kWh na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, de US\$ 0,26, tem-se:

$$P_E = 38.544,00 \times 0,26 = \text{US\$ } 10.021,44 \quad (154)$$

Assim, quando se opta por um transformador mais eficiente, economiza-se U\$ 10.021,44 durante o período de um ano.

Considerando uma margem média de venda de 20% para cada equipamento, basta multiplicar os custos de fabricação por 1,2. Esse será o valor líquido pago pelo cliente.

Portanto, o tempo de *payback* será de:

$$TPB = \frac{1,2 \times (53.831,79 - 14.997,37)}{10.021,44} \cong 4,65 \text{ anos} \quad (155)$$

Ou seja, em pouco mais de quatro anos e meio, a diferença de custo de investimento inicial se paga em economia de consumo de energia, transformando-se em lucro após esse período.

Como foi considerado que o transformador trabalharia durante todo o ano com 100% de carga, o tempo de *payback* ficou mais curto, se comparado com a operação a patamares de carga médios inferiores a 100% ou com menos horas de funcionamento durante o ano. De qualquer modo, mesmo se fossem considerados níveis de carga reduzidos, o tempo de *payback* seria bem inferior ao tempo de vida útil do equipamento, que é superior a 20 anos.

Dessa forma, apesar do custo de investimento inicial ser maior para o projeto otimizado, o cliente passa a ter acesso a um transformador mais eficiente e tecnicamente superior, como mostrou o comparativo de índices de desempenho entre projetos. Além disso, o novo projeto se mostrou uma opção mais econômica, considerando a operação já em um médio prazo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O primeiro objetivo deste trabalho era o de, a partir de um projeto base de um transformador a seco trifásico, implementar alterações técnicas, de tal forma a reduzir suas perdas, e por conseguinte, deixá-lo mais eficiente. O segundo objetivo era o de checar a viabilidade econômica deste novo projeto, para entender, sob o ponto de vista comercial, se o novo projeto também apresentaria ganho econômico e em quanto tempo isso ocorreria.

Para a etapa de modelagem e simulação do projeto base, foram utilizados como base dados de catálogo oriundos de um fabricante. Os resultados das perdas obtidas ficaram próximos dos valores de referência.

Para a redução das perdas, foi realizada uma otimização do projeto, com redução do volume do núcleo através da técnica de AGs, e de uma mudança no material dos enrolamentos de alumínio para cobre.

Os parâmetros obtidos no processo foram implementados na nova aplicação. As simulações mostraram que as perdas no núcleo foram reduzidas e ficaram próximas do valor calculado pela otimização e que as perdas nos enrolamentos também diminuíram com a mudança de material. Por consequência, o equipamento passou da classe de eficiência C para a A. Além disso, houve um aumento da impedância do dispositivo, que contribui para a redução dos níveis de curto-circuito do sistema ao qual o mesmo estará conectado. Também houve uma redução do percentual de regulação de tensão, deixando a tensão de alimentação da carga ainda menos sensível à sua variação. Em contrapartida, houve um aumento da relação X/R, reduzindo o amortecimento da componente contínua da corrente de curto-circuito.

Uma análise de *payback* foi realizada e mostrou que o investimento, inicialmente maior para o novo projeto, se paga em um período pouco superior a quatro anos e meio. Após

esse tempo, o cliente passa a economizar dinheiro com o aumento da eficiência através da redução do consumo. Dentro de um horizonte de 20 anos de vida útil, a aquisição mostra-se indicada. A parte vendedora pode usar como estratégias de convencimento ao comprador, além do argumento técnico sobre o nível de eficiência, o comercial de retorno do capital empregado na compra.

Com os resultados validados através das simulações e com o estudo de viabilidade comercial realizado através da análise de *payback*, o projeto sugerido torna-se apto a ser implementado na prática.

Como sugestões para trabalhos futuros possíveis estão a análise térmica do equipamento e a influência da ventilação forçada no incremento da potência nominal, a simulação de descargas parciais utilizando o cobre como condutor dos enrolamentos, a implementação de um projeto híbrido, que utilize condutores de alumínio e cobre na mesma aplicação, e a alteração da configuração do núcleo de envolvido para envolvente. Também se pode pensar na inclusão do efeito das camadas isolantes entre as chapas de Aço Silício do núcleo e dos enrolamentos das bobinas e a simulação na interface 3D para efeitos de comparação com o modelo 2D verificado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14039:2003 - Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2021.
- [2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5410:2004 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004.
- [3] SILVA, C. J., 2010. **Comportamento de Transformadores para Fenômenos Eletromagnéticos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [4] MARTINS, H. J. A., 2007. **Diagnóstico de Transformadores de Potência Através de Metodologias no Domínio da Frequência**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [5] MEHTA, H. D.; PATEL, R. "Optimal Design of Transformer using Tournament Selection based Elitist Genetic Algorithms", **Indian Journal of Science and Technology** v. 8, n. 12, pp. 1-9, Jun. 2015.
- [6] KUL, S.; TEZCAN, S. S.; DUYSAK, H. *et al.* "FEM-based Modeling and Optimization of Dry-Type Transformers with Metaheuristic Algorithms", **Tehnički vjesnik – Technical Gazette** v. 29, n. 5, pp. 1678-1685, Set. 2022.
- [7] PHAENGKIEO, D.; RUANGSINCHAIWANICH, S. "Design Optimization of Electrical Transformer using Genetic Algorithm", **17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, 22-25, Hangzhou, China, Out. 2014.
- [8] KHATRI, A.; MALIK, H.; RAHI, O. P. "Optimal Design of Power Transformer Using Genetic Algorithm", **International Conference on Communication Systems and Network Technologies**, Rajkot, Gujrat, India, Mai. 2012.
- [9] MULLER, G. M., 2010. **Despacho de Máquinas e Geração de Usina Hidrelétrica Individualizada Utilizando Algoritmos Genéticos**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- [10] SIEMENS ENERGY. **Apresentação – GEAFOL Lite – Lançamento da Linha Lite**. Jundiaí, 2020.
- [11] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas – Com Introdução à Eletrônica de Potência**. 6 ed. Porto Alegre, Bookman, 2006.
- [12] AGUIAR, E. R., 2007. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. Dissertação de M.Sc., Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- [13] SILVA, L. F. N., 2015 **Aspectos Construtivos de Transformadores Trifásicos para Redes Aéreas de Distribuição**. Boletim Informativo do Grupo de Estudo da Qualidade da Energia Elétrica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, SP, Brasil.
- [14] CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5 ed. Porto Alegre, McGraw- Hill, 2013.
- [15] STEVENSON JR., W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2 ed. São Paulo, McGraw-Hill., 1986.
- [16] INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Aula 13 – Circuitos 2 – Engenharia**. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_13_-_Circuitos_2_-_Engenharia>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.
- [17] MESH ENGENHARIA. **Paralelismo em Transformadores Trifásicos**. Disponível em: <<https://meshengenharia.com/2022/11/29/paralelismo-em-transformadores-trifasicos/>>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.
- [18] GUEDES, M. V. **Transformadores – Ligações e Esfasamentos**. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Porto, 2004.
- [19] MARDEGAN, C. **Capítulo X: Proteção de Transformadores – Parte II**. O Setor Elétrico, 2010.

