

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo Anderson Silva

**DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA DE UM TRANSFORMADOR  
TRIFÁSICO IMERSO EM ÓLEO**

Florianópolis  
2023

Gustavo Anderson Silva

**DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA DE UM TRANSFORMADOR  
TRIFÁSICO IMERSO EM ÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Universidade Federal de Santa Catarina, como  
requisito necessário para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauricio V. F. da Luz, Dr.

Florianópolis  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Gustavo Anderson  
Dimensionamento da Parte Ativa de um Transformador  
Trifásico Imerso em Óleo / Gustavo Anderson Silva ;  
orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, 2023.  
96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

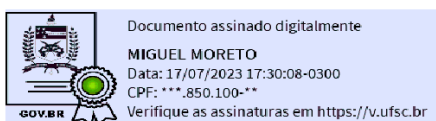
1. Engenharia Elétrica. 2. Transformadores de  
Distribuição. 3. Projeto de Transformadores de Distribuição.  
4. Núcleo empilhado circular. 5. Bobinas concêntricas. I.  
da Luz, Mauricio Valencia Ferreira . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia  
Elétrica. III. Título.

Gustavo Anderson Silva

## Dimensionamento da Parte Ativa de Um Transformador Trifásico Imerso em Óleo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

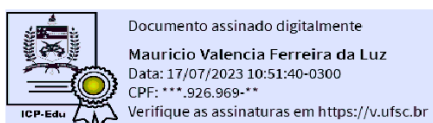
Florianópolis, 17 de julho de 2023.



---

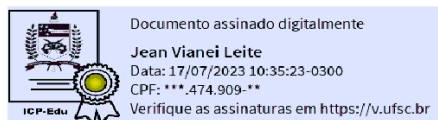
Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

### Banca Examinadora:



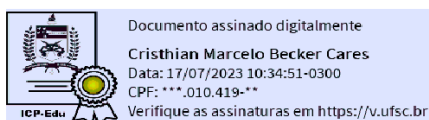
---

Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Cristhian Becker Cares, Dr.  
Universidad de Santiago de Chile

*Este trabalho é dedicado aos meus pais que,  
em todas as dificuldades encontradas neste período, estiveram e sempre estarão ao meu lado.*



---

# Agradecimentos

Este trabalho de conclusão de curso é dedicado, especialmente, aos meus pais: Alcides Silva Filho e Aparecida de Cássia Anderson Silva. Eles foram as principais pessoas que estiveram comigo durante estes anos que cursei a graduação, me deram apoio moral, econômico e acreditaram em mim quando eu mesmo não mais acreditava. Uma peça fundamental também para o desenvolvimento deste trabalho foi a minha namorada, Gabriela Fritzen, que me apoiou de maneira incessante durante todo o processo, fornecendo desde o hardware para desenvolver o trabalho, como também me deu abrigo.

Há algumas pessoas que também valem a pena serem citadas e que estiveram comigo em parte desta passagem, que foi um turbilhão de emoções. Entre estas estão os meus amigos que a faculdade trouxe, Luís Eduardo Oliveira Broering, o Robson Felisberto, o Jesué Liberato, o Leandro Lofy e o Diogo Hachmann.

Na empresa a qual tenho orgulho de trabalhar e que serviu de base para a motivação deste trabalho, algumas pessoas também foram fundamentais para o meu desenvolvimento profissional, cito aqui a Laura Tridapalli, por ter me dado a oportunidade de trabalhar na maior empresa de equipamentos elétricos do país, o Jair Anisio Maso, especialista em transformadores, profissional de excelência e um ser humano incrível, o Édipo Cristiano Batista, excelente projetista mecânico e fornecedor de algumas das ilustrações presentes neste trabalho e ao Pedro Carvalho Silva Barcelos, responsável pelas ilustrações e pela metodologia adotada para obtenção das indutâncias de dispersão.

Por fim, gostaria de agradecer à UFSC e a alguns de seus professores, especialmente ao meu orientador e professor, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, responsável por todos os conselhos e ideias sugeridas durante o período deste trabalho.





---

## Resumo

Considerando a crescente demanda por energia e a importância estratégica dos transformadores nas diferentes partes do sistema elétrico de potência, é crucial desenvolver equipamentos cada vez mais robustos e eficientes, capazes de lidar com os desafios enfrentados no fornecimento de energia elétrica para a sociedade. Este trabalho apresenta o dimensionamento analítico da parte ativa (núcleo e enrolamentos) de um transformador trifásico de distribuição com potência aparente trifásica de 2000 kVA, grupo de ligação Dyn1, tensões de 13,8 kV no primário e 4,16 kV no secundário. A metodologia aplicada permitiu dimensionar as geometrias do núcleo e dos enrolamentos da BT e da AT. Com esse dimensionamento foi possível calcular as resistências dos enrolamentos, as indutâncias de dispersão, as perdas no núcleo e nos enrolamentos, e a massa de material tanto do núcleo quanto dos enrolamentos. O transformador dimensionado foi simulado usando o método de elementos finitos em três dimensões. Com as simulações, calculou-se a indução no núcleo e as indutâncias de dispersão da BT e da AT. Verificou-se que a indução magnética obtida numericamente ficou com um valor bem próximo da indução prevista no projeto analítico. Todavia, para os valores de indutância de dispersão, notou-se discrepâncias em torno de 13%. Estas discrepâncias nas indutâncias de dispersão ocorreram devido as hipóteses simplificadoras utilizadas no método analítico.

**Palavras-chaves:** Transformador de distribuição. Parte ativa. Núcleo ferromagnético. Enrolamentos.



---

## Abstract

Considering the growing demand for energy and the strategic importance of transformers in different parts of the electrical power system, it is crucial to develop increasingly robust and efficient equipment, capable of dealing with the challenges faced in supplying electrical energy to society. This work presents the analytical designing of the active part (core and windings) of a three-phase distribution transformer with three-phase apparent power of 2000 kVA, Dyn1 connection group, voltages of 13.8 kV in the primary and 4.16 kV in the secondary. The applied methodology allowed the design of the core and (LV and HV) winding geometries. With this design, it was possible to calculate the winding resistances, the leakage inductances, the core and winding losses, and the mass of material in both the core and the windings. The designed transformer was simulated using the finite element method in three dimensions. With the simulations, the magnetic flux density in the core and the leakage inductances of LV and HV were calculated. It was verified that the numerically obtained magnetic flux density has a value very close to the magnetic flux density foreseen in the analytical project. However, for the leakage inductance values, discrepancies around 13% were noted. These discrepancies in the leakage inductances occurred due to simplified assumptions used in the analytical method.

**Keywords:** Distribution transformer. Active part. Ferromagnetic core. Windings.

---

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Núcleo de ar - Dois enrolamentos - Operação à vazio. . . . .	32
Figura 2 – Núcleo de ar - Dois enrolamentos - Operação com carga . . . . .	33
Figura 3 – Circuito equivalente aproximado - Transformador monofásico. . . . .	35
Figura 4 – Circuito equivalente - Transformador monofásico. . . . .	36
Figura 5 – Tipos de núcleo. . . . .	37
Figura 6 – Tipos de enrolamentos. . . . .	38
Figura 7 – Tipos de isolantes. . . . .	39
Figura 8 – Esquemático de parte ativa. . . . .	40
Figura 9 – Parte ativa real. . . . .	40
Figura 10 – Técnica de bobinagem - Camadas - Condutor retangular / Condutor circular. . . . .	42
Figura 11 – Tipo de núcleo - Núcleo envolvido. . . . .	43
Figura 12 – Tipo de núcleo - Núcleo envolvente. . . . .	44
Figura 13 – Tipo de seções transversais de núcleo. . . . .	45
Figura 14 – Núcleo empilhado circular - 7 degraus. . . . .	49
Figura 15 – Tipo de condutor - Retangular. . . . .	50
Figura 16 – Tipo de condutor - Circular. . . . .	51
Figura 17 – Tipo de condutor - Condutor tipo lâmina ou chapa. . . . .	51
Figura 18 – Condutor retangular - Enrolamento de BT - Cantos arredondados. . . . .	53
Figura 19 – Condutor Retangular - Isolamento Trespasado. . . . .	53
Figura 20 – Franjamento do fluxo magnético presente nas cabeceiras dos enrolamentos. . . . .	55
Figura 21 – Papel diamantado termoestabilizado. . . . .	56
Figura 22 – Talas utilizadas para compor os canais de passagem de óleo. . . . .	58
Figura 23 – Enrolamento de AT - Isolação progressiva. . . . .	62
Figura 24 – Curva de perdas à vazio - APERAM. . . . .	67
Figura 25 – Franjamento do fluxo magnético e altura de Rogowski. . . . .	71
Figura 26 – Núcleo empilhado - 7 degraus. . . . .	75
Figura 27 – Disposição dos elementos - AT-BT. . . . .	81
Figura 28 – Planificado do núcleo com AT. . . . .	87

Figura 29 – Geometria utilizada na simulação do MEF. . . . .	90
Figura 30 – Malha 3D utilizada na simulação do MEF. . . . .	90
Figura 31 – Curva BH de aço GO usada na simulação do MEF. . . . .	91
Figura 32 – Distribuição de vetores de indução magnética no núcleo. . . . .	91



---

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classe de temperatura - Materiais isolantes. . . . .	38
Tabela 2 – Transformador trifásico - Informações. . . . .	41
Tabela 3 – Tabela de coeficientes do núcleo empilhado circular. . . . .	46
Tabela 4 – Tabela de diâmetros do núcleo empilhado circular. . . . .	47
Tabela 5 – Tabela de características do núcleo empilhado circular. . . . .	48
Tabela 6 – Fio retangular - Tabela de dimensionais - Cantos arredondados. . . . .	53
Tabela 7 – Características dos materiais condutores. . . . .	57
Tabela 8 – Permissividade elétrica relativa - Distância BT-AT. . . . .	59
Tabela 9 – Tabela AWG - Características condutores circulares. . . . .	60
Tabela 10 – Informações calculadas - Núcleo empilhado circular. . . . .	75
Tabela 11 – Cálculos ajustados - Enrolamento de BT. . . . .	77
Tabela 12 – Dimensionais dos condutores - Enrolamento de BT. . . . .	78
Tabela 13 – Dimensionais da bobina - Enrolamento de BT. . . . .	79
Tabela 14 – Dimensionais radiais do enrolamento - Enrolamento de BT. . . . .	80
Tabela 15 – Distâncias BT-AT. . . . .	81
Tabela 16 – Rigidez Dielétrica - Distância BT-AT. . . . .	82
Tabela 17 – Derivações - Enrolamento de AT. . . . .	82
Tabela 18 – Dimensionais dos condutores - Enrolamento de AT. . . . .	83
Tabela 19 – Dimensionais axiais da bobina - Enrolamento de AT. . . . .	84
Tabela 20 – Dimensionais radiais do enrolamento - Enrolamento de AT. . . . .	85
Tabela 21 – Perdas à vazão - Resultados. . . . .	88
Tabela 22 – Indutâncias de dispersão - Resultados. . . . .	92





---

## Lista de abreviaturas e siglas

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
NBR	Norma Brasileira
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CST	Comutador Sem Tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
MEF	Método de Elementos Finitos



---

## Lista de símbolos

$\vec{D}$	Densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica
$\vec{B}$	Densidade de fluxo magnético ou indução magnética
$\vec{E}$	Campo elétrico
$\vec{H}$	Campo magnético
$\vec{J}$	Densidade superficial de corrente elétrica
$\phi$	Fluxo magnético
$Q$	Carga elétrica
$\mu$	Permeabilidade magnética
$\varepsilon$	Permissividade elétrica
$\sigma$	Condutividade elétrica
$i_1(t)$	Corrente no enrolamento 1
$i_2(t)$	Corrente no enrolamento 2
$i_{c1}(t)$	Corrente de carga no enrolamento 1
$i_m(t)$	Corrente de magnetização
$i_p(t)$	Corrente de perdas no núcleo
$a$	Relação de transformação
$\phi_{11}(t)$	Fluxo magnético gerado pela corrente $i_1(t)$ no enrolamento 1
$\phi_{22}(t)$	Fluxo magnético gerado pela corrente $i_2(t)$ no enrolamento 2

$\phi_{d1}(t)$	Fluxo magnético de dispersão gerado pela corrente $i_1(t)$
$\phi_{d2}(t)$	Fluxo magnético de dispersão gerado pela corrente $i_2(t)$
$\phi_{21}(t)$	Fluxo magnético gerado pela corrente $i_1(t)$ no enrolamento 2
$\phi_{12}(t)$	Fluxo magnético gerado pela corrente $i_2(t)$ no enrolamento 1
$\phi_1(t)$	Fluxo magnético médio equivalente por espira no enrolamento 1
$\phi_2(t)$	Fluxo magnético médio equivalente por espira no enrolamento 2
$A$	Seção transversal do núcleo
$\phi(t)$	Fluxo magnético comum
$N_1$	Número de espiras no enrolamento 1
$N_2$	Número de espiras no enrolamento 2
$\vec{\nabla}$	Operador gradiente
$v_1(t)$	Tensão aplicada no enrolamento 1
$e_1(t)$	Força contraeletromotriz no enrolamento 1
$\lambda_k$	Fluxo magnético concatenado no enrolamento $k$
$L_k$	Indutância de dispersão de um enrolamento $k$
$M_{kj}$	Indutância mútua entre um enrolamento $k$ e $j$
$L_{11}$	Indutância própria do enrolamento 1
$L_{22}$	Indutância própria do enrolamento 2
$S_{fase}$	Potência complexa
$\vec{V}_{fase}$	Fasor tensão de fase
$I_{fase}^*$	Fasor corrente de fase conjugada
$S_{fase}$	Potência aparente de fase
$E_t$	Relação de Volts eficazes por espira
$N_{esp}$	Número de espiras
$K_t$	Constante atrelada à potência trifásica, corrente e tipo de utilização do transformador

$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica
$\lambda_1$	Fluxo magnético concatenado no enrolamento 1
$\phi_{Max}$	Fluxo magnético máximo na coluna central
$S_{FerroLiquida}$	Seção líquida ou eficaz transversal das colunas e culatras
$S_{FerroEmpilhada}$	Seção bruta ou empilhada das colunas e culatras
$S_{Circulo}$	Seção do círculo associada ao molde/mandril
$f$	Frequência de operação do sinal sinusoidal
$K_e$	Fator de empilhamento do núcleo
$D_{Nucleo}$	Diâmetro das colunas e culatras com empilhamento de chapas de aço-silício
$K_u$	Fator de utilização do núcleo
$L_i$	Largura do i-ésimo degrau
$E_i$	Espessura do i-ésimo degrau
$E_k$	Espessura dos degraus anteriores ao i-ésimo degrau
$S_{final}$	Seção final de montagem do núcleo
$D_{Nucleo-BT}$	Distância entre molde/mandril e enrolamento de baixa tensão
$N_{BT}$	Número de espiras da baixa tensão
$N_{AT}$	Número de espiras da alta tensão
$V_{fBT}$	Tensão de fase do enrolamento de baixa tensão
$V_{LinhaBT}$	Tensão de linha do enrolamento de baixa tensão
$I_{FaseBT}$	Corrente de fase do enrolamento de baixa tensão
$I_{LinhaBT}$	Corrente de linha do enrolamento de baixa tensão
$\alpha$	Largura do condutor retangular
$\beta$	Espessura do condutor retangular
$L_{FioRetangular}$	Largura do condutor retangular
$E_{FioRetangular}$	Espessura do condutor retangular
$Raio$	Raio dos cantos dos condutores retangulares

$S_{FioRetangular}$	Seção do condutor retangular
$J_{BT}$	Densidade superficial de corrente do enrolamento de baixa tensão
$J_{AT}$	Densidade superficial de corrente do enrolamento de alta tensão
$Isolacao$	Isolação bilateral do condutor de baixa tensão
$L_{FioIsoladoBT}$	Largura do fio isolado da baixa tensão
$L_{FioIsoladoAT}$	Largura do fio isolado da alta tensão
$E_{FioIsoladoBT}$	Espessura do fio isolado da baixa tensão
$E_{FioIsoladoAT}$	Espessura do fio isolado da alta tensão
$Achatamento$	Achatamento do condutor circular
$N_{CondAxialBT}$	Número de condutores na axial do enrolamento de baixa tensão
$N_{CondAxialAT}$	Número de condutores na axial do enrolamento de alta tensão
$N_{CondRadialBT}$	Número de condutores na radial do enrolamento de baixa tensão
$N_{CondRadialAT}$	Número de condutores na radial do enrolamento de alta tensão
$F_{AxialBT}$	Feixe axial do enrolamento de baixa tensão
$F_{AxialAT}$	Feixe axial do enrolamento de alta tensão
$F_{RadialBT}$	Feixe radial do enrolamento de baixa tensão
$F_{RadialAT}$	Feixe radial do enrolamento de alta tensão
$H_{MecanicaBT}$	Altura mecânica da BT
$H_{MecanicaAT}$	Altura mecânica da AT
$F_{CrescimentoAxial}$	Crescimento axial no enrolamento de baixa ou alta tensão
$H_{CabeceiraBT}$	Altura da cabeceira da baixa tensão
$H_{CabeceiraAT}$	Altura da cabeceira da baixa tensão
$H_{BobinaBT}$	Altura da bobina de baixa tensão
$H_{BobinaAT}$	Altura da bobina de alta tensão
$N_{CamadasBT}$	Número de camadas do enrolamento de baixa tensão
$N_{CamadasAT}$	Número de camadas do enrolamento de alta tensão

$Isolamento_{camadasBT}$	Espessura do isolamento presente entre as espiras de baixa tensão
$Isolamento_{camadasAT}$	Espessura do isolamento presente entre as espiras de alta tensão
$Isolamento_{MedioAT}$	Espessura média do isolamento progressivo feito na alta tensão
$K_i$	Fator de controle de qualidade do material isolante
$D_{InternoBT}$	Diâmetro interno do enrolamento de baixa tensão
$D_{ExternoBT}$	Diâmetro externo do enrolamento de baixa tensão
$D_{InternoAT}$	Diâmetro interno do enrolamento de alta tensão
$D_{ExternoAT}$	Diâmetro externo do enrolamento de alta tensão
$l_{MedioBT}$	Comprimento da espira média de baixa tensão
$l_{MedioAT}$	Comprimento da espira média de alta tensão
$S_{FeixeBT}$	Seção transversal do feixe da baixa tensão
$S_{FeixeAT}$	Seção transversal do feixe da alta tensão
$\rho$	Resistividade do material empregado nos enrolamentos
$R_{BT}$	Resistência do enrolamento de baixa tensão
$R_{AT}$	Resistência do enrolamento de alta tensão
$M_{BT}$	Massa das três fases do enrolamento de baixa tensão
$M_{AT}$	Massa das três fases do enrolamento de alta tensão
$E_{rdi}$	Rigidez dielétrica presente no elemento i-ésimo
$V_{Aplicada}$	Tensão aplicada de ensaio
$D_{CondutorAT}$	Diâmetro do condutor circular empregado na alta tensão
$Isolamento_{FioCircular}$	Isolamento bilateral do condutor circular empregado na alta tensão
$H_{jugo-bobina}$	Distância presente entre jugo/culatra e a bobina mais alta
$D_{entre-fases}$	Distância entre as fases de alta tensão consecutivas
$H_{Janela}$	Altura da janela do núcleo
$Entre - eixos$	Distâncias entre colunas ou eixos do núcleo
$H_{Nucleo}$	Altura do núcleo

$L_{Nucleo}$	Largura do núcleo
$p_0$	Perdas à vazio
$p_H$	Perdas associadas ao ciclo de histerese do material ferromagnético do núcleo
$p_F$	Perdas associadas às correntes de Foucault ou induzidas no núcleo
$l_{Nucleo}$	Comprimento ou caminho médio que o fluxo magnético percorre no núcleo
$Vol_{Nucleo}$	Volume do núcleo
$\rho_{aco-silicio}$	Massa específica do aço-silício
$M_{Nucleo}$	Massa total do núcleo
$W_0$	Potência à vazio requisitada pelo núcleo
$W_{BT}$	Potência dissipada por perdas ôhmicas no enrolamento de baixa tensão
$W_{AT}$	Potência dissipada por perdas ôhmicas no enrolamento de alta tensão
$K$	Fator de Rogowski
$h_K$	Altura de Rogowski
$L_{BT}$	Indutância de dispersão do enrolamento de baixa tensão
$X_{\%}$	Reatância indutiva de dispersão
$R_{BT\%}$	Resistência percentual do enrolamento de baixa tensão
$Z_{\%}$	Impedância de dispersão percentual



---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>28</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>28</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>28</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização do texto</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>31</b>
<b>2.1</b>	<b>Elementos da Parte Ativa</b>	<b>37</b>
<b>3</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DA PARTE ATIVA</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Núcleo</b>	<b>43</b>
3.1.1	Cálculo do Dimensionamento do Núcleo	45
<b>3.2</b>	<b>Enrolamentos</b>	<b>49</b>
3.2.1	Enrolamento de Baixa Tensão	52
3.2.2	Enrolamento de Alta Tensão	58
<b>4</b>	<b>CÁLCULO DE PERDAS E DA IMPEDÂNCIA</b>	<b>65</b>
<b>4.1</b>	<b>Perdas à Vazio</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>Perdas nos Enrolamentos</b>	<b>68</b>
<b>4.3</b>	<b>Impedância</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Dimensionamento do Núcleo</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Dimensionamento da BT</b>	<b>76</b>
<b>5.3</b>	<b>Dimensionamento da AT</b>	<b>81</b>
5.3.1	Cálculo das Perdas à Vazio e nos Enrolamentos	87
5.3.2	Cálculo da Impedância Percentual	89
<b>5.4</b>	<b>Simulações Usando o MEF</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>93</b>

**REFERÊNCIAS** ..... 95

---

## Introdução

O transformador é uma das máquinas elétricas existentes mais importantes na atualidade. Trata-se de um dispositivo estático fundamental para o atual sistema elétrico de potência (SEP), cuja estrutura atual é baseada na alimentação variante no tempo e idealizada por sinusoides. Kulkarni e Khaparde (2017) destaca que a função primordial destes dispositivos é a de transformação de tensão e corrente por meio de diferentes zonas de carga. Além disso, os autores ressaltam que esta máquina é, também, um dos fatores viabilizantes para o uso universal da alimentação alternada. Ademais, o transformador é o grande impulsionador da transmissão de energia elétrica a longas distâncias, pois é, por meio deste, que se tem a transmissão econômica com tensões elevadas (RIES, 2007).

Embora os transformadores sejam dispositivos com altíssimas eficiências, estima-se que, no Brasil, cerca de 15% da energia gerada é perdida, sendo que 70% desta perda ocorre nos sistemas de distribuição. Assim, segundo Salustiano, os transformadores estão inclusos e são responsáveis por grande parte desta perda de energia. Desta forma, ao realizar um projeto de transformador, faz-se necessário ponderar diversos fatores atrelados a um problema de compromisso que deve levar em consideração características especificadas pelo cliente, como exemplo, classes de tensão dos 2 (ou mais) enrolamentos, tensões nominais, a potência aparente trifásica que o dispositivo deve operar, o grupo de ligação que pode ou não conter defasamento angular, o material dos enrolamentos, tipo de isolamento, níveis de impedância, perdas garantidas, etc.

Neste trabalho será projetado um transformador trifásico de distribuição com potência aparente de 2000 kVA, classe de tensão do enrolamento de alta tensão de 36,2 kV e da baixa tensão de 4,16 kV. Ainda, para efeitos de dielétrico e meio refrigerante será utilizado óleo mineral. Para efeitos práticos, considerar-se-á o tipo de núcleo empilhado circular - núcleo envolvido, com step-laps horizontais, bobinas concêntricas helicoidais - isto é, onde o enrolamento da alta tensão é concêntrico e sobreposto sob o enrolamento de baixa tensão. Para realizar os cálculos necessários serão utilizadas planilhas eletrônicas que podem ser manipuladas por linguagem de programação nativa de ambiente, como a linguagem de programação VBA - *Visual Basic for*

*Applications*, de maneira a melhor organizar os cálculos da parte ativa do transformador.

## 1.1 Motivação

Com a crescente demanda por energia, democratização e barateamento das fontes renováveis, deve-se pensar, cada vez mais, em um sistema robusto e otimizado que leve em conta os mais diversos aspectos das partes fundamentais do sistema elétrico de potência, isto é, geração, transmissão e distribuição.

Desta maneira, pode-se argumentar que o equipamento cerne do SEP é o transformador, dado que este está presente nas três grandes partes anteriormente citadas. Assim, é suficientemente plausível que estas máquinas estáticas estejam em constante evolução e apresentem características eletromagnéticas, térmicas e mecânicas cada vez mais robustas e estáveis às mais diversas adversidades.

## 1.2 Objetivo geral

Projetar a parte ativa (núcleo + enrolamentos) de um transformador trifásico de distribuição com potência aparente de 2000 kVA, com classe de tensão do enrolamento de alta tensão de 36,2 kV e da baixa tensão de 4,16 kV, utilizando planilhas eletrônicas contendo equações analíticas que serão manipuladas por meio de algoritmos criados em linguagem de programação VBA. Será analisado também algumas das principais características comumente requisitadas em projetos de transformadores como perdas à vazio no núcleo (Foucault e Histerese), corrente de excitação e perdas ôhmicas nos enrolamentos tanto do primário como no secundário. Os resultados analíticos, ao final, serão comparados com uma simulação numérica realizada pelo Método dos Elementos Finitos.

## 1.3 Objetivos específicos

- Evidenciar, com o auxílio de equações analíticas e ferramentas computacionais (Microsoft Excel), como são dimensionados alguns dos principais pontos atrelados a um projeto de transformador de potência a fim de realizar a comparação com os resultados obtidos via simulação numérica;
- Realizar simulações pelo Método de Elementos Finitos (MEF) utilizando o software comercial *Ansys Maxwell* a título de comparação com os resultados analíticos.

## 1.4 Organização do texto

O capítulo atual apresenta uma breve introdução do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). No [Capítulo 2](#) será apresentado algumas fundamentações teóricas associadas aos princípios de funcionamento de um transformador, passando pelo modelo idealizado com núcleo de ar monofásico e chegando ao modelo real que é constituído por alguns dos principais parâmetros que são calculados em projetos no dia-a-dia. O [Capítulo 3](#) trará as principais equações analíticas associadas a uma das possíveis metodologias de cálculo e dimensionamento atreladas ao núcleo e aos enrolamentos de um transformador trifásico quando este deve atender características e grandezas elétricas requisitadas. O [Capítulo 4](#) será responsável por apresetar as equações de perdas e de impedância em transformadores. O [Capítulo 5](#) apresentará os resultados analíticos obtidos no TCC e alguns resultados obtidos com simulações usando o método de elementos finitos em três dimensões. Por fim, no [Capítulo 6](#), serão apresentadas as conclusões do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.



## Fundamentação Teórica

Os transformadores de potência são máquinas estáticas cujo funcionamento é baseado nas Equações de Maxwell para as baixas frequências. Eles possuem um ou mais enrolamentos e possuem núcleos ferromagnéticos feitos de materiais que possuem uma alta permeabilidade magnética, o que, conseqüentemente, acarreta num maior fator de acoplamento de fluxo magnético entre tais enrolamentos. Como os transformadores de potência, costumeiramente operam em baixas frequências (eletrotécnica), as Equações de Maxwell podem ser escritas na forma integral como:

$$\oint_{S(V)} \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad \text{Relaciona a indução elétrica com a carga} \quad (2.1)$$

$$\oint_{S(V)} \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{Indica que o fluxo magnético é conservativo} \quad (2.2)$$

$$\oint_{L(S)} \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{Relaciona o campo elétrico com a variação do fluxo magnético} \quad (2.3)$$

$$\oint_{L(S)} \vec{H} \cdot d\vec{L} = NI \quad \text{Relaciona o campo magnético com a corrente elétrica} \quad (2.4)$$

Sendo:

- $\vec{D}$ : Densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica [C/m<sup>2</sup>];
- $\vec{B}$ : Densidade de fluxo magnético ou indução magnética [T]
- $\vec{E}$ : Campo elétrico [V/m];
- $\vec{H}$ : Campo magnético [A/m]
- $\phi$ : Fluxo magnético [Wb]
- $Q$ : Carga elétrica [C]

Em conjunto com estas equações, tem-se as relações constitutivas atreladas aos materiais:

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

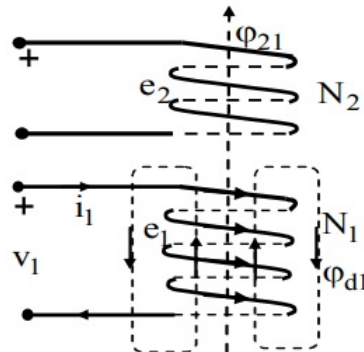
$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.7)$$

- $\mu$ : Permeabilidade magnética [H/m];
- $\varepsilon$ : Permissividade elétrica [F/m]
- $\sigma$ : Condutividade elétrica [S/m];

Para entender o princípio básico de funcionamento de um transformador com dois enrolamentos do tipo monofásico, é necessário realizar algumas operações algébricas na equação (2.3), que relaciona o campo elétrico induzido com uma variação temporal do fluxo magnético. Para ilustrar tal funcionamento, utiliza-se a estrutura de um núcleo de ar e dois enrolamentos, como mostrada na [Figura 1](#)

**Figura 1 – Núcleo de ar - Dois enrolamentos - Operação à vazio.**



Fonte: Ries (2007)

Sendo  $v_1(t)$  a tensão variável no tempo aplicada em um enrolamento que contém  $N_1$  espiras e, tendo-se um caminho fechado, há, como consequência, uma corrente  $i_1(t)$  também variante no tempo. Assim, tem-se que, por meio da [Equação 2.4](#), um campo magnético também variante no tempo é formado na direção radial ao sentido da corrente previamente citada. Este campo magnético, por sua vez, atravessa uma seção e, a este fenômeno é dado o nome de fluxo magnético, dado por:

$$\phi(t) = \int_S \vec{B}(t) \cdot \vec{dS} \quad (2.8)$$

Desta forma, a corrente  $i_1(t)$  gera um fluxo magnético variável total que pode ser dividido em dois,  $\phi_{d1}(t)$  e  $\phi_{21}(t)$ , associados ao fluxo magnético de dispersão - que não participa do acoplamento magnético com o segundo enrolamento, e o o fluxo magnético que a corrente  $i_1(t)$  gera no enrolamento 2, respectivamente.

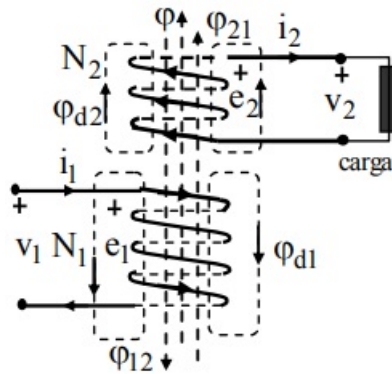
$$\phi_{11}(t) = \phi_{d1}(t) + \phi_{21}(t) \quad (2.9)$$



De maneira semelhante, na [Figura 2](#), como o segundo enrolamento está ligado a alguma carga (diferentemente da [Figura 1](#), onde este operava à vazio), surge também um fluxo magnético também variante devido à corrente  $i_2(t)$ , tendo-se portanto:

$$\phi_{22}(t) = \phi_{d2}(t) + \phi_{12}(t) \quad (2.10)$$

**Figura 2 – Núcleo de ar - Dois enrolamentos - Operação com carga**



Fonte: Ries (2007)

Pode-se definir também o *fluxo magnético médio equivalente por espira*, tanto para o primeiro enrolamento,  $\phi_1(t)$ , como para o segundo enrolamento,  $\phi_2(t)$ .

$$\phi_1(t) = \phi_{11}(t) - \phi_{12}(t) \quad (2.11)$$

$$\phi_2(t) = \phi_{21}(t) - \phi_{22}(t) \quad (2.12)$$

É importante também ressaltar uma associação existente entre os dois fluxos magnéticos totais advindos de cada enrolamento, que possui o nome de *fluxo magnético comum*, dado por:

$$\phi(t) = \phi_{21}(t) - \phi_{12}(t) \quad (2.13)$$

Pela Equação de Maxwell-Ampère na forma integral para  $N_k$  espiras, pode-se definir a Relutância Magnética ( $\mathfrak{R}$ ) associada aos entreferros e à seção transversal do núcleo ( $A$ ), que, para este, caso é o próprio ar.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{L} = N_k i = \oint \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot d\vec{L} = \phi_i \oint \frac{d\vec{L}}{\mu A} = \phi_i \mathfrak{R} \quad (2.14)$$

Esta equação é análoga à Lei de Ohm, entretanto, tratam-se de grandezas associadas à circulação de fluxo magnético e uma *Força Magnetomotriz*. Assim, levando-se em conta o número de espiras do primário ( $N_1$ ) e secundário ( $N_2$ ) e, tendo-se um núcleo de ar sem entreferros presentes, leva-se em conta tais considerações na [Equação 2.14](#), tal que:

$$N_1(i_1 - i_m) = N_2 i_2 \quad (2.15)$$

O que explicita o comportamento fundamental de um transformador, isto é, para que a igualdade da [Equação 2.15](#) seja mantida e os dois lados da equação concordem entre si, faz-se necessário que, caso a corrente de carga no lado do enrolamento secundário aumente - devido à uma maior carga, por exemplo, deve-se também aumentar, proporcionalmente, a corrente no lado primário (que é dada pela composição de duas correntes, uma associada à magnetização do núcleo e outra, à carga presente no secundário).

Desta forma, resgatando noções de cálculo vetorial, caso um campo vetorial seja conservativo, o seu rotacional é nulo e a este pode ser associado um campo escalar através do operador gradiente ( $\nabla$ ), assim, tendo-se um campo vetorial elétrico conservativo, pode-se escrever:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \quad (2.16)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (2.17)$$

Desconsiderando-se a corrente de magnetização associada ao núcleo,  $i_m(t)$ , já que esta é cerca de 2% a 5% da corrente de plena carga de um transformador em operação nominal, há a relação que elenca que a força eletromotriz,  $e_1(t)$ , pode ser aproximada pela própria tensão instantânea de alimentação, ou seja:

$$v_1(t) \simeq e_1(t)$$

Realizando a ligação com a Equação de Maxwell-Faraday, [Equação 2.3](#), a variação de potencial elétrico ( $v_k$ ) pode ser explicitada por intermédio da variação do fluxo concatenado médio por espira ( $\frac{d\lambda_k(t)}{dt}$ ):

$$v_k(t) = -\frac{d\lambda_k(t)}{dt} = -\frac{N_k d\phi_k(t)}{dt} \quad (2.18)$$

De posse dos fluxos magnéticos referentes a cada um dos dois enrolamentos, pode-se obter a indutância associada a cada um destes. Tem-se a definição de indutância como:

$$L_k(t) = \frac{N_k \phi_k(t)}{i_k(t)} \quad (2.19)$$

Há ainda a *indutância mútua*,  $M_{kj}$ , aquela cujo fluxo magnético proveniente de um enrolamento concatena e acopla em outro enrolamento e que, pelo *Teorema da Reciprocidade* pode ser validado que:

$$M_{kj} = M_{jk} = M$$

A *indutância de dispersão*,  $L_k$ , associada ao fluxo magnético que não concatena no enrolamento oposto, e a indutância própria ( $L_{kk}$ ), referente a cada um dos enrolamentos, são relacionadas com as indutâncias próprias e mútuas por:

$$L_{11} = L_1 + M \quad (2.20)$$

$$L_{22} = L_2 + M \quad (2.21)$$

Com tais definições dos tipos de indutâncias, explicita-se as equações associadas às tensões variáveis no tempo de entrada presentes em cada um dos dois enrolamentos pelo uso das indutâncias próprias e mútuas, de modo que:

$$v_1(t) = L_{11} \frac{di_1(t)}{dt} - M_{12} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2.22)$$

$$v_2(t) = M_{21} \frac{di_1(t)}{dt} - L_{22} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2.23)$$

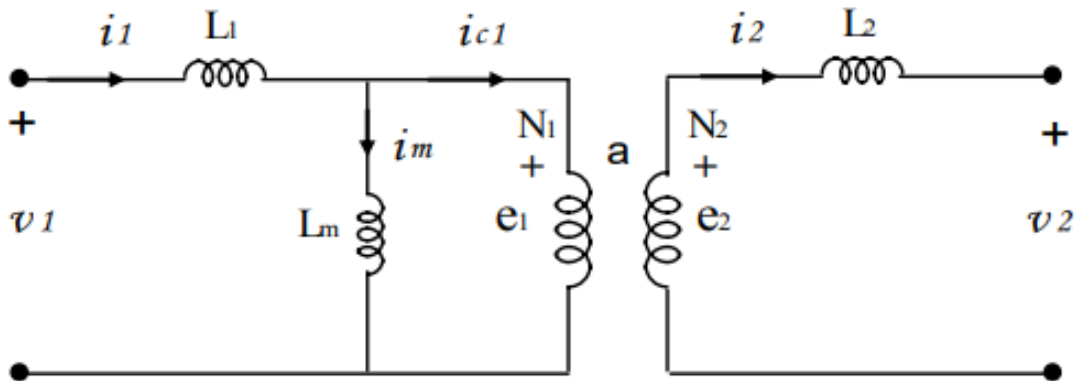
Pode-se ainda descrever as equações [Equação 2.22](#) e [Equação 2.23](#) de outra maneira, que leve em consideração o fluxo mútuo comum e a indutância de dispersão de cada enrolamento, isto é:

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + e_1(t) \quad (2.24)$$

$$v_2(t) = N_2 \frac{d\phi(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} = e_2(t) - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2.25)$$

Com estas equações, representa-se um transformador monofásico ideal, como ilustrado pela [Figura 3](#). Desta forma, destaca-se o número de espiras associados a cada um dos dois enrolamentos, além das quedas de tensões presentes devido às forças contraeletromotrizes existentes devido ao fluxo magnético comum variável.