[20] SIEMENS ENERGY. **Convincing Technology Creates Compact Performance – The GEAFOL Neo: The Optimum Foundation for Power Distribution As Well As Static Converter Applications.** Erlangen, 2021.

[21] VECCHIO, R. M. D.; POULIN, B.; FEGHALI, P.T. *et al.* **Transformer Design Principles – With Applications to Core-Form Power Transformers.** 1 ed. Florida, CRC Press, 2002.

[22] SIEMENS ENERGY. **Geafol Cast-Resin Transformers.** Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/br/portugues/solucoes/power-transmission/portfolio/transformadores/transformadores-geafol.html>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[23] KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S.A. **Transformer Engineering – Design and Practice.** 1 ed. New York, Marcel Dekker, 2004.

[24] COMKAP TECNOLOGIA COMERCIAL. **Ventilação Forçada para Transformador a Seco.** Disponível em: <<https://www.comkap.net/produtos/c/9/25/ventilacao-forcada-para-transformador-seco>>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

[25] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR IEC 60529:2017 - Graus de Proteção Providos por Invólucros (Códigos IP).** 2 ed. Rio de Janeiro, 2017.

[26] ROMAGNOLE. **O Fator K nos Transformadores a Seco.** Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/noticias/o-fator-k-nos-transformadores-a-seco/>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[27] BOYLESTAD, R. L. **Introdução à Análise de Circuitos.** 10 ed. São Paulo, Pearson, 2003.

[28] BELKASIM, M., 2008. **Identification of Loss Models from Measurements of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets.** Dissertação de M.Sc., Faculdade de

Eletrônica, Comunicações e Automação da Universidade de Tecnologia de Helsinki. Helsinki, Finlândia.

[29] ZHAO, L.; HU, X.; BI, Z. *et al.* “Calculation of Core Loss Under Distorted Flux Density with Minor Hysteresis Loops for Laminated Steel Structure”. **AIP Advances** **10**, n. 075001, pp. 1-7, Jul. 2020.

[30] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5356-11:2016 – Transformadores de potência – Parte 11: Transformadores do tipo seco - Especificação**. 1 ed. Rio de Janeiro, 2016.

[31] COMPANHIA ENERGÉTICA DE BRASÍLIA. **Norma Técnica de Distribuição – Transformador a Seco - Especificação**. 3 ed. Brasília, 2014.

[32] SIEMENS ENERGY. **Placa de Identificação – Template Exemplo**. Jundiaí, 2015.

[33] Allegheny Technologies Incorporated. **Technical Data Sheet – Grain-Oriented Electrical Steel**. Leechburg, 2012.

[34] ANSYS. **User’s Guide – Maxwell 2D**. Canonsburg, 2010.

[35] MADE-IN-CHINA. **Catálogo de Produto – Aço Silício**. Disponível em <https://pt.made-in-china.com/category23_Metallurgy-Mineral-Energy/Silicon-Steel_1.html>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[36] DAVIS, J. R. **Alloying: Understanding the Basics**. 1 ed. Ohio, ASM International, 2001.

[37] MARKETS INSIDER. **Aluminium Price**. Disponível em <<https://markets.businessinsider.com / commodities/aluminum-price>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[38] ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. **Periodic Table - Copper**. Disponível em <<https://www.rsc.org/periodic-table/element/29/copper>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[39] MARKETS INSIDER. **Copper Price**. Disponível em <<https://markets.businessinsider.com/commodities/copper-price>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[40] DECORLUX. **Quando usar: Condutores de cobre e alumínio**. Disponível em: <<https://www.decorlux.com.br/qual-o-melhor-condutor-cobre-ou-aluminio/#:~:text=O%20cobre%20possui%20uma%20resistividade,el%C3%A9tricos%20ao%20longo%20do%20tempo>>. Acesso em: 06 de novembro de 2023.

[41] SIEMENS. **GEAFOL: Excelência em Eficiência Energética**. Jundiaí, 2015.

[42] POLYCARPOU, A. C. **Introduction to the Finite Element Method in Electromagnetics**. 1 ed. Engomi, Morgan & Claypool, 2006.

[43] HAYT JR., W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8 ed. Porto Alegre, McGraw-Hill, 2012.

[44] SALON, S. J. **Finite Element Analysis of Electrical Machine**. 1 ed. New York, Springer Science + Business Media, 1995.

[45] COLEY, D. A. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. 1 ed. Singapore, World Scientific, 1999.

[46] MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms**. 1 ed. Massachusetts, MIT Press, 1996.

[47] SECCHI, A. R. **Notas de Aula – Algoritmos Genéticos: Parte 2**. Novembro de 2004. Disponível em <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ897/Naturais/aulas_piloto/aula4.pdf>. Acesso em: 17 de dezembro de 2022.

[48] OTERO, J. A. B., 2016 **Algoritmos Genéticos Aplicados à Solução do Problema Inverso Biomagnético**. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Processamento de Sinais, Automação e Robótica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

APÊNDICE A

ELEMENTOS FINITOS E ALGORITMOS GENÉTICOS

Neste apêndice, são apresentados os conceitos e equacionamentos do M.E.F. para análises bidimensionais no Eletromagnetismo, utilizando o Método de Galerkin. Também são apresentados os principais operadores e indicadores de parametrização dos AGs.

A.1. ELEMENTOS FINITOS

A.1.1. Definição do método

De acordo com POLYCARPOU [42], o M.E.F. é um método utilizado na resolução de problemas constituídos por equações diferenciais e condições de contorno. O conceito é representar o domínio através da divisão em subdomínios menores. Eles podem assumir diversas formas, sendo a mais comum delas a triangular, como mostra a Figura 82.

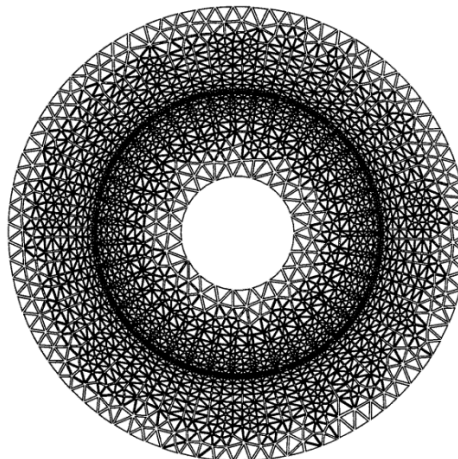


Figura 82 - Malha de elementos finitos usando triângulos [44].

As quantidades previamente desconhecidas no interior desses elementos são interpoladas com base nos valores nos nós ou arestas. As funções de interpolação são polinômios e a precisão da solução depende da ordem desses polinômios. A solução é obtida através da resolução de um sistema de equações lineares.

Existem dois métodos utilizados na resolução dessas equações diferenciais: o Método Variacional e o Método de Galerkin. Este último consiste em resíduos ponderados, apresenta uma abordagem matemática menos complexa e por isso foi escolhido para ser abordado nesse trabalho. Conforme afirma POLYCARPOU [42], o objetivo é minimizar o resíduo na aproximação da solução de uma equação diferencial válida para um domínio, e no final encontrar os valores dos nós ou arestas, inicialmente desconhecidos. Essa minimização é obtida através da multiplicação do resíduo por uma função de ponderação e pela integração ao longo do domínio. O resultado desta integração deverá ser zero.

Um sistema de equações algébricas é obtido, possibilitando que se encontrem as amplitudes desconhecidas inicialmente. As funções de interpolação devem ser deriváveis até a maior ordem presente na equação diferencial e devem atender às condições de fronteira do problema.

As etapas resumidas do Método de Galerkin para a solução de um problema de condições de contorno através do M.E.F. são [42]:

- Discretização do domínio, utilizando elementos finitos;
- Escolha de funções de interpolação (de forma) adequadas;
- Obtenção das equações lineares correspondentes para um único elemento;
- Montagem do sistema matricial global de equações através da listagem de todos os elementos;
- Imposição das condições de contorno, também conhecidas como condições de Dirichlet;
- Resolução do sistema linear de equações, utilizando técnicas de álgebra linear;
- Pós-processamento dos resultados.

A.1.2.Elementos Finitos aplicados ao Eletromagnetismo

A.1.2.1. Abordagem bidimensional

As equações de Maxwell em suas formas diferenciais podem ser observadas abaixo [43]:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (156)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (157)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (158)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (159)$$

onde:

$\vec{E}$ – Vetor campo elétrico em V/m;

$\vec{D}$ – Vetor densidade de fluxo elétrico em C/m²;

$\vec{B}$ – Vetor densidade de fluxo magnético em T;

$\vec{H}$ – Vetor intensidade de campo magnético em A/m;

$\vec{J}$ – Vetor densidade de corrente em A/m²;

ρ – Densidade de carga em C/m³.

Para definir as diferentes relações entre os vetores de campo, as seguintes equações devem ser consideradas para formarem o sistema completo:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (160)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (161)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (162)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (163)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (164)$$

onde:

ϵ – Permissividade elétrica do meio em F/m;

ϵ_0 – Permissividade elétrica no vácuo, igual a $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m;
 ϵ_r – Permissividade elétrica relativa entre o meio e o vácuo;
 μ – Permeabilidade magnética do meio em H/m;
 μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo, igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m;
 μ_r – Permeabilidade magnética relativa entre o meio e o vácuo;
 σ – Condutividade elétrica em S/m;
 $\vec{A}$ – Vetor potencial magnético em Wb/m.