**Figura 3 – Circuito equivalente aproximado - Transformador monofásico.**



Fonte: Ries (2007)

Como citado anteriormente, pode-se verificar pelo circuito acima, a corrente  $i_1(t)$  acaba se dividindo em outras duas correntes. A corrente  $i_m(t)$  é associada à corrente de magnetização do núcleo, que possui características não-lineares devido aos efeitos de saturação da curva BxH presente no ciclo de histerese do material, e que tem a finalidade de produzir o fluxo magnético comum que concatena em ambos os enrolamentos. Já a corrente  $i_{c1}(t)$  é uma parcela relacionada à carga presente no secundário do transformador. Novamente, como citado na [Equação 2.15](#), como o núcleo presente em ambos os enrolamentos é o mesmo, a relutância também é a mesma e as forças magnetomotrizes devem se manter em igualdade e em mesma proporcionalidade.

Ainda, através deste circuito, pode-se transcrever a *Relação de Transformação do Transformador Ideal*, que relaciona o número de espiras de cada enrolamento,  $N_1$  e  $N_2$ , a corrente  $i_{c1}(t)$ , presente no primeiro enrolamento, a corrente de carga,  $i_2(t)$ , presente no segundo enrolamento e as forças contraeletromotrizes,  $e_1(t)$  e  $e_2(t)$ . A relação em questão é dada por:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{i_2}{i_{c1}} \quad (2.26)$$

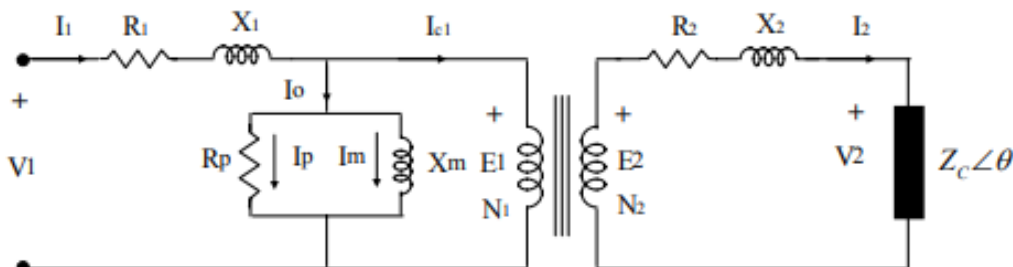
Esta é importantíssima e costumeiramente utilizada para realizar a transformação de características elétricas do transformador do lado de um enrolamento para o outro.

De maneira a se ter um modelo um pouco mais completo para o transformador, tem-se as seguintes considerações:

- A permeabilidade magnética do núcleo tem alta intensidade, mas é diferente de infinito. Assim, há tanto a existência de uma corrente de magnetização ( $i_m$ ) associada à saturação do material ferromagnético empregado no núcleo como também uma corrente atrelada às perdas no núcleo ( $i_p$ ) (perdas por correntes de Foucault e perdas por Histerese);
- Devido à permeabilidade magnética das chapas de aço-silício empregadas no núcleo não ser infinita, há uma pequena parcela de fluxo magnético variável que não concatena nos enrolamentos adjacentes, conceito dado pela indutância de dispersão;
- Há o aparecimento de perdas ôhmicas nos enrolamentos que compõem as bobinas, devido à natureza não-ideal dos condutores utilizados nestes.

Assim, um modelo que contém tais considerações e é disposto na notação fasorial, associada às alimentações sinusoidais de tensão e corrente, é dado por [Figura 4](#).

**Figura 4 – Circuito equivalente - Transformador monofásico.**



Fonte: Ries (2007)

## 2.1 Elementos da Parte Ativa

A parte ativa de um transformador é a seção mais importante de um transformador, é responsável pela transformação dos mais diversos níveis de correntes e tensões e desempenha papel crucial na transmissão e distribuição eficiente da energia elétrica, assim, é objeto de constante estudo e aperfeiçoamento.

A funcionalidade principal da parte ativa é realizar a transferência de energia elétrica baseadas pelas equações de Maxwell supracitadas, apoiadas elementarmente pelo fenômeno de indução magnética. Portanto, na presença de uma alimentação advinda de uma corrente variável imposta sob os terminais, haverá um campo magnético também variável que percorre o material ferromagnético do núcleo. Este campo, por sua vez, produz tensões induzidas nos terminais de saída do transformador, proporcionando assim, a transformação de tensões entre os terminais do equipamento.

Segundo Ries (2007), a estrutura da parte ativa (também denotada como "Parte Viva") se decompõe em:

- Núcleo: construído pelo empilhamento de lâminas ou chapas cujos materiais são do tipo ferromagnético. O empilhamento das chapas se dá de maneira a mitigar as correntes de Foucault impostas pelas tensões induzidas nas chapas. A estrutura das chapas ainda é composta por aço dopado com pequenos índices de silício para aumentar a resistividade elétrica do material e, estas são ainda impregnadas com material isolante para prevenir situações de curto-circuito e diminuir as perdas. Possui a função de direcionar o fluxo magnético e concatenar este nas bobinas existentes no sistema. Podem ser do tipo "enrolado", onde a estrutura é tipicamente retangular e as chapas são montadas de forma a abraçarem umas às outras, ou ainda do tipo empilhado, cujas chapas são montadas de maneira a mitigar os entreferros, neste caso, o formato se assemelha a uma circunferência. A [Figura 5](#) ilustra estes dois tipos de núcleos.

**Figura 5 – Tipos de núcleo.**

**(a)** Núcleo empilhado.



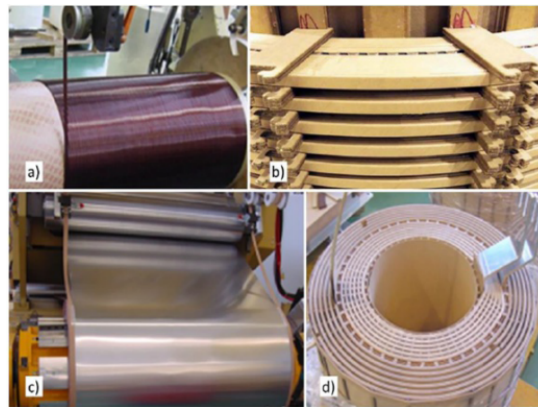
**(b)** Núcleo enrolado.



Fonte: NICOREINDIA (2013) e JC (2013)

- Bobinas: estruturas de enrolamentos compostas por espiras cujos materiais dos condutores são ou de cobre ou de alumínio, podem estar dispostos de maneira a envolver ou serem envoltas pelo núcleo do transformador. O enrolamento primário é excitado por uma fonte de alimentação com tensão necessariamente variável e com frequência específica para haver o correto funcionamento. O enrolamento secundário, por sua vez, está conectado ao sistema de carga e fornece energia em um valor tensão e corrente diferentes. A proporção entre o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário determina a relação de transformação entre as tensões e correntes. Os enrolamentos podem ser disponibilizados das mais variadas formas de acordo com as classes de tensão e da geometria do núcleo associado aos mesmos. A [Figura 6](#) apresenta algumas das variadas formas de concepção de enrolamentos.

**Figura 6 – Tipos de enrolamentos.**



Fonte: Vilaça et al. (2016)

- Isolamento: componente crítico para garantir as seguranças elétrica e mecânica do transformador. Consiste em estruturas compostas pelos mais diversos materiais, podendo ser sólidos ou líquidos. São utilizados para isolar eletricamente as bobinas, o núcleo e outros componentes do transformador. O isolamento protege contra curtos-circuitos, descargas elétricas e reduz a possibilidade de falhas e danos aos componentes.

Para os isolantes sólidos há diferentes classes de temperatura regidas pela NBR-5116, que normaliza materiais isolantes para utilização em máquinas elétricas, variando da Classe A até a Classe H, como disposto pela [Tabela 1](#).

**Tabela 1 – Classe de temperatura - Materiais isolantes.**

Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura Ambiente	40	40	40	40	40
Temperatura Referencial (perdas, impedância, etc.)	60	75	80	105	125
Hot-Spot - Média dos Enrolamentos	5	5	10	10	15
Total	105	120	130	155	180

Fonte: Adaptada de NBR-5116

Para exemplificar alguns isolantes, tem-se a [Figura 7](#) que contém os seguintes itens:

- O verniz presente em condutores circulares de maneira a garantir o isolamento entre espiras adjacentes;
- Os papéis do tipo kraft ou microcrepado existentes para atender tanto a isolação necessária entre espiras consecutivas como também entre a diferença de potencial elétrico entre as camadas de um enrolamento e na composição das cabeceiras, operando como suportes mecânicos para as bobinas;
- Os papéis termoestabilizados utilizados tanto na mitigação do campo elétrico presente entre as camadas de um enrolamento como também na distância entre fases de duas bobinas adjacentes e na suportabilidade dos canais refrigerantes a serem preenchidos com óleo vegetal ou mineral;
- Os calços de madeira densificada altamente impregnáveis por óleo, utilizados para assegurar as distâncias elétricas desejadas entre núcleo e bobinas.

**Figura 7 – Tipos de isolantes.**

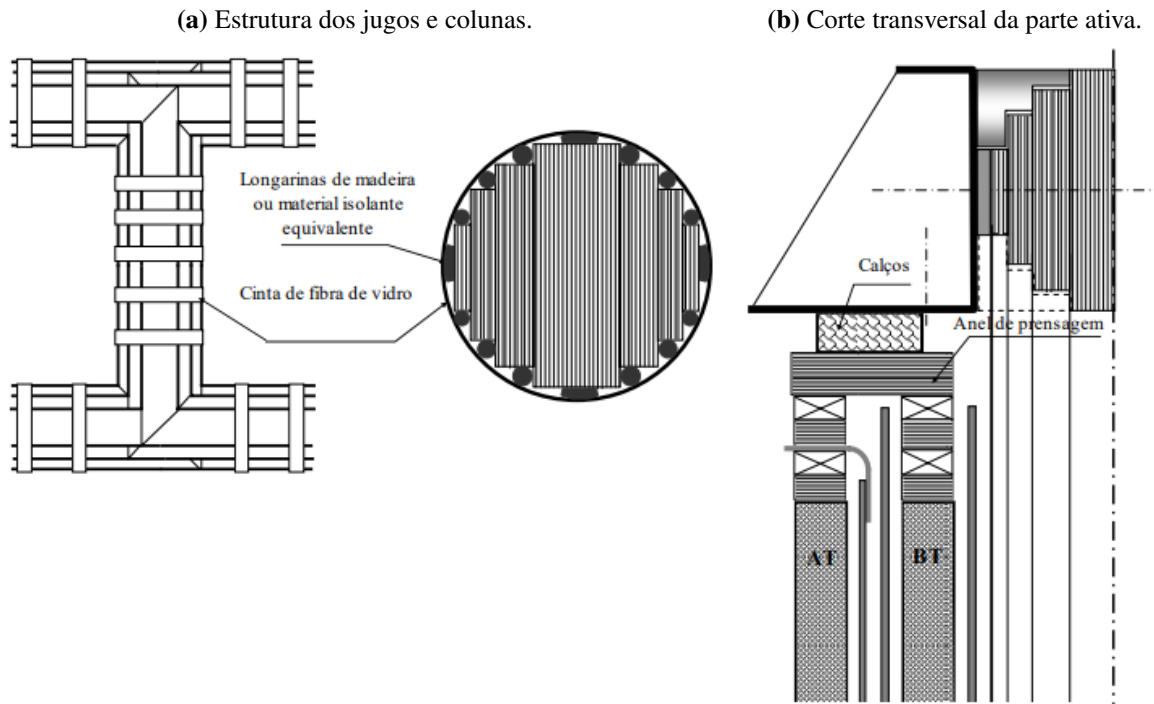


**Fonte: Supplies (2023)**

Já para os isolantes líquidos, tem-se principalmente o óleo refrigerante dielétrico, caso o transformador seja do tipo imerso em óleo. Este, por sua vez, tem a capacidade de funcionar tanto como isolante (que possui ainda a capacidade de "regenerar" suas propriedades - ao contrário dos isolantes sólidos) como também atua como líquido refrigerante para garantir os gradientes adequados de temperatura dos enrolamentos, núcleo e elementos de suporte, como os calços, tirantes e vigas.

A [Figura 8](#) apresenta dois esquemáticos da parte ativa de um transformador, destacando o núcleo, as bobinas primária e secundária, o isolamento, além dos calços de madeira e anéis de prensagem.

**Figura 8 – Esquemático de parte ativa.**



Fonte: Ries (2007)

A [Figura 9](#) mostra uma imagem real de um transformador aberto, permitindo visualizar a parte ativa, incluindo o núcleo e as bobinas primária e secundária.

**Figura 9 – Parte ativa real.**



Fonte: Dawood et al. (2019)



## Dimensionamento da Parte Ativa

Conforme descrito na introdução, este trabalho aborda o projeto e o dimensionamento da parte ativa de um transformador de distribuição cuja potência aparente trifásica nominal é de 2000 kVA, classes de tensão dos enrolamentos de alta tensão e da baixa tensão de 36,2 kV e 7,2 kV, respectivamente, definidas segundo norma regulamentatória brasileira NBR 5356. As tensões nominais serão de 4,16 kV para a BT e de 34,5 kV para o enrolamento da AT (com comutador cujo acionamento se dá por CST - *comutação sem tensão*, de +/- 2,5 % sob a tensão nominal desta). Ainda, tem-se como referência um valor percentual de impedância de 5,75 %.

O grupo de ligação a ser considerado é Dyn1, comumente utilizado para a maioria dos transformadores. Este grupo gera um defasamento angular de 30° presente entre os enrolamentos da BT e AT.

Para o material dos enrolamentos será considerado o alumínio, que possui uma resistividade maior que a do cobre, além de possuir, atualmente, um custo menor para fabricação e montagem. A [Tabela 2](#) apresenta as principais características e os dados que serão tomados como referência no projeto.

**Tabela 2 – Transformador trifásico - Informações.**

Característica	Valor
$S_{3\phi}$ [kVA]	2000
$V_{ATnominal}$ [kV]	34,50
$V_{BTnominal}$ [kV]	4,16
Grupo de Ligação	Dyn1
Derivações	$\pm 2,50 \%$
Frequência [Hz]	60
Material dos Enrolamentos	Alumínio
$Z\%$ [ $\Omega$ ]	5,75

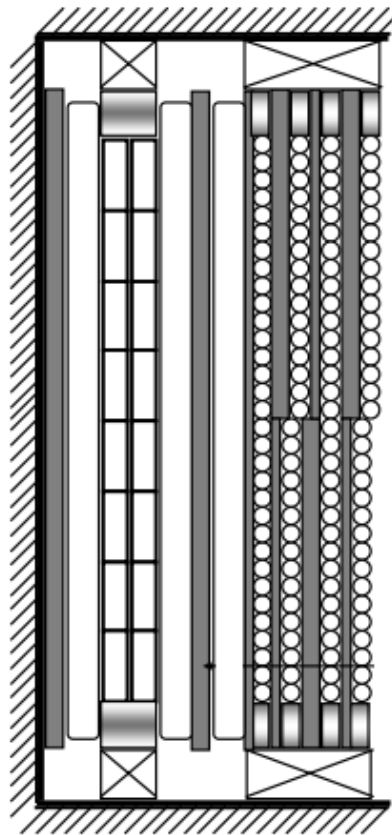
**Fonte: O autor**

A partir dos dados básicos do transformador mostrados na [Tabela 2](#), pode-se determinar os principais tipos construtivos que serão utilizados para o projeto da parte ativa deste transformador.

Como é relatado em Martignoni (1991), quando se trata de um transformador trifásico de distribuição, este não requisita de tantas manutenções e é substituído quando ocorre alguma falha, sendo portanto, uma estrutura um pouco mais simples construtivamente. Logo, tanto para o enrolamento da baixa tensão como para o de alta tensão, será utilizada a técnica de disposição em camadas, de modo que os condutores serão bobinados na direção axial até determinadas alturas (alturas mecânicas dos enrolamentos). Após tal procedimento, sobrepõe-se tais condutores com uma camada de papel de maneira a isolar os gradientes de potencial elétrico (campos elétricos) presentes entre as camadas, repetindo o processo no sentido contrário até completar o número de espiras requisitadas para o enrolamento em questão.

Este tipo de técnica de enrolamento é ilustrado na [Figura 10](#) para o condutor retangular e condutor circular com achatamento.

**Figura 10 – Técnica de bobinagem - Camadas - Condutor retangular / Condutor circular.**



**Fonte: Ries (2007)**

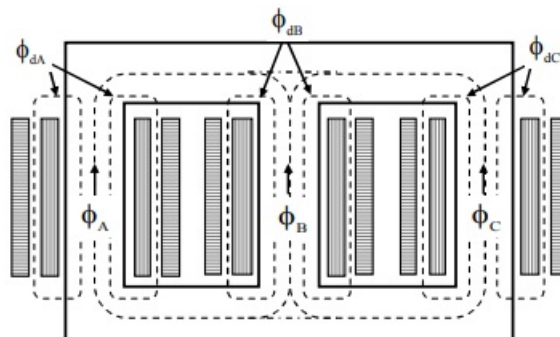
## 3.1 Núcleo

Os núcleos utilizados em transformadores de potência e distribuição são compostos por materiais ferromagnéticos que possuem altas intensidades de permeabilidade magnética, o que, por consequência, acarreta em pequenas relutâncias magnéticas no núcleo. Assim, a maioria do fluxo magnético advindo dos enrolamentos energizados acompanham o sentido de orientação dos grãos das chapas do núcleo e percorrem o circuito magnético equivalente através da seção transversal e na direção do caminho magnético. Assim, gera-se um fluxo magnético mútuo de ordem de grandeza muito mais relevante do que o fluxo magnético de dispersão.

Segundo Ries (2007), para melhorar ainda mais a composição estrutural e química destas chapas, estas são dopadas com índices de 0,5 % até 4,0 % de silício e, são classificadas de acordo com a AISI (*American Iron and Steel Institute*) pela letra M concatenada com um número, onde as chapas de grão-orientado (que serão utilizadas neste projeto) variam desde M-3 até M-10, com espessuras de 0,23 - 0,35 [mm], respectivamente. As chapas ainda são impregnadas com finas camadas dielétricas de um material inorgânico que, além de realizar a isolamento entre o empilhamento destas na construção do núcleo (diminuindo as perdas por correntes de Foucault), possuem a capacidade de suportar altas temperaturas para eventuais processos de recozimento no intuito de mitigar perdas à vazío. Tais chapas de grãos-orientados são laminadas a frio e, em seguida, submetidas a tratamento térmico, o qual é responsável por alinhar os domínios no sentido de laminação. As chapas com menor espessura (menor índice M) apresentam menores perdas por histerese e correntes de excitação, ainda, por padrão, possuem uma massa específica de 7,65 kg/dm<sup>3</sup> (ACESITA, 2005).

Existem basicamente dois tipos de estruturas de núcleos, o núcleo envolvido - onde as bobinas envolvem as colunas do núcleo e o núcleo do tipo envolvente, onde as colunas do núcleo envolvem as bobinas de baixa e alta tensão. [Figura 11](#) e [Figura 12](#) ilustram estes tipos de núcleos.

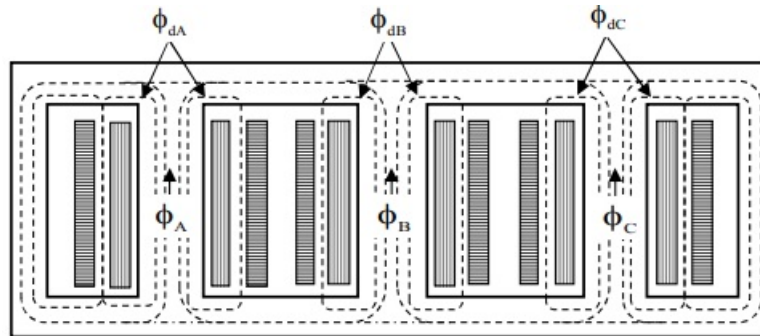
**Figura 11 – Tipo de núcleo - Núcleo envolvido.**



Fonte: Ries (2007)

Para o transformador projetado neste trabalho, será utilizado o núcleo do tipo envolvido, mostrado na [Figura 11](#). Trata-se de uma montagem onde os enrolamentos de BT e AT são concêntricos e, para cada coluna do núcleo, haverá duas bobinas (BT e AT). A principal diferença

**Figura 12 – Tipo de núcleo - Núcleo envolvente.**



Fonte: Ries (2007)

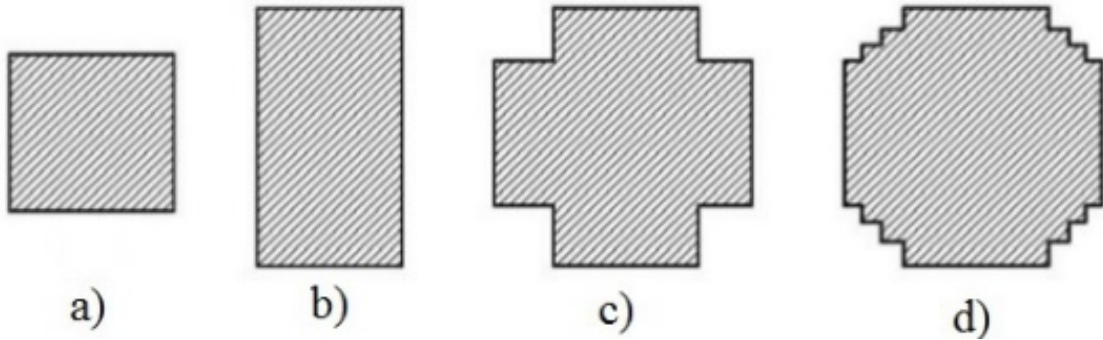
entre o núcleo de 5 colunas para o de 3 colunas está no fato de que, supondo-se alimentação sinusoidal balanceada no núcleo de 3 colunas, as tensões de fase das três bobinas estarão defasadas, consecutivamente, de  $120^\circ$ , gerando-se fluxos magnéticos comuns defasados de  $120^\circ$  também. Por consequência, a soma destes fasores é nula, não havendo necessidade das colunas externas para fazer o retorno do fluxo magnético restante. Adicionalmente, o fluxo magnético máximo que atravessa as seções transversais das colunas e culatras é o fluxo magnético mútuo presente em uma fase, fazendo com que as colunas e culatras possuam a mesma seção transversal (RIES, 2007).

Conforme mencionado por Salustiano (2012), em relação à configuração geométrica dos núcleos, existem diversas abordagens para a concepção de um núcleo magnético. A [Figura 13](#) ilustra exemplos de seções transversais tanto nas colunas (onde ficam dispostos os enrolamentos) como nas culatras (caminhos de retorno para o fluxo magnético mútuo).

Em transformadores cuja potência aparente é um pouco maior, costuma-se utilizar núcleos construídos por intermédio de empilhamentos das chapas com grãos-orientados, classificadas pela *ANSI* citadas anteriormente, diferentemente do que ocorre com transformadores para aparelhos eletrônicos e de pequenas potências, onde os núcleos enrolados e núcleos "EI" são majoritariamente utilizados (RIES, 2007). Na [Figura 13](#) tem-se os seguintes tipos de seções:

- a) Seção transversal quadrada (núcleos enrolados ou núcleos "EI" para aparelhos eletrônicos);
- b) Seção transversal retangular (núcleos enrolados ou núcleos "EI" para aparelhos eletrônicos);
- c) Seção transversal cruciforme (núcleos empilhados em degraus);
- d) Seção transversal aproximadamente circular (núcleos empilhados em degraus).

Para os núcleos empilhados com degraus, tem-se uma circunferência circunscrita em torno dos degraus, sendo objetivada a maximização da seção empilhada inscrita na mesma

**Figura 13 – Tipo de seções transversais de núcleo.**

Fonte: Salustiano (2012)

circunferência. Entretanto, quanto maior o número de degraus, maior será o fator de utilização desta seção empilhada em relação ao círculo determinado pela circunferência, mas também maior será o custo relacionado ao material das chapas de aço-silício ferromagnéticas para compor tal empilhamento. Logo, trata-se de um problema de compromisso.

### 3.1.1 Cálculo do Dimensionamento do Núcleo

Partindo-se da potência aparente monofásica ( $S_{fase}$ ) de um transformador, que relaciona a tensão de fase ( $V_{fase}$ ) com a corrente presente na mesma fase ( $I_{fase}^*$ ), tem-se:

$$S_{fase} = V_{fase} \cdot I_{fase}^* \quad (3.1)$$

Tomando-se o módulo desta equação e dividindo ambos os lados da [Equação 3.1](#) pelo número de espiras,  $N_{esp}$ , pode-se obter:

$$S_{fase} = E_t I_{fase} N_{esp} \quad (3.2)$$

Esta equação ainda pode ser reescrita de maneira que:

$$E_t = K_t \sqrt{S_{3\phi}} \quad (3.3)$$

Sendo:

- $E_t$  é a relação de tensão de fase eficaz por espira [V/espira];
- $K_t$  é uma constante atrelada à potência trifásica, corrente e ao tipo de utilização do transformador - como apresentado na [Tabela 3](#);
- $S_{3\phi}$  é a potência aparente trifásica do transformador, em kVA.

A partir do módulo da [Equação 2.18](#), que relaciona a tensão de fase com o fluxo magnético variável concatenado, suportada pela Lei de Faraday e pela Lei de Lenz, pode-se escrever:

$$v_1(t) = \frac{d\lambda_1(t)}{dt} = N_1 \frac{d\phi_1(t)}{dt} \quad (3.4)$$

**Tabela 3 – Tabela de coeficientes do núcleo empilhado circular.**

Utilização do Transformador	$K_t$
Trifásico - Núcleo Envolvente	1,30
Trifásico de Potência - Núcleo Envolvido	0,60 - 0,70
Trifásico de Distribuição - Núcleo Envolvido	0,45 - 0,55
Monofásico - Núcleo Envolvente	1,00 - 1,20
Monofásico - Núcleo Envolvido	0,75 - 0,85

**Fonte: Adaptado de Upadhyay (2011)**

Sendo que o fluxo magnético máximo ( $\phi_{Max}$ ), presente na perna (coluna) associada à fase central e descrito pela [Equação 2.8](#), pode ser aproximado por:

$$\phi_{Max} = B_{Max} S_{FerroLiquida} \quad (3.5)$$

Supondo alimentação sinusoidal, tal que o fluxo magnético variável no tempo pode ser avaliado como sendo:

$$\phi(t) = \phi_{Max} \text{sen}(\omega t) \quad (3.6)$$

Obtém-se, após algumas operações algébricas - como a normalização do sinal sinusoidal em valor eficaz ou RMS, a tensão de fase dada por:

$$v_1(t) = \frac{2\pi f N_1 \phi_{Max} \cos(\omega t)}{\sqrt{2}} \quad (3.7)$$

Que, por ser tratada como uma grandeza fasorial, pode ser utilizada apenas com seu módulo, dado por:

$$V_1 = 4,44 N_1 f B_{Max} S_{FerroLiquida} 10^{-4} \quad (3.8)$$

Sendo estas grandezas definidas como sendo:

- $\phi_{Max}$  é o valor instantâneo máximo do fluxo magnético variável [Wb];
- $B_{Max}$  é o valor instantâneo máximo da indução magnética [T];
- $N_1$  é o número de espiras do enrolamento primário;
- $f$  é a frequência de variação do sinal sinusoidal [Hz];
- $S_{FerroLiquida}$  é a seção transversal da coluna (e culatras, para este caso) [cm<sup>2</sup>];
- $V_1$  é a tensão máxima de fase do enrolamento primário [V].

Geralmente, para chapas de aço-silício M-4, com 0,27 [mm] de espessura, costuma-se utilizar um valor de indução magnética de cerca de 1,50 até 1,80 [T]. Dependendo do tipo de

aplicação do transformador a ser projetado, costumeiramente, a partir de 1,80 [T] começa a haver o processo de saturação das chapas do núcleo. Isto é, ao se aumentar o campo magnético de excitação, tem-se um ganho muito ínfimo de indução magnética. Portanto, cabe ao projetista, por meio de dados experimentais e de fabricações de tais lâminas, optar por um valor presente dentro deste intervalo supracitado.

Com um valor de indução magnética adequado e fixado, é possível obter a seção transversal líquida que será utilizada tanto para as colunas como para as culatras. Pode-se, portanto, dar continuidade ao processo de dimensionamento do núcleo empilhado circular composto por chapas de aço-silício do tipo M-4. Novamente, segundo Salustiano (2012), esta montagem de núcleo é realizada por empilhamento de chapas impregnadas com material isolante de alguns micrômetros para diminuir as eventuais perdas associadas ao fenômeno das correntes induzidas e também garantir a capacidade de recozimento do núcleo para mitigação das perdas à vazio. Há, portanto, uma diferença presente entre a seção líquida e a seção bruta de empilhamento. A esta diferença é dada o nome de *Fator de Empilhamento* - que relaciona a seção líquida com a seção empilhada.

Assim, pode-se definir o fator de empilhamento ( $K_e$ ) como sendo:

$$K_e = \frac{S_{FerroLiquida}}{S_{FerroEmpilhada}} \quad (3.9)$$

A partir da seção transversal bruta do núcleo, deve-se identificar qual será o número de degraus presentes na concepção deste. Lembrando que, quanto maior o número de degraus, maior será o tempo de montagem para alocar todas as chapas nos pacotes e, mais custoso será para o projeto em questão. Para estabelecer um número de degraus é necessário definir o diâmetro associado à circunferência do núcleo. Então, o diâmetro do núcleo ( $D_{Nucleo}$ ) pode ser determinado a partir da equação:

$$D_{Nucleo} = 20 \sqrt{\frac{S_{FerroEmpilhada}}{\pi}} \quad (3.10)$$

Assim, por intermédio da [Tabela 4](#), define-se o número de degraus a serem utilizados no núcleo a partir do diâmetro deste.

**Tabela 4 – Tabela de diâmetros do núcleo empilhado circular.**

Diâmetro [mm]	<50	50 a 70	70 a 100	100 a 140	140 a 200	200 a 300	300 a 400	400 a 550	>600
Nº de degraus	2	3	4	5	6	7	8	9	>10

**Fonte: Adaptado de Ries (2007)**

Tomado como referência um valor de diâmetro e seus respectivos degraus, realiza-se a determinação das larguras (eixo horizontal - também chamada de direção fase, dado que o crescimento das larguras impacta nas distâncias elétricas presentes entre as fases do transformador) e das espessuras (eixo vertical - também chamada de direção barra ou tanque,

que crescem na direção do tanque ou da barra que é soldada às chapas quando o enrolamento de baixa tensão é feito com lâminas).

Assim, com o auxílio da [Tabela 5](#), que traz consigo coeficientes associados à razão das larguras de cada chapa pelo diâmetro do núcleo e, também, introduz o coeficiente de *Fator de Utilização* (que relaciona a seção do núcleo empilhado com a seção definida pela circunferência circunscrita aos degraus), pode-se melhor dimensionar as larguras e espessuras de cada degrau. O Fator de Utilização ( $K_u$ ) é dado por:

$$K_u = \frac{S_{FerroEmpilhada}}{S_{Circulo}} = \frac{4 S_{FerroEmpilhada}}{\pi D_{Nucleo}^2} \quad (3.11)$$

**Tabela 5 – Tabela de características do núcleo empilhado circular.**

Degraus	$\frac{L_1}{D_c}$	$\frac{L_2}{D_c}$	$\frac{L_3}{D_c}$	$\frac{L_4}{D_c}$	$\frac{L_5}{D_c}$	$\frac{L_6}{D_c}$	$\frac{L_7}{D_c}$	A/D <sup>2</sup>	0,9 [A/D]	$K_u [4A/\pi D]$
1	0,71							0,50	0,45	0,64
2	0,85	0,53						0,62	0,56	0,79
3	0,91	0,71	0,42					0,67	0,60	0,85
4	0,93	0,80	0,61	0,36				0,70	0,63	0,89
5	0,95	0,85	0,71	0,53	0,31			0,71	0,64	0,91
6	0,96	0,88	0,77	0,64	0,48	0,28		0,73	0,65	0,92
7	0,97	0,90	0,81	0,71	0,58	0,44	0,26	0,73	0,66	0,93

Fonte: Adaptado de Ries (2007)

A [Tabela 5](#) não será deduzida, mas pode ser obtida discretizando as larguras e espessuras dos degraus existentes, derivando em relação ao ângulo  $\theta$ , formado pela largura do degrau  $i$ -ésimo e o diâmetro do núcleo em questão e igualando o resultado desta função derivada a 0, para obter o máximo de abertura (e, conseqüentemente, largura) que o ângulo  $\theta$  pode ter. É válido ressaltar que, por questões de facilidade, manuseio e montagem das chapas de aço-silício atreladas às limitações que cada fabricante de transformadores possui, esta tabela e suas ponderações podem ser modificadas. Usa-se, então, uma análise geométrica que relaciona as larguras dos degraus com o respectivo diâmetro do núcleo. Assim, é possível determinar as larguras de cada degrau ( $L_i$ ) por meio da [Equação 3.12](#) apresentada em (SOBRINHO, 2019).

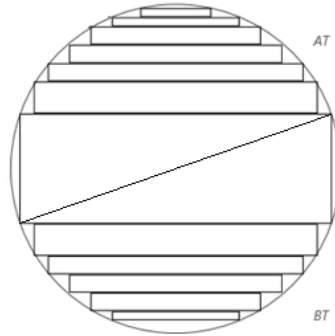
$$L_i = \frac{L_i}{D_c} D_{Nucleo} \quad (3.12)$$

As espessuras ( $E_i$ ) podem ser calculadas, novamente, a partir de triângulos retângulos e a relação de Pitágoras (lembrando que se deve descontar o somatório dos degraus anteriores,  $E_k$ , a partir do segundo degrau). Assim, obtém-se:

$$E_i = \sqrt{\left(\frac{D_{Nucleo}}{2}\right)^2 - \left(\frac{L_i}{2}\right)^2} - \sum_{k=1}^{i-1} E_k \quad (3.13)$$

Uma possível configuração de montagem do núcleo é mostrada na [Figura 14](#), que retrata os degraus, a circunferência circunscrita e o diâmetro do núcleo associada a esta.



**Figura 14 – Núcleo empilhado circular - 7 degraus.**

**Fonte: O autor**

Para melhor determinar o núcleo, pode-se, por fim, dimensionar sua seção final ( $S_{final}$ ) de montagem que pode ser calculada pela [Equação 3.14](#).

$$S_{final} = 2 \sum_{k=1}^n (L_k E_k) \quad (3.14)$$

## 3.2 Enrolamentos

Conforme apresentado na [Tabela 2](#), tem-se as características elétricas que o transformador trifásico a ser projetado deve possuir. Novamente, como a disposição dos enrolamentos deve ser feita de maneira concêntrica (com o enrolamento da alta tensão sendo montado sob o da baixa tensão) e, sendo estes ainda encolumnados sob as três pernas existentes do núcleo, deve-se evitar danos ao material isolante e garantir que os ensaios elétricos de tensão aplicada e de tensão induzida sejam posteriormente aprovados. Portanto, é necessário manter uma distância dielétrica adequada, evitando a ruptura do material isolante. Uma prática comum para alcançar essa resistência mecânica e dielétrica é utilizar canais preenchidos com óleo dielétrico refrigerante e utilizar cilindros de presspahn como isolamento sólida.