Substituindo as equações (161), (163) e (164) na equação (159), e supondo a corrente fluindo na direção do eixo z e o domínio de interesse Ω estabelecido no plano xy, tem-se a equação de Poisson, dada por:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -J + j\omega\sigma A \quad (165)$$

O resíduo R é dado por uma função de aproximação expressa por:

$$R = \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial y^2} + J - j\omega\sigma \hat{A} \quad (166)$$

De acordo com SALON [44], quando o resíduo tende à zero, aproxima-se da solução exata. Multiplicando o resíduo pela função de ponderação W, integrando no domínio de interesse e igualando a zero, tem-se:

$$\int_{\Omega} RW \, dx \, dy = 0 \quad (167)$$

Substituindo a equação (166) na (167), tem-se:

$$-\iint_{\Omega} W \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial y^2} \right) dx \, dy + j\omega\sigma \iint_{\Omega} W \hat{A} \, dx \, dy = \iint_{\Omega} W J \, dx \, dy \quad (168)$$

Integrando-se o primeiro termo por partes, ter-se-á:

$$\iint_{\Omega} W \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 \hat{A}}{\partial y^2} \right) dx \, dy = \iint_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial \hat{A}}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial \hat{A}}{\partial y} \right) dx \, dy - \oint_C \frac{1}{\mu} W \frac{\partial \hat{A}}{\partial n} \, dc \quad (169)$$

onde o último termo está sobre a fronteira C com $\hat{n}$ sendo o vetor normal unitário que aponta para fora.

Substituindo o resultado da equação (169) na equação (168), desmembrando a integral de superfície em pequenas áreas triangulares e substituindo a integral sobre todo o domínio pela soma das integrais dos elementos finitos triangulares individuais, tem-se:

$$\sum_M \left\{ \frac{1}{\mu^e} \iint_{\Omega_e} \frac{\partial W^e}{\partial x} \frac{\partial \hat{A}^e}{\partial x} + \frac{\partial W^e}{\partial y} \frac{\partial \hat{A}^e}{\partial y} \right\} dx dy + j\omega\sigma^e \iint_{\Omega_e} W^e A^e dx dy - \frac{1}{\mu^e} \frac{\partial \hat{A}^e}{\partial \hat{n}} \oint_C W^e dc = \iint_{\Omega_e} J^e W^e dx dy \quad (170)$$

A integral de linha da equação (170) só deve ser avaliada em elementos que possuem um lado em comum com a condição de contorno do problema. Normalmente essa integral resulta em zero, aplicando-se a condição de fronteira natural, onde $\frac{\partial \hat{A}}{\partial \hat{n}} = 0$. Isso significa que as linhas de campo magnético são perpendiculares a fronteiras sem restrições.

Os vértices do triângulo da Figura 83, em sentido anti-horário, representam nós com vetores potenciais desconhecidos e que serão calculados.

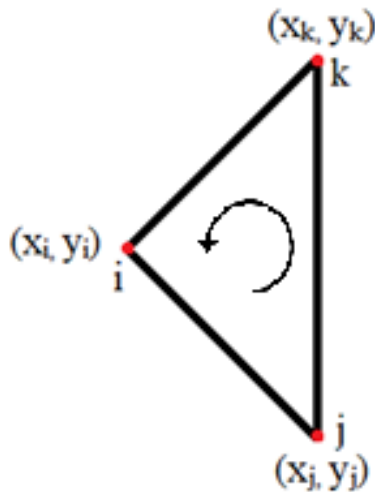


Figura 83 - Elemento finito triangular de primeira ordem.

Assumindo que o potencial varia linearmente no elemento, é possível fazer uma aproximação do vetor potencial em algum ponto do triângulo como:

$$\hat{A} = C_1 + C_2x + C_3y \quad (171)$$

onde C_1 , C_2 e C_3 são constantes a serem determinadas. Se o vetor potencial varia linearmente, então a densidade de fluxo magnético é constante.

Para os três nós, têm-se:

$$\hat{A}_i = C_1 + C_2x_i + C_3y_i \quad (172)$$

$$\hat{A}_j = C_1 + C_2x_j + C_3y_j \quad (173)$$

$$\hat{A}_k = C_1 + C_2x_k + C_3y_k \quad (174)$$

Usando a Regra de Cramer, têm-se:

$$C_1 = \frac{\hat{A}_i \begin{vmatrix} x_j & y_j \\ x_k & y_k \end{vmatrix} + \hat{A}_j \begin{vmatrix} x_k & y_k \\ x_i & y_i \end{vmatrix} + \hat{A}_k \begin{vmatrix} x_i & y_i \\ x_j & y_j \end{vmatrix}}{2\Delta} \quad (175)$$

$$C_2 = \frac{\hat{A}_i \begin{vmatrix} 1 & y_j \\ 1 & y_k \end{vmatrix} + \hat{A}_j \begin{vmatrix} 1 & y_i \\ 1 & y_k \end{vmatrix} + \hat{A}_k \begin{vmatrix} 1 & y_j \\ 1 & y_i \end{vmatrix}}{2\Delta} \quad (176)$$

$$C_3 = \frac{\hat{A}_i \begin{vmatrix} 1 & x_j \\ 1 & x_k \end{vmatrix} + \hat{A}_j \begin{vmatrix} 1 & x_k \\ 1 & x_i \end{vmatrix} + \hat{A}_k \begin{vmatrix} 1 & x_i \\ 1 & x_j \end{vmatrix}}{2\Delta} \quad (177)$$

onde Δ é a área do triângulo.

Assim, a aproximação do vetor potencial é dada por:

$$\hat{A} = \frac{(a_i + b_i x + c_i y)\hat{A}_i + (a_j + b_j x + c_j y)\hat{A}_j + (a_k + b_k x + c_k y)\hat{A}_k}{2\Delta} \quad (178)$$

onde:

$$a_i = x_j y_k - y_j x_k \quad (179)$$

$$b_i = y_j - y_k \quad (180)$$

$$c_i = x_k - x_j \quad (181)$$

$$a_j = x_k y_i - y_k x_i \quad (182)$$

$$b_j = y_k - y_i \quad (183)$$

$$c_j = x_i - x_k \quad (184)$$

$$a_k = x_i y_j - y_i x_j \quad (185)$$

$$b_k = y_i - y_j \quad (186)$$

$$c_k = x_j - x_i \quad (187)$$

Os coeficientes dos potenciais nodais são chamados de funções de forma. Assim, tem-se:

$$\hat{A} = \sum_{p=1}^m N_p(x,y) \hat{A}_p \quad (188)$$

onde m é a quantidade de nós do elemento e N_p são as funções de forma. Existem duas propriedades importantes dessas funções: N_p é 1 no nó p e 0 nos demais, além da soma de todas as funções de forma em algum ponto do triângulo ser 1.