Uma das possíveis maneiras para calcular esta distância entre núcleo e o enrolamento de baixa tensão ( $D_{Núcleo-BT}$ ) é a partir da equação [Equação 3.15](#), apresentada em Sobrinho (2019).

$$D_{Núcleo-BT} = \sqrt{\frac{S_{Circulo}}{k}} \quad (3.15)$$

Sendo  $k$  uma constante presente na nona coluna da [Tabela 5](#), que relaciona o número de degraus existentes em um núcleo e leva em consideração tanto a seção da circunferência como também a seção quadrada inscrita no diâmetro do núcleo.

Ainda, como exposto no início deste capítulo, as bobinas serão feitas a partir da técnica de isolamento em camadas. Tal técnica consiste em, por meio de um cilindro isolante tomado como referência, também chamado de molde ou mandril, a máquina bobinadeira é operada de maneira que existam dois procedimentos sendo feitos em paralelo. No primeiro, o condutor escolhido é

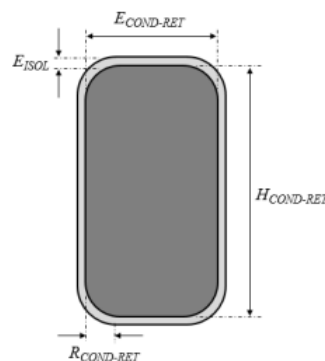
enrolado em espiras até atingir a altura mecânica definida em projeto e, em paralelo ao primeiro, logo atrás, vem sendo enrolado o papel isolante escolhido, de maneira a sustentar a rigidez dielétrica exigida entre as camadas. Quando se atinge a espessura de papel adequada ao longo de todo o eixo axial da bobina, volta-se a enrolar o condutor em sentido contrário, com o papel isolante vindo novamente atrás. Assim é feito o procedimento de papel mais condutor até atingir o número de espiras e a isolação entre estas definida em projeto.

Para este tipo de técnica, o gradiente de potencial elétrico entre espiras consecutivas é relativamente pequeno e o próprio isolamento do condutor, geralmente, já é suficiente. Em contrapartida, quando há a mudança de sentido de uma camada completa para o início de outra, tem-se o ponto mais crítico de isolação entre camadas. Por esta razão, existem isolamentos que são do tipo progressivo, onde a espessura de papel isolante começa menor e vai, gradativamente, aumentando. Em transformadores de distribuição, este é o tipo de isolamento mais utilizado e pode ser feito tanto no enrolamento de baixa tensão como no de alta tensão. A diferença está apenas no fato de que, no enrolamento de alta tensão, deve-se ter uma maior espessura para assegurar a capacidade de rigidez dielétrica necessária que este enrolamento possui em comparação ao de baixa tensão.

Sobre as opções de condutores que podem ser utilizados para compor os enrolamentos, para transformadores de distribuição, são usados, basicamente, 3 tipos (SALUSTIANO, 2012):

- Condutor retangular: geralmente, trata-se do condutor mais utilizado (Figura 15). Suas bordas, ao contrário do formato geométrico presente no nome, não formam  $90^\circ$  entre si. Há, portanto, um leve grau de arredondamento entre estas para que seja reduzido o gradiente de potencial elétrico e seja mitigada a capacidade de gerar cortes no material isolante presente neste tipo de condutor. Os condutores retangulares possuem uma ótima taxa de ocupação do espaçamento presente tanto na direção radial como também na axial. Dispõem da capacidade de serem utilizados em paralelismo com vários outros condutores em ambas as direções para compor a seção resultante vinculada às densidades superficiais de corrente exigidas;

**Figura 15 – Tipo de condutor - Retangular.**



**Fonte: WEG (2023)**

- Condutor circular: muito utilizado nas bobinas feitas em camadas (Figura 16). Sua isolamento é geralmente esmaltada com verniz, o que acarreta em suportabilidades térmicas elevadas. São dispostos no padrão AWG - "American Wire Gauge", escala americana normalizada para padronização de condutores e cabos elétricos por meio de seus diâmetros. Não possuem um fator de ocupação no enrolamento tão bom quanto os condutores retangulares. Devido à sua geometria, haverá sempre um maior desperdício em relação ao condutor retangular e também a diminuição do fator de utilização do enrolamento, se estes forem utilizados em paralelo com condutores de mesma natureza;

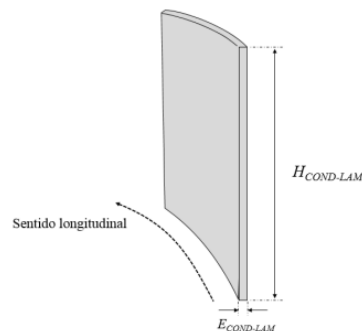
**Figura 16 – Tipo de condutor - Circular.**



Fonte: WEG (2023)

- Condutor tipo lâmina ou chapa: tratam-se de condutores retangulares em formato de folha cuja largura é muito maior que a sua espessura (Figura 17). Possuem a melhor taxa de ocupação de enrolamento em comparação com os outros dois casos. Ao contrário dos condutores em fio, as lâminas não possuem isolamento em verniz, papel kraft, ou ainda microcrepado. Em transformadores de distribuição, são geralmente utilizadas no enrolamento de baixa tensão e bobinadas em camadas. Por se tratarem de condutores muito maiores que os fios, a condição de utilização em paralelo, seja no sentido axial, seja no radial, é extremamente limitada devido às dificuldades de fabricação e manuseio destas lâminas em função de suas dimensões.

**Figura 17 – Tipo de condutor - Condutor tipo lâmina ou chapa.**



Fonte: WEG (2023)

### 3.2.1 Enrolamento de Baixa Tensão

Com o dimensionamento das chapas, empilhamentos, seções e números de degraus atrelados a um núcleo empilhado ferromagnético, é possível dar prosseguimento para a etapa de cálculo dos enrolamentos. Logo após o núcleo, é estabelecida uma distância que desempenha múltiplas funções, como suportar a carga mecânica, fornecer refrigeração e garantir a isolamento elétrica. Sendo o tipo de montagem concêntrica, o enrolamento de baixa tensão é consequência direta neste processo.

Assim, deve-se, primeiramente, calcular o número de espiras que o enrolamento de baixa tensão ( $N_{BT}$ ) deve possuir. Este procedimento pode ser realizado por meio da [Equação 3.16](#). Tal equação relaciona o valor de Volts eficazes por espira com o número de espiras ( $E_t$ ) e a tensão de fase ( $V_{fBT}$ ) do mesmo enrolamento, considerando a configuração deste em estrela. Caso o tipo de ligação seja em delta, basta ponderar a mesma equação por  $\sqrt{3}$ .

$$N_{BT} = \frac{V_{fBT}}{E_t} \quad (3.16)$$

Um parâmetro também fundamental para o projeto dos enrolamentos está na densidade superficial de corrente ( $J_{BT}$ ). Para transformadores de distribuição com enrolamentos compostos por condutores de cobre, é usual utilizar uma densidade superficial máxima de corrente de, aproximadamente, 4,00 [A/mm<sup>2</sup>]. Já para enrolamentos cujos condutores são feitos de alumínio, pode-se utilizar cerca de 2,80 até 3,00 [A/mm<sup>2</sup>].

Faz-se necessário também determinar as correntes de fase,  $I_{FaseBT}$ , (e de linha, já que a ligação do lado da baixa tensão será feita em estrela) por meio da [Equação 3.17](#), que leva em conta tanto a potência aparente trifásica ( $S_{3\phi}$ ) como também as tensões de linha ( $V_{Linha}$ ) e fase ( $V_{Fase}$ ).

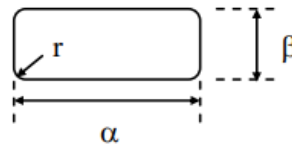
$$I_{LinhaBT} = I_{FaseBT} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{LinhaBT}} = \frac{S_{3\phi}}{3 V_{FaseBT}} \quad (3.17)$$

A partir da densidade superficial de corrente do enrolamento fixada e sua respectiva corrente de fase, determina-se a seção transversal que o condutor ou conjunto de condutores (feixe) deve possuir para se aproximar destas grandezas estabelecidas. No entanto, como citado anteriormente, o condutores retangular não possui cantos formados por ângulos retos. Leva-se em conta então o arredondamento associado ao pequeno raio, que auxilia na diminuição dos gradientes de potencial elétrico, e também previne os cortes do papel isolante que envolve este. A [Figura 18](#) ilustra a geometria deste tipo de condutor.

A [Tabela 6](#) identifica estes supracitados cantos arredondados e seus respectivos raios de acordo com intervalos de  $\alpha$  (largura -  $L_{FioRetangular}$ ) e  $\beta$  (espessura -  $E_{FioRetangular}$ ).

Assim, para calcular a superfície transversal do condutor retangular ( $S_{FioRetangular}$ ) considerando cantos arredondados, deve-se utilizar a [Equação 3.18](#).

$$S_{FioRetangular} = L_{FioRetangular} E_{FioRetangular} + (\pi - 4) Raio^2 \quad (3.18)$$

**Figura 18 – Condutor retangular - Enrolamento de BT - Cantos arredondados.**

Fonte: Ries (2007)

**Tabela 6 – Fio retangular - Tabela de dimensionais - Cantos arredondados.**

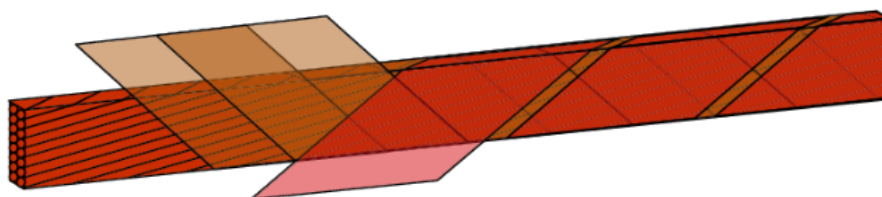
			$\beta$ [mm]						
			0,7 a 1,00	1,1 a 1,5	1,6 a 1,8	1,9 a 3,1	3,3 a 4,2	4,3 a 5,7	5,8 a 6,4
$\alpha$ [mm]	2,6 a 4,8	raio r	-	0,3	0,4	0,4	0,8	1,2	-
		redução área	0,15	0,08	0,14	0,14	0,55	1,24	-
	4,8 a 19	raio r	-	-	-	0,8	0,8	1,2	1,6
		redução área	0,15	0,35	0,65	0,55	0,55	1,24	2,2

Fonte: Adaptado de Ries (2007)

Devido a variações nos métodos de fabricação de fios, vinculados às suas limitações de produção, ocorrem situações em que as densidades superficiais de corrente estabelecidas inicialmente não podem ser alcançadas. Isto pode ocorrer devido ao excesso de condutores na formação do feixe ou à falta de um condutor capaz de atender a esse parâmetro específico. Portanto, a [Equação 3.19](#) deve ser utilizada de maneira iterativa para tentar, em conjunto com a corrente de fase (e linha) e com a disposição do arranjo de condutores existentes, atingir a densidade de corrente presente no enrolamento de baixa tensão.

$$J_{BT} = \frac{I_{FaseBT}}{S_{FioRetangular}} \quad (3.19)$$

Ademais, é importante considerar a isolamento requerida pelos condutores para garantir a rigidez dielétrica necessária. Esta característica é avaliada por meio de testes normalmente realizados de acordo com normas como a *NBR-5356*, *NBR-5440* e *IEC-60076*, especialmente relacionados aos testes de tensão induzida, aplicada e de impulso atmosférico. Como já mencionado, o condutor do tipo retangular é isolado ou com tiras de papel kraft ou de papel microcrepado com leves trespassamentos, até atingir a espessura necessária para a sua classe de tensão respectiva (RIES, 2007). A [Figura 19](#) ilustra tal isolamento.

**Figura 19 – Condutor Retangular - Isolamento Trespessado.**

Fonte: China e Tommasini (2008)

Desta forma, é possível combinar as informações de largura e espessura do condutor retangular com o isolamento correspondente, resultando no condutor isolado que será efetivamente utilizado para compor o enrolamento. As dimensões finais de largura ( $L_{FioIsoladoBT}$ ) e espessura ( $E_{FioIsoladoBT}$ ) são calculadas utilizando as seguintes equações:

$$L_{FioIsoladoBT} = L_{FioRetangular} + Isolacao \quad (3.20)$$

$$E_{FioIsoladoBT} = E_{FioRetangular} + Isolacao \quad (3.21)$$

Caso ainda seja necessário, é possível criar feixes de condutores retangulares em ambas direções com base na seção transversal calculada anteriormente. Basta considerar o número de condutores na axial ( $N_{CondAxialBT}$ ) e na radial ( $N_{CondRadialBT}$ ). Assim:

$$F_{AxialBT} = N_{CondAxialBT} L_{FioIsoladoBT} \quad (3.22)$$

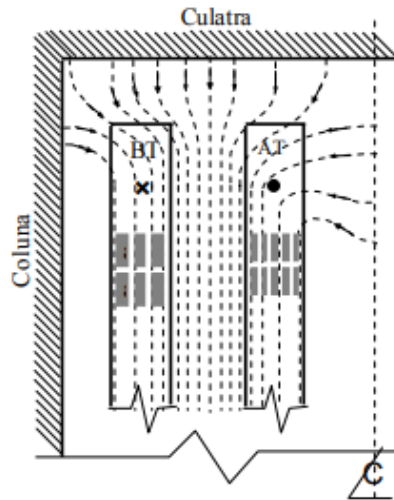
$$F_{RadialBT} = N_{CondRadialBT} E_{FioIsoladoBT} \quad (3.23)$$

Usualmente, necessita-se enrolar um número considerável de espiras no enrolamento de BT para alcançar a tensão de fase requerida e garantir a relação de transformação adequada. Se a bobina for projetada com apenas uma camada, sua altura se tornará excessivamente grande e inviável do ponto de vista econômico, uma vez que impacatará na altura da janela do núcleo. Deve-se dividir, então, a bobina em camadas. Na linha de distribuição, utiliza-se pelo menos duas camadas devido ao impacto que o número destas possui sob os dimensionais do núcleo, como a altura e largura da janela, acarretando-se portanto em mais matéria prima e maior custo.

Ao realizar a divisão das espiras em camadas, pode-se calcular o dimensional mecânico do enrolamento na direção axial (altura),  $H_{MecanicaBT}$ , utilizando o valor do feixe de condutores citado anteriormente. Deve-se levar em conta que, no início do processo de bobinagem, coloca-se meia-espira e, de forma similar, termina-se o bloco com meia-espira, totalizando uma espira a mais do que o projetado. Ainda, costuma-se utilizar um fator de crescimento ( $F_{CrescimentoAxial}$ ), devido à presença de não-idealidades e não-conformidades existentes nas máquinas de bobinagem dos condutores. O equacionamento que leva em conta tais considerações é dado pela [Equação 3.24](#).

$$H_{MecanicaBT} = \left( \frac{N_{BT}}{N_{CamadasBT}} + 1 \right) F_{AxialBT} \cdot F_{CrescimentoAxial} \quad (3.24)$$

De acordo com Ries (2007), é importante considerar as cabeceiras em cada bobina para garantir uniformidade e equilíbrio nas alturas das bobinas de BT e AT. Diferenças de altura podem resultar em maiores esforços eletromecânicos. Além disto, é nas regiões das cabeceiras que ocorrem os "franjamientos" dos fluxos magnéticos de dispersão, resultando em aquecimentos devido as correntes induzidas. Tais regiões são então uma das zonas de constante estudo e observação. Ainda, são nestes setores onde estão presentes as bases de apoio para suporte dos calços vazados que serão preenchidos e servirão de passagem para o óleo refrigerante

**Figura 20 – Franjamento do fluxo magnético presente nas cabeceiras dos enrolamentos.**

Fonte: Ries (2007)

ser conduzido ao restante dos enrolamentos. A Figura 20 ilustra o comportamento do fluxo magnético nas regiões das cabeceiras.

Com a determinação do dimensional da cabeceira adequada ( $H_{CabeceiraBT}$ ), referenciada a sua classe de tensão, é possível obter a altura que a bobina do enrolamento de baixa tensão ( $H_{BobinaBT}$ ) possuirá, calculado por:

$$H_{BobinaBT} = H_{MecanicaBT} + 2 H_{CabeceiraBT} \quad (3.25)$$

Com o eixo axial devidamente definido, pode-se partir para o dimensionamento do enrolamento no eixo radial. Neste sentido, é importante determinar o papel diamantado e termoestabilizado que será utilizado como isolante entre as camadas, a fim de garantir a rigidez dielétrica necessária para suportar as tensões aplicadas e induzidas durante os ensaios. Uma das possíveis abordagens para calcular essa isolação requisitada é por meio do seguinte equacionamento (FRIEDRICH, 2019):

$$Isolamento_{camadasBT} = \frac{(E_t \frac{N_{BT}}{N_{CamadasBT}}) - 100}{100} K_i \quad (3.26)$$

A constante  $K_i$  está diretamente relacionada ao nível de controle de qualidade no fornecimento do papel isolante utilizado no processo de enrolamento. Os seguintes valores de  $K_i$  são atribuídos de acordo com o controle aplicado:

- $K_i = 0,03$  - Quando se há o controle total do processo de recebimento e inspeção do material isolante a ser utilizado no processo do enrolamento;
- $K_i = 0,05$  - Quando se há o controle razoável do processo de recebimento e inspeção do material isolante a ser utilizado no processo do enrolamento;

- $K_i = 0,06$  - Quando não se há o controle do processo de recebimento e inspeção do material isolante a ser utilizado no processo do enrolamento.

Um dos tipos de papel termoestabilizado e diamantado que é comumente utilizado entre as camadas de um enrolamento é mostrado na [Figura 21](#).

**Figura 21 – Papel diamantado termoestabilizado.**



Fonte: RVB (2023)

Após o papel termoestabilizado ser definido, considerando-se a espessura do feixe na direção radial e o fator de crescimento na mesma direção - dado que as máquinas bobinadeiras possuem erros atrelados à sua operação e precisão, é possível utilizar [Equação 3.27](#) para calcular os diâmetros ( $D_i$ ) após cada camada.

$$D_i = D_{i-1} + 2(F_{RadialBT} + Isolamento_{CamadasBT}) \cdot F_{CrescimentoRadial} \quad (3.27)$$

De maneira a completar esta subseção, deve-se calcular a resistência associada ao enrolamento de baixa tensão. Esta grandeza será fundamental para, posteriormente, realizar a análise de perdas Joule nos enrolamentos. Uma das maneiras de realizar este cálculo é pela definição da resistência, dada por:

$$R = \frac{\rho l_{MedioBT}}{S_{CondutorBT}} \quad (3.28)$$

Sendo os parâmetros

- $\rho$  é a resistividade elétrica associada ao material do condutor de corrente elétrica [ $\Omega \cdot m$ ];
- $l_{MedioBT}$  é o comprimento equivalente da espira média associada ao enrolamento em questão [m];
- $S_{CondutorBT}$  é a seção transversal do condutor [ $m^2$ ].

Adaptando-se para este caso em questão, deve-se considerar que o enrolamento de baixa tensão é disposto em camadas e possui geometria circular. Logo, o comprimento da espira média é obtido pelos diâmetros internos ( $D_{InternoBT}$ ) e externos ( $D_{ExternoBT}$ ) da bobina de baixa tensão, isto é:

$$l_{MedioBT} = \frac{(D_{InternoBT} + D_{ExternoBT})}{2} \pi \quad (3.29)$$



Para a resistividade, tem-se a [Tabela 7](#) que dispõe as informações mais relevantes sobre os dois principais materiais que são usualmente empregados nos condutores.

**Tabela 7 – Características dos materiais condutores.**

Tipo	Alumínio	Cobre
Dureza [N/mm <sup>2</sup> ]	35-50	60-80
Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]	2700	8910
Resistividade [mΩ · m] – 20°C	29,20	16,20
α	0,0039	0,00382

Fonte: O autor

O parâmetro de resistividade do alumínio é dado na temperatura de referência a 20°C. Deve-se normalizar tal parâmetro ( $\rho$ ) para a temperatura requisitada de acordo com a aplicação do transformador e definida por norma. A mesma temperatura é utilizada para a determinação do cálculo de perdas nos enrolamentos e impedância de curto-circuito. Tal adaptação pode ser realizada com a equação:

$$\rho = \rho_{referencia} + \alpha(T - 20)\rho_{referencia} \quad (3.30)$$

Sendo os parâmetros explicitados por:

- $\alpha$  é o coeficiente atrelado à temperatura e ao material específico [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ];
- T é a temperatura especificada e requisitada de acordo com a classe de operação do equipamento [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\rho_{referencia}$  é a resistividade na temperatura de referência. Para o alumínio, é referenciada a 20°C [ $\Omega \cdot m$ ]

Então, pode-se obter a resistência do enrolamento de baixa tensão ( $R_{BT}$ ) ao se considerar o número de espiras presentes em uma das três fases, a resistividade adaptada para a temperatura de projeto ( $\rho$ ), o comprimento da espira média do enrolamento ( $l_{MedioBT}$ ) e a seção transversal do feixe de condutores cuja corrente atravessa ( $F_{RadialBT}$ ). Assim, tem-se:

$$R_{BT} = \frac{\rho l_{MedioBT} N_{BT}}{F_{Radial}} \quad (3.31)$$

Por fim, deve-se calcular a massa aproximada que as três fases do enrolamento de baixa tensão possuirão,  $M_{BT}$ . Considera-se, portanto, o número de espiras presentes em uma das fases ( $N_{BT}$ ), o comprimento da espira média ( $l_{MedioBT}$ ), a massa específica do material ( $\gamma_{Aluminio}$ ) que é utilizado no enrolamento e a seção do condutor utilizado no enrolamento ( $S_{CondutorBT}$ ), e tem-se:

$$M_{BT} = 3 N_{EspirasBT} l_{MedioBT} S_{CondutorBT} \gamma_{Aluminio} \quad (3.32)$$

### 3.2.2 Enrolamento de Alta Tensão

Conforme mencionado anteriormente, o enrolamento de alta tensão é posicionado sob o enrolamento de baixa tensão. No entanto, entre esses dois enrolamentos, existem espaçamentos compostos por canais (estecas de madeira) que são preenchidos com líquido dielétrico refrigerante e isolamentos sólidos, como cilindros de papel presspahn de pequenas espessuras. Estes espaçamentos são projetados com base em estudos que abordam a rigidez dielétrica e a resistência a rupturas nos ensaios de tensão aplicada, tensão induzida, tensão de impulso plena e cortada. Além disso, estes espaçamentos também garantem a adequada circulação do líquido dielétrico, proporcionando a refrigeração necessária das bobinas e do núcleo. O dimensionamento dos canais deve considerar a taxa de circulação do óleo, a temperatura de operação do transformador, a viscosidade do óleo e a perda de carga deste. A [Figura 22](#) ilustra um tipo de esteca utilizada para compor os canais de passagem de óleo.

**Figura 22 – Talas utilizadas para compor os canais de passagem de óleo.**



**Fonte: RVB (2023)**

Devido às suas propriedades estruturais, os dielétricos líquidos e gasosos têm a capacidade de regenerar suas capacidades dielétricas, mesmo após sofrerem pequenas descargas ou centelhamentos. Essa regeneração ocorre, mas há uma leve mitigação da rigidez dielétrica. Por outro lado, os materiais isolantes sólidos, embora possam suportar tensões e temperaturas mais altas do que os materiais líquidos e gasosos, não possuem a capacidade de regeneração. Após a ruptura da rigidez dielétrica, estes materiais sofrem carbonização, comprometendo totalmente suas estruturas. Assim, a temperatura desempenha um papel fundamental na diminuição da rigidez dielétrica desses materiais, sendo que, à medida que a temperatura aumenta, a capacidade de isolamento diminui, reduzindo conseqüentemente a vida útil do transformador (RIES, 2007).

De acordo com Ries (2007), a rigidez dielétrica de um material isolante varia significativamente de acordo com a geometria dos eletrodos entre os quais o material é utilizado. Medir com precisão esses valores é difícil, pois exigiria um ambiente ideal, com campo de excitação totalmente uniforme, ausência de descargas, influência do meio ambiente e aquecimento insignificante devido às perdas dielétricas - condições muito difíceis de serem alcançadas.

Como referência para um bom dielétrico, podem ser considerados valores de rigidez de até 5,0 [kV/mm].

A [Tabela 8](#) apresenta valores de permissividades elétricas relativas comumente utilizadas para dois tipos principais de isolantes.

**Tabela 8 – Permissividade elétrica relativa - Distância BT-AT.**

Material	Permissividade Elétrica Relativa
Óleo mineral	$\epsilon_r = 2,20$
Presspahn imerso em óleo	$\epsilon_r = 4,50$

Fonte: O autor

Existem equações que permitem aproximar a geometria quando se têm eletrodos com formato cilíndrico e espaçamentos preenchidos por diferentes dielétricos. Essas equações são derivadas das equações de Maxwell para a eletrostática que permite determinar as capacitâncias e o campo elétrico entre os cilindros ([Equação 2.16](#) e [Equação 2.17](#)). A equação de campo elétrico presente em cada um desses dielétricos ( $E_{rdi}$ ) quando se há uma tensão aplicada ( $V_{Aplicada}$ ) é dada por (NAIR, 2021).

$$E_{rdi} = \frac{V_{Aplicada}}{r_i \left[ \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots \right]} \quad (3.33)$$

A partir do campo elétrico presente em cada um dos elementos contidos na distância entre o enrolamento de baixa e alta tensão, pode-se dar continuidade ao processo de discretização do enrolamento de maior tensão.

Assim, ao empregar a equação que correlaciona a tensão de linha no enrolamento de baixa tensão ( $V_{BT}$ ) com a tensão de linha no enrolamento de alta tensão ( $V_{AT}$ ), juntamente com o conhecimento do número de espiras em um dos enrolamentos, é possível determinar o número de espiras que o outro enrolamento deve ter para garantir a relação de transformação. A expressão que relaciona essas grandezas é dada por:

$$\frac{V_{AT}}{V_{BT}} = \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \quad (3.34)$$

Pode-se, portanto, obter o número de espiras que o enrolamento de alta tensão deve ter ( $N_{AT}$ ). Entretanto, como disposto na [Tabela 2](#), o grupo de ligação que o transformador trifásico deve atender é Dyn1. Deste modo, o enrolamento de alta tensão deve ser disposto em delta. A [Equação 3.34](#) traz o número de espiras presentes na coluna (fase). Deve-se, portanto, multiplicar este resultado por  $\sqrt{3}$  para se ter o devido número de espiras requisitado pela ligação ( $N_{AT\Delta}$ ), isto é:

$$N_{AT\Delta} = N_{AT} \sqrt{3} \quad (3.35)$$

Com isto posto, o material utilizado para compor este enrolamento será o mesmo presente na baixa tensão, ou seja, alumínio. De modo análogo ao que fora estabelecido no outro

enrolamento, este tipo de material é usualmente atrelado a uma densidade superficial máxima de corrente de 2,80 [A/mm<sup>2</sup>]. Ao contrário do enrolamento de baixa tensão, cujos condutores necessários para atender uma densidade superficial de corrente eram do tipo retangular, no enrolamento de alta tensão, serão empregados condutores circulares com diâmetros e dimensões padronizados pela AWG, mencionada anteriormente. Embora estes condutores não possuam uma taxa ótima de ocupação do enrolamento, como as lâminas ou os condutores retangulares, eles costumam compensar esta limitação com um custo de produção mais baixo. A [Tabela 9](#) apresenta alguns parâmetros dimensionais normalizados pela AWG como exemplo.

**Tabela 9 – Tabela AWG - Características condutores circulares.**

Número AWG	Diâmetro [mm]	Seção [mm <sup>2</sup> ]
0	8,252	53,48
1	7,348	42,41
2	6,544	33,63
3	5,827	26,67
4	5,189	21,15
5	4,621	16,77
6	4,115	13,30
7	3,665	10,55
8	3,264	8,36
9	2,906	6,63
10	2,588	5,26
11	2,305	4,17
12	2,053	3,31
13	1,828	2,63
14	1,628	2,08

**Fonte - Adaptado de UDESC (2013)**

Com a disposição da [Tabela 9](#), a seção transversal do condutor circular ( $S_{ConductorCircular}$ ), conhecendo-se seu diâmetro ( $D_{ConductorAT}$ ), pode ser calculada pela expressão:

$$S_{ConductorCircular} = \pi \left( \frac{D_{ConductorAT}}{2} \right)^2 \quad (3.36)$$

Além da escolha do condutor, é necessário também se atentar à isolamento necessária. Por se tratar de condutores circulares, geralmente, é feito o isolamento com verniz, fitas de papel, seda ou ainda fibra de vidro (SALUSTIANO, 2012).

Novamente, por causa da deficiência presente na taxa de ocupação do enrolamento que os condutores circulares possuem, estes não são muito eficientes para serem utilizados em paralelo ao compor um feixe. Emprega-se, portanto, no máximo dois condutores na direção axial a fim de evitar espaços vazios nos enrolamentos. Uma das práticas para contornar a problemática da ineficiência de ocupação do enrolamento é realizar um leve achatamento nos condutores circulares. Entretanto, isso faz com que a geometria do condutor não seja mais do tipo circular,

introduzindo-se uma diferença entre o eixo axial ( $L_{FioIsoladoAT}$ ) e radial ( $E_{FioIsoladoAT}$ ). As seguintes equações expressam tais dimensões em ambos os eixos:

$$L_{FioIsoladoAT} = D_{CondutorAT} \cdot (1,00 + Achatamento) + Isolamento_{FioCircular} \quad (3.37)$$

$$E_{FioIsoladoAT} = D_{CondutorAT} \cdot (1,00 - Achatamento) + Isolamento_{FioCircular} \quad (3.38)$$

Ainda, analogamente ao que ocorre com o condutor retangular, caso seja necessário utilizar mais de um condutor em alguma das direções, deve-se detalhar a composição do feixe em ambos os eixos do enrolamento, isto é, no eixo axial,  $F_{AxialAT}$ , e radial,  $F_{RadialAT}$ .

$$F_{AxialAT} = N_{CondAxialAT} L_{FioIsoladoAT} \quad (3.39)$$

$$F_{RadialAT} = N_{CondRadialAT} E_{FioIsoladoAT} \quad (3.40)$$

Com a disposição dos feixes, é possível dimensionar o número de espiras por camada que o enrolamento de alta tensão deve possuir. Da mesma maneira que se precede na BT, devido às não-conformidades presentes nas bobinadeiras que realizam o isolamento em camadas, considera-se um desvio percentual na direção axial ( $F_{CrescimentoAxial}$ ). Deve-se considerar ainda que o enrolamento começa e termina com meia espira, totalizando uma espira completa. Logo, o número de espiras que a AT deve acomodar para que fique com altura mecânica similar à BT ( $H_{MecanicaBT}$ ), considerando uma pequena folga percentual é dado por:

$$\frac{N_{AT}}{N_{CamadasAT}} = \left( \frac{H_{MecanicaBT} \cdot Folga}{F_{AxialAT} \cdot F_{CrescimentoAxial}} \right) - 1 \quad (3.41)$$

A altura mecânica do enrolamento ( $H_{MecanicaAT}$ ) pode ser, então, calculada a partir do número de espiras por camada e da composição de condutores circulares achatados escolhidos ( $F_{AxialAT}$ ), com a inclusão de uma espira a mais para completar o enrolamento, isto é:

$$H_{MecanicaAT} = \left( \frac{N_{AT}}{N_{CamadasAT}} + 1 \right) F_{AxialAT} \cdot F_{CrescimentoAxial} \quad (3.42)$$

Similarmente ao que fora feito no enrolamento de baixa tensão, deve-se ainda escolher a altura da cabeceira que deve estar presente no enrolamento de alta tensão ( $H_{CabeceiraAT}$ ), para que este fique com dimensionais semelhantes ao outro enrolamento. Tal procedimento ainda melhora a suportabilidade mecânica para os apoios dos calços que servem para a passagem de óleo. Então, com esta métrica definida, a altura da bobina de alta tensão é dada pela [Equação 3.43](#).

$$H_{BobinaAT} = H_{MecanicaAT} + 2 H_{CabeceiraAT} \quad (3.43)$$

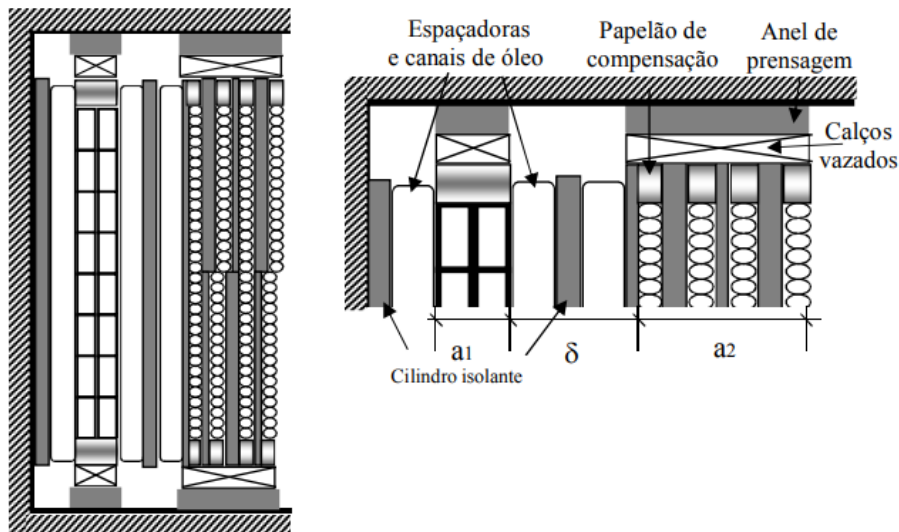
Também, deve-se definir o isolamento que precisa estar presente entre as camadas do enrolamento de alta tensão. Como mencionado anteriormente, a diferença de potencial elétrico entre as espiras subsequentes é pequena, bastando apenas o isolamento de algumas tiras de papel kraft ou envernizamento do próprio fio. Já para o isolamento entre camadas, os principais

pontos estão onde há a troca de sentido de bobinagem, presente entre o início de uma camada e o final de outra. No enrolamento de alta tensão, estes gradientes de potencial elétrico são um pouco maiores do que na baixa tensão. Costuma-se, então, utilizar o isolamento progressivo de papel, começando com uma pequena espessura e bobinando mais papel até atingir a espessura necessária para haver um valor de rigidez dielétrica seguro.

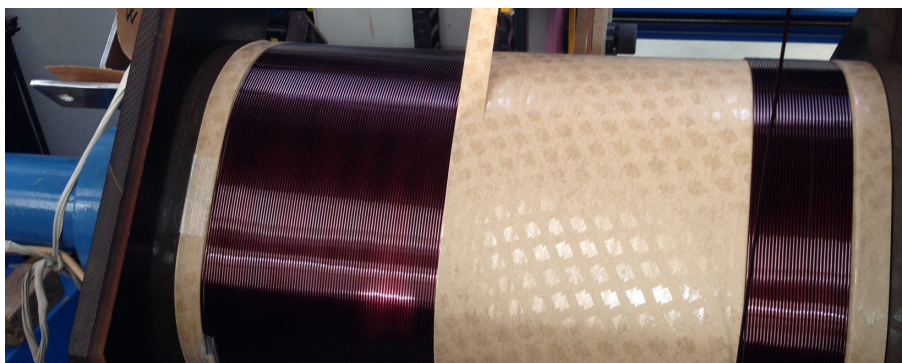
A equação a ser utilizada para calcular o isolamento necessário entre camadas é a mesma que fora utilizada para o enrolamento de baixa tensão, [Equação 3.26](#), apenas se deve adaptar esta para o número de espiras e número de camadas presentes no enrolamento de alta tensão. A [Figura 23](#) ilustra o isolamento progressivo existente entre camadas e detalhes estruturais presentes nas cabeceiras e em toda composição radial dos enrolamentos de baixa e alta tensão.

**Figura 23 – Enrolamento de AT - Isolação progressiva.**

(a) Isolamento progressivo AT.