Escrevendo na forma matricial, tem-se:

$$\hat{A}^e = (N_i^e, N_j^e, N_k^e) \begin{pmatrix} \hat{A}_i^e \\ \hat{A}_j^e \\ \hat{A}_k^e \end{pmatrix} \quad (189)$$

onde:

$$N_i^e = \frac{(a_i^e + b_i^e x + c_i^e y)}{2\Delta} \quad (190)$$

$$N_j^e = \frac{(a_j^e + b_j^e x + c_j^e y)}{2\Delta} \quad (191)$$

$$N_k^e = \frac{(a_k^e + b_k^e x + c_k^e y)}{2\Delta} \quad (192)$$

O Método de Galerkin se caracteriza pelo fato de a função de ponderação escolhida ser igual à função de forma. Assim, tem-se:

$$W^e = \begin{pmatrix} N_i^e \\ N_j^e \\ N_k^e \end{pmatrix} \quad (193)$$

Tomando as derivadas em relação a x e a y, têm-se:

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} (b_i^e, b_j^e, b_k^e) \begin{pmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{A}_j \\ \hat{A}_k \end{pmatrix} \quad (194)$$

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} (c_i^e, c_j^e, c_k^e) \begin{pmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{A}_j \\ \hat{A}_k \end{pmatrix} \quad (195)$$

$$\frac{\partial W^e}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} b_i^e \\ b_j^e \\ b_k^e \end{pmatrix} \quad (196)$$

$$\frac{\partial W^e}{\partial y} = \frac{1}{2\Delta} \begin{pmatrix} c_i^e \\ c_j^e \\ c_k^e \end{pmatrix} \quad (197)$$

Substituindo as equações (193), (194), (195), (196) e (197) na equação (170) e sabendo que:

$$\iint dx dy = \Delta \quad (198)$$

Tem-se para o primeiro termo da equação:

$$\frac{1}{\mu^e} \iint_{\Omega_e} \left(\frac{\partial W^e}{\partial x} \frac{\partial \hat{A}^e}{\partial x} + \frac{\partial W^e}{\partial y} \frac{\partial \hat{A}^e}{\partial y} \right) dx dy = \frac{1}{4\mu^e \Delta} \begin{pmatrix} b_i^2 + c_i^2 & b_i b_j + c_i c_j & b_i b_k + c_i c_k \\ b_i b_j + c_i c_j & b_j^2 + c_j^2 & b_j b_k + c_j c_k \\ b_i b_k + c_i c_k & b_j b_k + c_j c_k & b_k^2 + c_k^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{A}_j \\ \hat{A}_k \end{pmatrix} \quad (199)$$

A matriz de coeficientes acima é conhecida como matriz de rigidez S.

Para a segunda integral da equação (170), tem-se:

$$j\omega\sigma^e \iint_{\Omega_e} W^e \hat{A}^e dx dy = j\omega\sigma^e \iint_{\Omega_e} \begin{pmatrix} N_i^e \\ N_j^e \\ N_k^e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_i^e & N_j^e & N_k^e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{A}_j \\ \hat{A}_k \end{pmatrix} dx dy =$$

$$\frac{j\omega\sigma^e \Delta}{12} \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{A}_i \\ \hat{A}_j \\ \hat{A}_k \end{pmatrix} \quad (200)$$

Essa matriz de coeficientes acima é conhecida como matriz de massa T.

O terceiro termo da equação (170) é zerado através da aplicação da condição de contorno natural. Assumindo J^e como sendo constante ao longo do triângulo, pode-se desenvolver a expressão da seguinte maneira:

$$\iint_{\Omega_e} W^e J^e dx dy = J^e \iint_{\Omega_e} \frac{(a_i + b_i x + c_i y)}{2\Delta} dx dy = J^e \frac{(a_i + b_i \bar{x} + c_i \bar{y})}{2} \quad (201)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{3}(x_i + x_j + x_k) \quad (202)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{3}(y_i + y_j + y_k) \quad (203)$$

Sendo $\bar{x}$ e $\bar{y}$ as coordenadas do centróide do triângulo.

Substituindo as equações (179), (180) e (181) na equação (201), tem-se:

$$J^e \frac{\Delta}{3} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (204)$$

O sistema pode ser matricialmente resumido da seguinte forma:

$$[S + T][A] = [J] \quad (205)$$

onde:

[S] – Matriz de rigidez m x m, onde m é o número de nós;

[T] – Matriz de massa;

[A] – Matriz dos potenciais vetores magnéticos nos nós;

[J] – Matriz do vetor excitação – densidade de corrente, de dimensão m.

Uma vez que as matrizes são encontradas para cada elemento, elas são utilizadas para comporem a matriz global do sistema. Para um problema com m nós, começa-se com uma matriz inicial m x m. Em seguida, passa-se por cada elemento e adicionam-se os termos dos nós adjacentes, formando a matriz global. O resultado terá uma matriz global esparsa, simétrica e singular. É possível verificar através das Figuras 84 e 85 uma exemplificação para a formação de um sistema com 2 elementos triangulares.

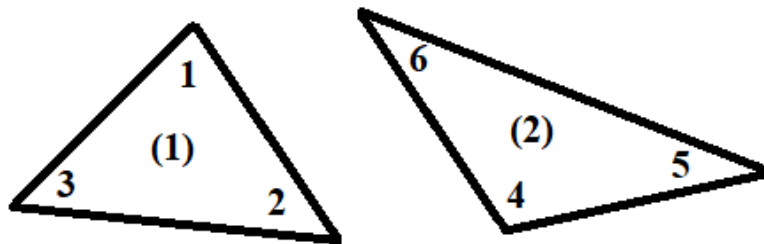


Figura 84 - Elementos finitos triangulares individuais.

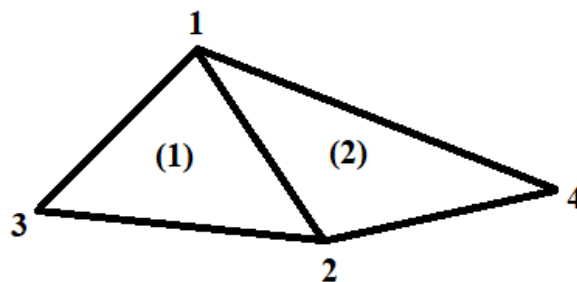


Figura 85 - Elementos finitos triangulares agrupados.

As matrizes S de cada elemento seriam dadas por:

$$S^{(1)} = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} & S_{12}^{(1)} & S_{13}^{(1)} \\ S_{21}^{(1)} & S_{22}^{(1)} & S_{23}^{(1)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (206)$$

$$S^{(2)} = \begin{bmatrix} S_{44}^{(2)} & S_{45}^{(2)} & S_{46}^{(2)} \\ S_{54}^{(2)} & S_{55}^{(2)} & S_{56}^{(2)} \\ S_{64}^{(2)} & S_{65}^{(2)} & S_{66}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (207)$$

Já a matriz do sistema global seria dada por:

$$S^{(1,2)} = \begin{bmatrix} S_{11}^{(1)} + S_{66}^{(2)} & S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{13}^{(1)} & S_{65}^{(2)} \\ S_{12}^{(1)} + S_{64}^{(2)} & S_{22}^{(1)} + S_{44}^{(2)} & S_{23}^{(1)} & S_{45}^{(2)} \\ S_{31}^{(1)} & S_{32}^{(1)} & S_{33}^{(1)} & 0 \\ S_{56}^{(2)} & S_{54}^{(2)} & 0 & S_{55}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (208)$$

Sobre as condições de contorno, existem duas básicas gerais que devem ser aplicadas em problemas como esse: a condição homogênea de Neumann (condição natural de contorno) e a condição de Dirichlet.

A condição de contorno natural é obtida aplicando-se $\frac{\partial \hat{A}}{\partial \hat{n}} = 0$ e eliminando a integral de linha da equação (170), conforme visto anteriormente.

A condição de contorno de Dirichlet pode ser homogênea ou não homogênea. A primeira é obtida especificando o potencial como sendo constante ao longo da fronteira (equipotencial) e igual a 0. Assim, as linhas de fluxo são paralelas às fronteiras. O valor do potencial deve ser especificado em pelo menos um ponto do problema para existir uma solução única.

Já a condição de Dirichlet não homogênea pode ser usada para provocar um fluxo φ entre dois limites que não se tocam. Assumindo que não há variação de fluxo na direção z, ele pode ser calculado através de:

$$\varphi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{S} = \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} = L(A_2 - A_1) \quad (209)$$

onde L é a distância entre as duas fronteiras na direção z.

A.2. ALGORITMOS GENÉTICOS

A.2.1. Visão geral

Conforme afirma COLEY [45], são técnicas de otimização baseadas na seleção natural e na evolução. Os principais operadores desses métodos são: seleção, cruzamento e mutação [46]. Eles são bastante utilizados em problemas não lineares multiobjetivos.

É gerado inicialmente um conjunto de indivíduos aleatórios, que compõem uma determinada população. Cada um desses indivíduos é avaliado através de um índice que estabelece quais deles são mais capazes de se adaptarem às condições estabelecidas. Um percentual dos melhores classificados é mantido e os piores são eliminados. Esses indivíduos selecionados são encaminhados para a reprodução, onde se cruzam entre si, dando origem a descendentes que vão formar a população da geração seguinte. Eles também podem sofrer mutações, com o objetivo de mudar algumas de suas características para ampliar a diversidade que vai pautar as populações. Após muitas iterações, também chamadas de gerações, serão encontrados os indivíduos mais aptos possíveis, obedecendo a critérios de restrição e de parada e a condições de contorno [47].

Cada indivíduo é composto por um código binário, que representa o seu genótipo, também chamado de cromossomo. O gene 0 representa a ausência de uma característica e o 1 a presença.

A.2.2. Seleção

A.2.2.1. Método da roleta

De acordo com SECCHI [47], nesse método, os indivíduos da população são expressos na roleta de acordo com a sua aptidão, como mostra a Tabela 10. Aqueles com maior

aptidão, possuem uma maior possibilidade de serem sorteados. Essa probabilidade de seleção é dada pelo quociente entre a aptidão do indivíduo e o somatório das aptidões de todos os indivíduos presentes no sorteio. Assim, uma faixa favorável é então atribuída para cada indivíduo, conforme essa probabilidade.

Tabela 10 - Aptidão por indivíduo.

Indivíduo	Aptidão	Probabilidade de Seleção	Faixa Favorável
1	7,9	20%	0 - 0,20
2	10,1	25%	0,20 - 0,45
3	5,7	14%	0,45 - 0,59
4	4,9	12%	0,59 - 0,71
5	11,4	29%	0,71 - 1,00
Total	40	100%	-

Números entre 0 e 1 são gerados aleatoriamente e sorteados por um número determinado de vezes, como mostra a Tabela 11. A fração sorteada e a probabilidade de seleção tendem a ser próximas quando há um gerador de números aleatórios não viciado e quando há uma quantidade elevada de sorteios, como mostra a Figura 86 [47]. O exemplo abaixo mostra o esquema de seleção por roleta em uma população de 5 indivíduos, com 10 sorteios.

Tabela 11 - Geração aleatória de números.