(b) Isolamento progressivo na máquina.



Fonte: Ries (2007) e WEIDMANN (2023)

Com a caracterização do eixo radial, é possível realizar o fechamento da culatra sob as três colunas do núcleo, de maneira a dimensionar a parte final do núcleo. Para alcançar este objetivo, é essencial calcular a altura da janela ( $H_{Janela}$ ), que é determinada com base em certas distâncias necessárias ( $H_{jugo-bobina}$ ) para garantir o pleno funcionamento da parte ativa.

Conforme mostrado na [Figura 23](#), calços vazados com espessuras específicas são colocados sob as cabeceiras de maneira a permitir a passagem do óleo dielétrico refrigerante para os enrolamentos e anéis de prensagem. De acordo com Ries (2007), tanto estes calços quanto as estecas presentes nos canais radiais devem ter uma espessura mínima de 5,00 [mm] para garantir o resfriamento adequado sem perda de energia e eficiência devido ao atrito viscoso.

A partir da discretização do enrolamento tanto nos eixos axial como radial, é possível, por meio da [Equação 3.29](#) e da [Equação 3.31](#) calcular a resistência por fase da AT ( $R_{AT}$ ), realizando apenas pequenas mudanças devido aos diâmetros diferentes que as bobinas possuem. Ainda, a massa do enrolamento ( $M_{AT}$ ) também pode ser calculada pela [Equação 3.32](#), apenas adaptando as grandezas para este enrolamento.

Desta forma, dado que as duas bobinas possuem alturas bem similares devido aos dimensionais das cabeceiras, considera-se a altura da maior bobina para determinar a altura da janela ( $H_{Janela}$ ) por meio da [Equação 3.44](#).

$$H_{Janela} = H_{BobinaBT} + 2H_{jugo-bobina} \quad (3.44)$$

Para haver o fechamento da janela no sentido radial, deve-se levar em conta o diâmetro radial externo da bobina de alta tensão ( $D_{ExternoAT}$ ) em conjunto com uma distância adequada que deve existir perante as fases consecutivas ( $D_{entre-fases}$ ), também chamada de *Entre-fases*. Segundo Ries (2007), o isolamento entre as fases de um transformador deve ser projetado para suportar as tensões induzidas nos respectivos ensaios. Assim, é comum utilizar valores cujos gradientes médios sejam de até 14 ou 15 [kV/mm] ou ainda, um valor de segurança que seja pertinente ao projeto.

Consecutivamente, a distância entre-eixos (*Entre – Eixos*), responsável por delimitar a janela do núcleo e seu comprimento é dada por:

$$Entre - Eixos = D_{ExternoAT} + D_{entre-fases} \quad (3.45)$$

Com estas duas últimas métricas, é possível, em conjunto com outros dimensionais das bobinas e da largura da maior chapa dos degraus ( $L_1$ ), delimitar toda a região do núcleo. É importante determinar esta região para que, posteriormente, consiga-se calcular as perdas à vazio atreladas a este núcleo. Assim, a altura ( $H_{Nucleo}$ ) e a largura ( $L_{Nucleo}$ ) do núcleo são dadas pelas equações:

$$H_{Nucleo} = H_{Janela} + 2L_1 \quad (3.46)$$

$$L_{Nucleo} = 2Entre - Eixos + L_1 \quad (3.47)$$

Com os dimensionamentos do núcleo e dos enrolamentos finalizados, o próximo capítulo abordará o cálculo das perdas e da impedância percentual do transformador.





---

## Cálculo de Perdas e da Impedância

O transformador, assim como todos os outros dispositivos eletromagnéticos, é, na prática, um equipamento que contém não-idealidades, as quais, por sua vez, acarretam perdas que não podem ser desconsideradas nos cálculos de eficiência (rendimento) desses equipamentos. Embora essas perdas existam e não possam ser completamente contornadas, ainda sim, o transformador é um dispositivo eletromecânico que possui alto índice de rendimento, podendo este chegar a cerca de 99% (SALUSTIANO, 2012). Desta maneira, a norma brasileira NBR-5356 impõe tolerâncias para as perdas garantidas. Estas devem ser, caso o cliente não requisiute suas próprias perdas garantidas, de 6,00% e 10,00% para as perdas totais e perdas à vazio, respectivamente. Assim, segundo Ries (2007), pode-se elencar as perdas em diferentes tipos:

- Perdas Magnéticas no Núcleo: Atreladas aos fenômenos de tensões induzidas provenientes de campos magnéticos variáveis no tempo e do comportamento dos materiais ferromagnéticos. Essas são subdivididas principalmente em:
  - Perdas por Histerese: São dadas pela natureza do ciclo de histerese presente nos materiais ferromagnéticos que são utilizados na composição do núcleo através das mudanças de excitação presentes nos dipolos magnéticos por meio de um campo magnético variável;
  - Perdas por Correntes de Foucault: Por causa da disposição de uma alimentação variável no tempo, tem-se uma corrente elétrica também variável, e, esta, através da [Equação 2.4](#) implica em um campo magnético variável no tempo que gera correntes induzidas no núcleo e em elementos condutores adjacentes (vigas, tirantes e tanque) dos transformadores.
- Perdas nos Enrolamentos: Associadas às correntes dos diferentes tipos de cargas presentes na saída do transformador. Essas perdas podem ser divididas em:
  - Perdas Ôhmicas: São perdas equivalentes à passagem de uma corrente contínua cujo módulo é o mesmo da corrente eficaz nos condutores que compõem o enrolamento;

- Perdas por Correntes Parasitas: Perdas associadas aos fluxos de dispersão que são dependentes da corrente de carga. Essas perdas são relativamente pequenas e trabalhosas de serem analisadas;
- Perdas pela Circulação de Corrente em condutores paralelos: Perdas que ocorrem quando há condutores em paralelo. Para mitigar este tipo de perda, é realizada a técnica de transposição dos cabos de maneira que os condutores em paralelo tenham o mesmo comprimento.

Nesta seção são calculadas apenas as perdas magnéticas no núcleo e as perdas nos enrolamentos. Esta metodologia já é suficiente pois, segundo Ries (2007), são as maiores perdas e as que geram mais impacto no cálculo de rendimento do transformador.

## 4.1 Perdas à Vazio

Como citado anteriormente, as perdas magnéticas no núcleo são divididas em outras duas principais perdas, isto é, perdas relacionadas ao ciclo de histerese dos materiais ferromagnéticos e as perdas por correntes parasitas (ou perdas por correntes de Foucault) que existem devido à natureza variável do fluxo magnético presente na excitação.

Segundo Kennedy (1998), as perdas por histerese podem ser interpretadas de maneira que, supondo-se, novamente uma excitação sinusoidal de corrente, o fluxo magnético advindo desta será também variável e com morfologia do tipo sinusoidal. Desta maneira, os materiais ferromagnéticos são estruturados por dipolos magnéticos, similares a pequenos ímãs, e estes, com a devida excitação, podem mudar suas orientações de acordo com a direção do campo magnético variável aplicado a eles. Assim, estas trocas de orientações geram movimentação molecular e atrito dissipado na forma de calor.

Estas perdas por histerese ( $p_H$ ) são dependentes do valor da frequência do sinal variável de alimentação ( $f$ ), do módulo da indução magnética máxima admitida ( $B_{Max}$ ), das características do material ferromagnético empregado ( $x$ ) e da natureza do fluxo magnético variável no tempo (pulsante ou rotativo - existente nas máquinas elétricas girantes -  $k_H$ ). A [Equação 4.1](#) reúne estas variáveis envolvidas.

$$p_H = k_H f B_{Max}^x \quad (4.1)$$

Ainda, como supracitado, existem também as perdas relacionadas às correntes parasitas no núcleo. Estas são provenientes do fluxo magnético variável no tempo advindo das correntes de alimentação presentes nos enrolamentos e são baseadas pela Lei de Faraday-Lenz - [Equação 2.18](#), ou seja, formação de tensões induzidas no material condutor que compõe o núcleo. De maneira a mitigar este fenômeno, o núcleo é montado a partir de laminações, e não de um bloco maciço e contínuo.

As perdas por correntes de Foucault ( $p_F$ ) são atreladas ao valor da frequência de operação do sinal de excitação nos enrolamentos ( $f$ ), à resistividade do material ferromagnético ( $\rho$ ), ao valor eficaz da indução magnética ( $B_{RMS}$ ), à espessura das chapas laminadas ( $t$ ) empregadas na montagem do núcleo e à constante atrelada ao sistema de unidades a ser utilizado ( $k_F$ ). A [Equação 4.2](#) associa estas grandezas necessárias para a determinação das perdas por correntes de Foucault.

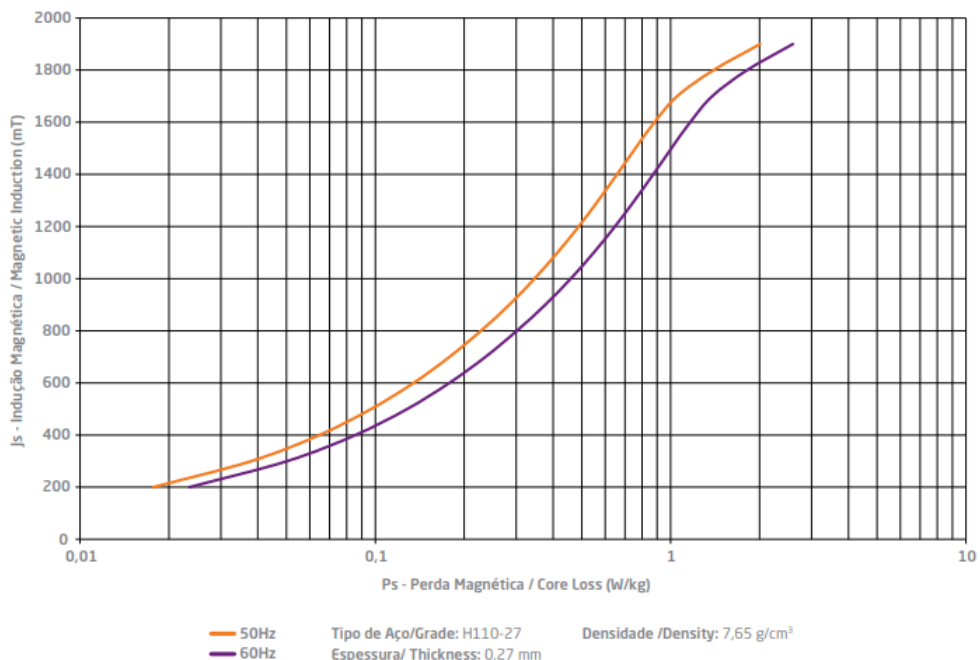
$$p_F = k_F f^2 t^2 \frac{B_{RMS}^2}{\rho} \quad (4.2)$$

Pelo grande interesse comercial que os fabricantes de chapas de aço-silício possuem na venda de seus insumos, na prática, é usual que estes já disponibilizem tabelas que contemplem ambas as perdas consideradas por meio das perdas à vazio totais ( $p_0$ ) - em [W/kg], isto é:

$$p_0 = p_H + p_F \quad (4.3)$$

É comum, em projetos, que se considere o mesmo valor de perdas à vazio utilizado em transformadores previamente fabricados, de maneira a se ter a validação das chapas empregadas. Um exemplo de curva que ilustra as perdas à vazio associadas às duas principais frequências de operação industriais é mostrada na [Figura 24](#).

**Figura 24 – Curva de perdas à vazio - APERAM.**



**Fonte: APERAM (2023)**

Com o valor de perdas à vazio determinado, é possível, em conjunto com a geometria do núcleo dimensionado, estimar o quanto de potência à vazio será necessária para suprir tal núcleo. Entretanto, deve-se primeiro, definir algumas métricas de maneira a obter sua massa final, parâmetro principal para o cálculo da potência à vazio. Uma destas métricas é o caminho

equivalente que o fluxo magnético mútuo percorre de maneira ( $l_{Nucleo}$ ) perpendicular à seção transversal deste. Tal caminho pode ser discretizado por meio da [Equação 4.4](#).

$$l_{Nucleo} = 3H_{Janela} + 4Entre - Eixos + 2D_{Nucleo} \quad (4.4)$$

Com o caminho médio do núcleo definido, deve-se associar este com a seção transversal do molde/mandril, também definida no [Capítulo 3](#) por meio da relação imposta entre o *Fator de Empilhamento* ( $K_e$ ) e *Fator de Utilização* ( $K_u$ ), [Equação 3.9](#) e [Equação 3.11](#), obtendo-se o volume do núcleo ( $Vol_{Nucleo}$ ), como disposto em:

$$Vol_{Nucleo} = S_{Circulo} l_{Nucleo} \quad (4.5)$$

Com o volume dimensionado e se tendo a massa específica do aço-silício ( $\rho_{aco-silicio}$ ), dada por:

$$\rho_{aco-silicio} = 7650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

A massa aproximada do núcleo ( $M_{Nucleo}$ ) é, então, o produto deste volume aproximado do núcleo com a massa específica do aço-silício, isto é:

$$M_{Nucleo} = Vol_{Nucleo} \rho_{aco-silicio} \quad (4.6)$$

É possível então estimar a potência à vazio ( $W_0$ ) necessária para alimentar as perdas por histerese e por correntes parasitárias no núcleo em questão pela [Equação 4.7](#).

$$W_0 = p_0 M_{Nucleo} \quad (4.7)$$

## 4.2 Perdas nos Enrolamentos

Como descrito no início deste capítulo, existem, pelo menos, três tipos diferentes de perdas associadas aos enrolamentos. Segundo Ries, as perdas adicionais presentes nos enrolamentos não podem ser facilmente calculadas e ainda, são, geralmente, desprezadas já que não ultrapassam cerca de 5% da composição das outras perdas nos enrolamentos. Assim as perdas que possuem mais relevância devido à sua ordem de grandeza para o cálculo de rendimento e para os parâmetros de saída são as perdas ôhmicas nos enrolamentos ( $W_{cc_i}$ ), também chamadas de "perdas Joule". Estas perdas fazem a equivalência de uma corrente contínua cujo valor é igual ao módulo da corrente eficaz variável que atravessa os enrolamentos.

Uma maneira de calcular essas perdas num enrolamento trifásico  $i$  – *esimo* é dada pela [Equação 4.8](#).

$$W_{cc_i} = 3 R_i I_{fase_i}^2 \quad (4.8)$$

Como neste projeto há dois enrolamentos, deve-se calcular as perdas associadas a cada um dos enrolamentos. Entretanto, como disposto na [Tabela 13](#), presente no [Capítulo 3](#), já fora realizada a conversão da temperatura de referência para a temperatura de 75°C. Basta então,

para ambos os enrolamentos, resgatar suas respectivas resistências e multiplicar pelos fatores restantes presentes na equação de perdas Joule. Então, em conjunto com [Equação 3.31](#), pode-se escrever [Equação 4.8](#) de maneira que:

$$W_{cc_i} = 3 \frac{\rho_i l_{Medioi} N_i}{S_{FeixeRadial}} I_{fase_i}^2 \quad (4.9)$$

### 4.3 Impedância

Um dos parâmetros fundamentais na especificação de um projeto de transformador é a impedância deste. Trata-se de uma métrica que relaciona a razão entre a tensão de fase nominal com a corrente presente na mesma fase. Em sistemas trifásicos balanceados e equilibrados, pode-se particionar tal sistema em três sistemas monofásicos equivalentes. Ainda, para um transformador, dado suas características de não-idealidades e perdas associadas ao núcleo, existem dois tipos básicos de impedância:

- **Impedância do ramo de magnetização:** Trata-se da grandeza que está atrelada ao ramo de magnetização do núcleo. Possui uma parcela ativa referenciada às perdas do núcleo (histerese e correntes parasitas) e uma parcela reativa referenciada à corrente de magnetização necessária para suprir o núcleo e gerar o fluxo magnético mútuo que concatena nos enrolamentos adjacentes;
- **Impedância de curto-circuito:** É a impedância que pode ser obtida por meio do ensaio de curto-circuito do transformador. Possui relação com a carga que será imposta na saída ou entrada do transformador de maneira a visar o casamento de impedâncias entre as cargas e linhas de transmissão associadas ao sistema como um todo para obter a máxima transferência de potência entre estes equipamentos. Assim como a impedância do ramo magnetizante, também é subdividida em uma parte real e imaginária tal que a parte real é referenciada principalmente às perdas ôhmicas nos enrolamentos, enquanto que a parte imaginária é associada às características construtivas e de operação do transformador. É regulamentada pela própria NBR 5356, onde esta atribui que, sob a impedância percentual garantida por um fabricante de transformadores, há ainda uma tolerância de  $\pm 7,50\%$  que pode ser admitida. Portanto, será também objeto de estudo deste capítulo.

Segundo Kulkarni e Khaparde (2017), se o valor de impedância especificado é relativamente baixo, as correntes de curto-circuito e as forças eletromecânicas presentes serão de grande intensidade, o que impõe que as densidades de correntes nos enrolamentos deve ser baixa - acarretando em materiais com maiores dimensionais para compor tais enrolamentos, impactando diretamente no custo de fabricação e produção destas peças. Por outro lado, caso a impedância seja relativamente alta em comparação com sua potência aparente, haverá mais perdas parasitárias presentes tanto nos enrolamentos como também em elementos condutores

adjacentes de montagem, como as armaduras, porcas, arruelas e tirantes, impondo que o projetista leve em consideração o impacto das maiores temperaturas em todos estes elementos, acarretando em sistemas de refrigeração mais robustos para mitigar esta problemática. Ainda, é prática comum, tanto em normativas utilizadas como referências para cálculo de transformadores como nas tratativas de fabricantes de transformadores, dispor a impedância em valores percentuais. Estas ainda podem variar de acordo com a natureza e potência dos transformadores, podendo ser de cerca de 2,00% para transformadores de distribuição até 20,00% para transformadores de grandes potências presentes em subestações de transmissão.