Número Gerado	Indivíduo Associado
0,52	3
0,95	5
0,15	1
0,34	2
0,63	4
0,1	1
0,8	5
0,23	2
0,97	5
0,4	2

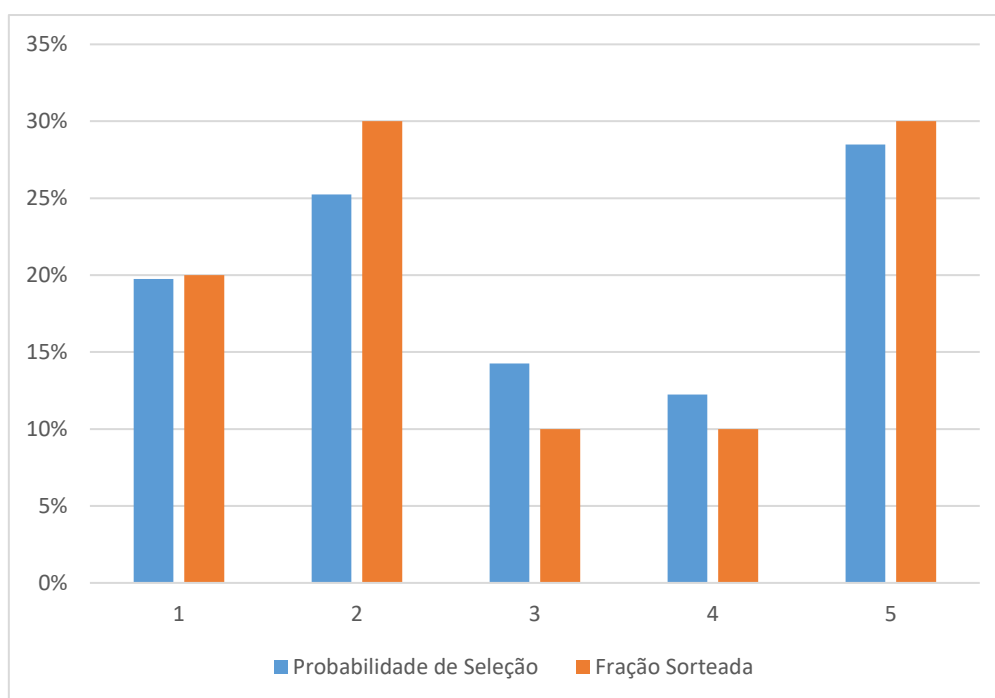


Figura 86 - Gráfico de probabilidades de seleção e fração sorteada para cada indivíduo.

A.2.2.2. Método do torneio

O segundo método é mais simples: dois indivíduos são sorteados randomicamente com a mesma probabilidade e são comparadas suas aptidões. O mais apto é selecionado para ser progenitor das gerações subsequentes. A Tabela 12 mostra a seleção por torneio.

Tabela 12 - Seleção por torneio.

Indivíduo	Aptidão	Torneio	Vencedor
1	7,9	4 x 1	1
2	10,1	3 x 2	2
3	5,7	2 x 1	2
4	4,9	3 x 4	3

A.2.3 Cruzamento

Esse operador realiza trocas de genes entre dois indivíduos. Os pais oriundos da seleção vão dar origem a dois novos indivíduos, que por sua vez terão seu genótipo formado pela recombinação das informações dos genitores. O objetivo é gerar novos indivíduos cada

vez mais aptos. Os principais tipos de cruzamento são o com um ponto de corte, com dois pontos de corte e uniforme [48].

A.2.3.1. Com um ponto de corte

Os filhos são originados através da recombinação dos genes dos pais ao redor de um único ponto de corte, determinado randomicamente, como mostra o esquema da Figura 87.

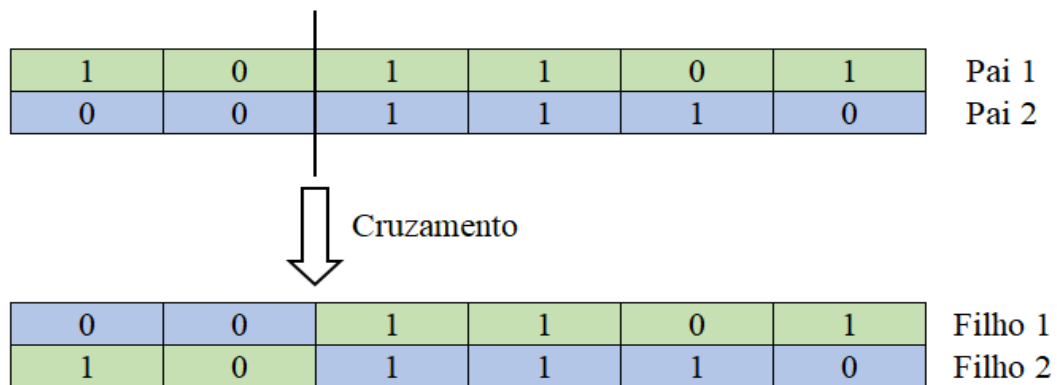


Figura 87 - Cruzamento com um ponto de corte.

A.2.3.2 Com dois pontos de corte

Os filhos são originados através da recombinação dos genes dos pais ao redor de dois pontos de corte, determinados randomicamente, como mostra o esquema da Figura 88.

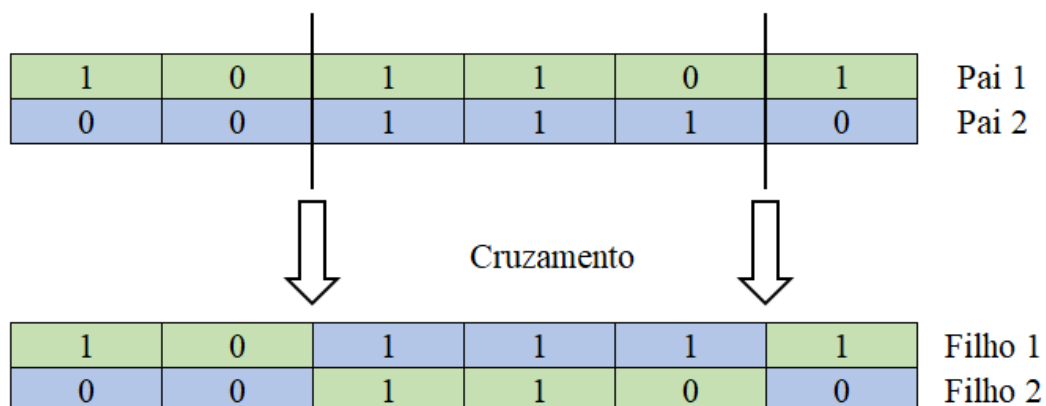


Figura 88 - Cruzamento com dois pontos de corte.

A.2.3.3 Uniforme

Os filhos são originados por meio da recombinação dos genes dos pais, conforme valores de uma máscara binária gerada randomicamente, como mostra o esquema da Figura 89.

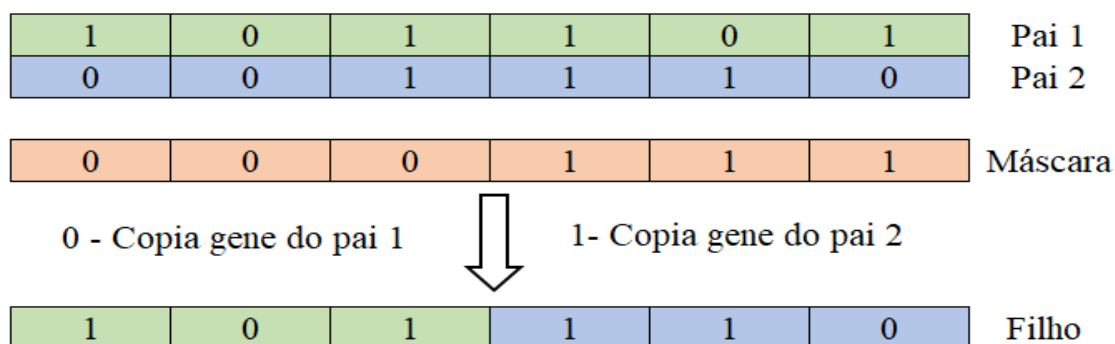


Figura 89 - Cruzamento uniforme.

A.2.4 Mutação

Esse operador insere alterações randômicas em regiões específicas do genótipo do indivíduo, de acordo com uma determinada probabilidade [47]. Ajuda a manter a diversidade genotípica, inserindo novos tipos de indivíduos na população, além de possibilitar que genes eliminados através das gerações voltem à população e sejam analisados dentro de novos cenários. A Figura 90 mostra um esquema de mutação.

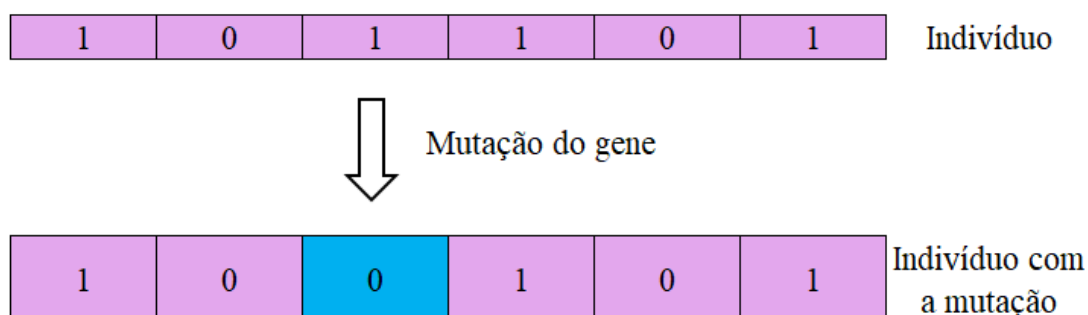


Figura 90 - Mutação no genótipo.

A.2.5. Parametrização do processo

O ajuste adequado dos parâmetros influencia no desenvolvimento e na convergência do algoritmo. De acordo com OTERO [48], os principais pontos a serem configurados são:

- Tamanho da população

Uma população com uma quantidade maior de indivíduos proporciona um alcance mais amplo do espaço de busca e evita uma convergência antecipada para ótimos locais. Porém, se o número de indivíduos é muito elevado, passa-se a incorrer em um esforço de processamento de igual proporção.

- Taxa de cruzamento

É a probabilidade de recombinação entre indivíduos. A velocidade com que novos indivíduos sejam incluídos através das gerações é mais elevada quanto maior for essa taxa. Se essas taxas forem muito altas, as populações podem ser inteiramente substituídas a cada geração, incluindo elementos de elevada aptidão. Entretanto, taxas de cruzamento reduzidas implicam no aumento do tempo de convergência para uma solução factível.

- Taxa de mutação

É a probabilidade de alteração de um gene do genótipo de um indivíduo. Essa taxa ajuda a promover a diversidade populacional, acelerando a evolução. Todavia, taxas muito elevadas também não são benéficas, uma vez que a procura pela solução ótima se tornaria predominantemente randômica, atrapalhando a convergência.

- Número de gerações

Representa o número máximo iterações. Um número pequeno de gerações pode fazer com que o processo de evolução seja paralisado muito cedo, gerando soluções não ótimas. Contudo, valores elevados requerem um maior trabalho computacional.

- Critérios de parada

O número máximo de gerações e a baixa variação entre as soluções encontradas são os principais aspectos levados em conta na paralisação do algoritmo. Considera-se um

algoritmo bem sucedido aquele que minimiza ou maximiza as funções objetivos, aponta indivíduos factíveis e respeita as restrições e as condições de contorno do problema, dentro de uma faixa de tolerância.