Pelo fato da impedância de curto-circuito ser um fator primordial no cálculo e no dimensionamento de um transformador devido à sua importância supracitada, foram desenvolvidos diferentes métodos para calcular este componente ao longo do tempo. Existem técnicas mais simples para calcular essa impedância como também métodos usando equações diferenciais parciais como os métodos de Rabins e Roth. Neste trabalho será utilizado um método mais simples, que leva em consideração as aproximações dadas por Kapp e a geometria adotada por Rogowski, isto é:

- A permeabilidade magnética do material que compõe as chapas de aço-silício é adotada como sendo infinita. Assim, não há a existência de uma corrente de magnetização e todas as linhas de fluxo magnético são axiais na janela do transformador;

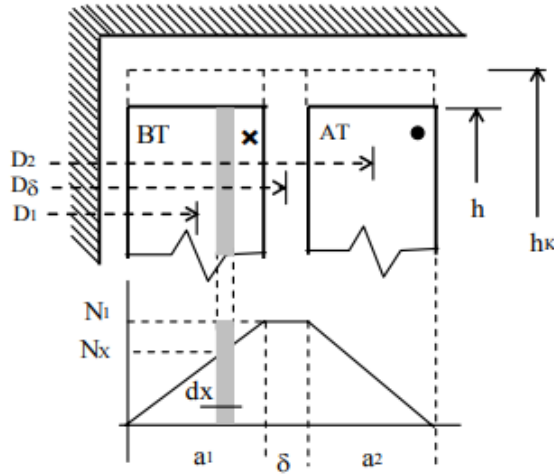
$$\mu_{Fe} \rightarrow \infty$$

- Embora na prática a permeabilidade magnética do núcleo seja alta, ela não é infinita, o que acarreta o fenômeno de "françamento" dos fluxos magnéticos advindos dos enrolamentos. Este fenômeno é mais aparente na região das cabeceiras onde, comumente, tem-se uma relutância magnética menor devido à disposição da laminação das chapas e da orientação dos grãos-orientados. Desta maneira, existe o *Fator de Rogowski* que modela a altura equivalente de uma bobina em questão caso o fluxo magnético não tivesse tal comportamento. É uma altura menor do que a altura real da janela do núcleo, mas ainda maior que a altura das bobinas (veja [Figura 25](#)).
- O transformador é uma estrutura tridimensional e o fluxo magnético visto de maneira frontal ou em corte lateral é diferente. Entretanto, na metodologia adotada neste trabalho, o transformador é considerado apenas em uma vista frontal;
- A montagem das bobinas é feita de maneira concêntrica, com o enrolamento de alta tensão sendo disposto sob o de baixa tensão, diferentemente do que ocorre nos enrolamentos sanduíche. Além deste tipo de montagem, os ampères-espiras são considerados uniformemente distribuídos ao longo do eixo axial, havendo portanto, a presença de um campo magnético apenas na direção axial.

Por intermédio destas considerações, uma das maneiras de se calcular a impedância percentual por fase ( $Z\%$ ) de um transformador é levar em conta a sua resistência percentual ( $R\%$ ) de qualquer um dos enrolamentos e a sua respectiva reatância indutiva de dispersão também percentual ( $X\%$ ), ou seja:

$$Z\% = \sqrt{R\%^2 + X\%^2} \quad (4.10)$$

**Figura 25 – Franjamento do fluxo magnético e altura de Rogowski.**



Fonte: Ries (2007)

Segundo Ries (2007), a indutância de dispersão ( $L$ ) de um transformador que possui dois enrolamentos concêntricos é uma grandeza que pode ser equacionada ao levar em consideração a altura equivalente da bobina ( $H_{Bobina}$ ) ponderada pelo Fator de Rogowski ( $K$ ), os diâmetros médios de cada um dos enrolamentos ( $D_1$  e  $D_2$ ) e entreferros ( $D_\delta$ ), e a espessura de cada um destes elementos ( $a_1$ ,  $a_\delta$  e  $a_2$ ). Assim, tem-se a equação:

$$L = \frac{\mu_0 \pi N^2}{h_K} \left( \frac{D_1 a_1}{3} + D_\delta a_\delta + \frac{D_2 a_2}{3} \right) \quad (4.11)$$

Sendo  $h_K$  a altura equivalente do caminho médio do fluxo na janela caso não houvesse franjamento do fluxo magnético nas cabeceiras. Essa altura pode ser aproximada por:

$$h_K = \frac{H_{Bobina}}{K} \quad (4.12)$$

O Fator de Rogowski ( $K$ ) é dado pela Equação 4.13.

$$K = 1 - \frac{a_1 + a_\delta + a_2}{\pi H_{Bobina}} \left( 1 - e^{-\frac{\pi H_{Bobina}}{a_1 + a_2 + a_3}} \right) \quad (4.13)$$

Com a reatância indutiva de dispersão ( $X$ ) sendo relacionada com a indutância de dispersão ( $L$ ) de modo que:

$$X = 2\pi f L \quad (4.14)$$

Então, adotando-se um dos enrolamentos como referência e ponderando estes pelos seus respectivos valores de base de potência aparente trifásica ( $S_{3\phi_{base}}$ ), corrente de fase ( $I_{F_{base}}$ ) e tensão de fase ( $V_{F_{base}}$ ), tem-se:

$$X_{\%} = \frac{X}{Z_{base}} 100 \quad (4.15)$$

Portanto, como descrito no início desta seção, [Equação 4.10](#), basta tomar um dos enrolamentos e calcular a resistência percentual ( $R_{\%}$ ) associada às perdas ôhmicas nestes, [Capítulo 3 - Equação 3.31](#), apenas dividindo esta pela mesma impedância de base ( $Z_{base}$ ) e multiplicando-a por 100, para obter:

$$R_{\%} = \frac{R}{Z_{base}} 100 \quad (4.16)$$

Tendo-se tanto a resistência percentual de um dos lados ( $R_{\%}$ ) e sua respectiva reatância indutiva de dispersão ( $X_{\%}$ ), é possível, por fim, obter a impedância percentual de curto-circuito ( $Z_{\%}$ ), por fase, do transformador em questão.

O próximo capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho.



---

## Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio da aplicação das equações e metodologias referenciadas nos dois capítulos anteriores.

Os resultados apresentados neste capítulo são divididos em duas partes principais. Na primeira parte, serão expostos os resultados dos cálculos efetuados por meio das tabelas e das equações dispostas nos [Capítulo 3](#) e [Capítulo 4](#) com o intuito de obter os dimensionais e parâmetros elétricos pré-estabelecidos para transformador trifásico de distribuição em questão. Na segunda, os resultados de uma simulação numérica realizada pela metodologia de Elementos Finitos, serão inclusos para efeitos de comparação com os resultados analíticos.

### 5.1 Dimensionamento do Núcleo

Partindo-se da [Equação 3.2](#), em conjunto com a potência aparente trifásica requisitada na [Tabela 2](#) e a constante  $K_t = 455,13 \cdot 10^{-3}$ , apresentada na [Tabela 3](#), pode-se determinar o número de Volts eficazes por espira ( $E_t$ ). Logo:

$$E_t = 20,35 \text{ [V/esp]}$$

Com o número de Volts eficazes por espira definido, adota-se, para este projeto, um valor máximo de indução magnética ( $B_{Max}$ ), presente na coluna central, de:

$$B_{Max} = 1,71 \text{ [T]}$$

Então, é possível obter a seção líquida de ferro ( $S_{FerroLiquida}$ ) pela aplicação da [Equação 3.8](#), tendo-se a frequência de operação do sinal sinusoidal disposta segundo [Tabela 2](#). Como resultado:

$$S_{FerroLiquida} = 446,10 \text{ [cm}^2\text{]}$$

De acordo com a [Equação 3.9](#), devido ao isolamento de alguns micrômetros presentes nas chapas de aço-silício, as seções brutas e líquidas das culatras e das colunas são diferentes.

Devido a este fato, neste projeto, adota-se um fator de empilhamento ( $K_e$ ) de:

$$K_e = 0,96$$

Conseqüentemente, em conjunto com este fator de empilhamento, para determinar o número de degraus que o núcleo deve possuir, é necessário calcular o diâmetro aproximado ( $D_{NucleoAprox}$ ) deste, com o auxílio da [Equação 3.10](#), resultando em:

$$D_{NucleoAprox} = 243,24 \text{ [mm]}$$

Tendo-se o diâmetro aproximado do núcleo e, com a informação dos intervalos de diâmetros presentes na [Tabela 4](#), obtém-se o número de degraus associados ao diâmetro do núcleo, isto é, sete degraus.

Então, deve-se retornar à seção bruta de empilhamento de ferro utilizada para compor o núcleo e ponderar esta pelo fator de utilização ( $K_u$ ) que, como determinado na [Equação 3.11](#), relaciona a seção bruta de ferro dos degraus com a área do círculo associada ao diâmetro do núcleo. Como disposto na [Tabela 5](#), para um núcleo cujo número de degraus é 7, tem-se um fator de utilização de:

$$K_u = 0,93$$

Calculado o fator de utilização associado a um núcleo com sete degraus, pode-se obter a seção transversal da circunferência circunscrita ( $S_{Circulo}$ ) a estes por meio da [Equação 3.11](#):

$$S_{Circulo} = 497,53 \text{ [cm}^2\text{]}$$

É possível, com o valor da seção do círculo, retomar à [Equação 3.10](#) para recalcular o diâmetro efetivo associado à circunferência circunscrita aos degraus. Esta circunferência é tomada como referência e é, usualmente, onde fica disposto o molde/mandril do núcleo empilhado circular.

Após o cálculo da circunferência que abrange os degraus, é preciso determinar as dimensões de cada um dos sete degraus que compõem a estrutura do núcleo. Utilizando a [Tabela 5](#) e a [Equação 3.12](#), é viável calcular as dimensões individuais das sete chapas do transformador. Esse cálculo é realizado multiplicando o diâmetro do círculo pela constante correspondente às razões entre as larguras das chapas e o diâmetro do núcleo empilhado.

De forma semelhante, a espessura das chapas pode ser calculada por intermédio da [Equação 3.13](#). Esta relaciona as larguras obtidas no parágrafo anterior com a hipotenusa de cada degrau que é constante, pois se trata do diâmetro do núcleo. Deve-se lembrar que, na montagem empilhada do núcleo, a partir do segundo degrau, divide-se igualmente a espessura dos degraus nas direções de crescimento do tanque/barra.

É válido ressaltar que, cada fabricante de transformadores possui técnicas para arredondamento e montagem das chapas que compõem cada um dos degraus. Neste projeto, será considerado um arredondamento dos das larguras dos degraus por múltiplos de 5.

Por fim, calcula-se a seção final de montagem das chapas empilhadas no núcleo com o uso da [Equação 3.14](#). Assim, as principais informações calculadas nesta seção de dimensionamento do núcleo empilhado circular são apresentadas na [Tabela 10](#).

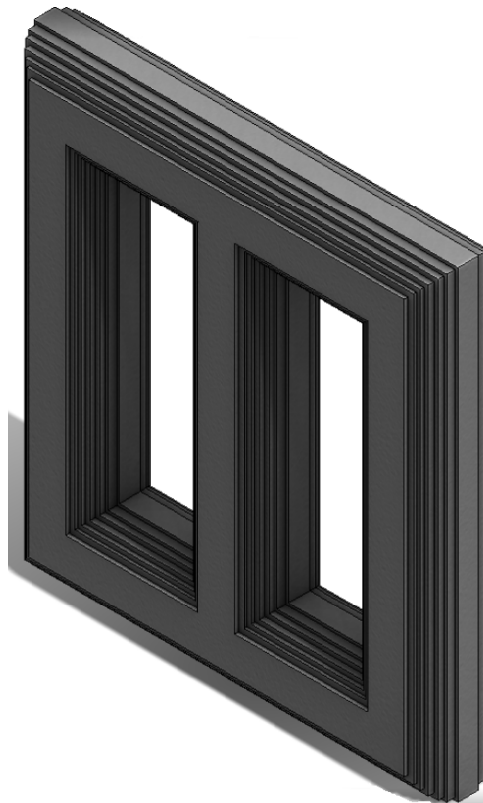
Um núcleo com sete degraus e dimensões similares é disposto na [Figura 26](#).

**Tabela 10 – Informações calculadas - Núcleo empilhado circular.**

	Largura das Chapas (Calculada)	$\theta_i$	Espessura das Chapas (TOTAL)	Espessura / 2	Largura das Chapas (Real)
<b>L1</b>	243,38	0,26	64,12	-	240,00
<b>L2</b>	226,02	0,46	46,62	23,31	220,00
<b>L3</b>	204,37	0,62	36,16	18,08	200,00
<b>L4</b>	177,94	0,79	31,10	15,55	170,00
<b>L5</b>	146,99	0,95	26,31	13,16	140,00
<b>L6</b>	109,74	1,12	22,20	11,10	100,00
<b>L7</b>	64,18	1,31	16,86	8,43	60,00
<b>Diâmetro do Núcleo [mm]</b>					252,00
<b>Área Líquida [cm<sup>2</sup>]</b>					446,10
<b>Área Círculo [cm<sup>2</sup>]</b>					497,53
<b>Seção de Montagem Final [cm<sup>2</sup>]</b>					464,52

**Fonte: O autor**

**Figura 26 – Núcleo empilhado - 7 degraus.**



**Fonte: O autor**

## 5.2 Dimensionamento da BT

Como consequência imediata do núcleo, tem-se os dimensionamentos dos enrolamentos que são montados de forma concêntrica. Ainda tomando como referência o núcleo obtido na seção anterior e disponibilizado pela [Tabela 10](#), é necessário calcular a distância presente entre a circunferência do núcleo e o início do enrolamento de baixa tensão ( $D_{Nucleo-BT}$ ). Uma das maneiras de obter esta distância é por meio da [Equação 3.15](#), que relaciona a seção do círculo definido pela circunferência com a constante  $k$ , presente na nona coluna da [Tabela 5](#). Assim, obtém-se a distância tal que:

$$D_{Nucleo-BT} = 26,04 \text{ [mm]}$$

Sobre o tipo de condutor escolhido para compor os enrolamentos de baixa tensão, neste transformador, será utilizado fio retangular de alumínio, dado que a tensão nominal de linha deste lado é de 4160 [V] e a impedância percentual a ser atendida é de 5,75 %.

Ainda, o número de espiras adotados para este enrolamento ( $N_{BT}$ ) pode ser obtido pelo uso da [Equação 3.16](#), reutilizando o número de Volts por espiras previamente definido no início deste capítulo. Como neste lado de baixa tensão será utilizada a disposição de terminais em configuração estrela, tem-se:

$$N_{BT} = 118$$

Para iniciar o projeto deste enrolamento, optou-se, inicialmente, por se adotar uma densidade superficial máxima de corrente ( $J_{maxAl}$ ) de 2,80 [A/mm<sup>2</sup>], já que o enrolamento em questão será de alumínio. Logo:

$$J_{maxAl} = 2,80 \text{ [A/mm}^2\text{]}$$

Tendo-se a densidade superficial de corrente de condução do enrolamento fixada e a respectiva corrente de fase, pode-se determinar a seção transversal que o condutor ou conjunto de condutores (feixe) deve possuir por meio da [Equação 3.19](#), para se aproximar destes parâmetros estabelecidos. Assim, para atender a densidade máxima de corrente idealizada ( $S_{IdealBT}$ ), deve-se ter uma seção transversal de condutor de:

$$S_{IdealBT} = 99,13 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Por limitações fabris e da disposição de fios retangulares presentes, tal densidade superficial de corrente não pôde ser atendida, pois haveria um número excessivo de condutores ou na radial ou na axial. Portanto, optou-se por melhor distribuir estes, com a disposição de 4 fios retangulares (2 na radial e 2 na axial) cujas dimensões de cada um é de 11,50 x 2,50 [mm]. Vale frisar que as dimensões dos fios também alteram a reatância de dispersão pois impactam na altura das bobinas, consequentemente, impactam na impedância, que, para este caso, está fixada em 5,75 % [Ω].

Com a nova disposição dos condutores retangulares, utiliza-se a [Equação 3.18](#) para calcular a seção de apenas um condutor, entretanto, como o feixe ( $S_{FeixeBT}$ ) é composto por 4 fios, deve-se adaptar a equação multiplicando esta pelo número de condutores, isto é:

$$S_{FeixeBT} = 112,80 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Como foi necessário realizar a mudança de seção transversal devido às limitações de fios existentes, deve-se novamente fazer um ajuste, reutilizando a [Equação 3.19](#). Resgata-se a corrente de linha em conjunto com a nova seção transversal do feixe para recalculer a densidade de corrente. A [Tabela 11](#) retoma alguns dos valores calculados e também introduz a nova densidade de corrente a ser utilizada neste projeto.

**Tabela 11 – Cálculos ajustados - Enrolamento de BT.**

<b>Enrolamento de BT - Y (Alumínio)</b>	
$\frac{Volts}{Espira}$	20,35
$N_{EspirasBT}$	118
$J_{Max}$ [A/mm <sup>2</sup> ]	2,80
$I_{FaseBT}$	277,57
$S_{IdealBT}$ [mm <sup>2</sup> ]	99,13
$S_{FeixeBT}$ [mm <sup>2</sup> ]	112,80
$J_{Nova}$ [A/mm <sup>2</sup> ]	2,46

**Fonte: O autor**

Como explicado no [Capítulo 3](#), necessita-se atender uma determinada relação de espiras tanto no lado de baixa tensão como no de alta tensão para que haja a relação de transformação necessária. Entretanto, o número de espiras costuma ser dividido em camadas ( $N_{CamadasBT}$ ) para que a altura da janela do núcleo não fique demasiadamente grande. Neste projeto, fora adotado quatro camadas para acomodar as espiras necessárias e mais dois canais para realizar a refrigeração do enrolamento de baixa tensão, assim:

$$N_{CamadasBT} = 4$$

Isto posto, divide-se o número de espiras presentes no enrolamento de baixa tensão ( $N_{BT}$ ) pelo número de camadas ( $N_{CamadasBT}$ ), obtendo-se o número de espiras que cada camada da BT deve possuir para acomodar as 118 espiras:

$$\frac{N_{BT}}{N_{CamadasBT}} = 29,50$$

Retorna-se aos dimensionais de cada fio retangular para adicionar a estes a isolação de papel kraft. Para os condutores escolhidos, será utilizada uma isolação unilateral de três voltas de

papel kraft trespassado, cuja espessura é de 0,06 [mm]. Logo, 0,18 [mm] em cada lado, tendo-se uma isolamento bilateral (*Isolacao*) de:

$$Isolacao = 0,36 \text{ [mm]}$$

Com a definição da isolamento de papel kraft, discretiza-se o feixe de fios nas direções axial ( $F_{AxialBT}$ ) e radial ( $F_{RadialBT}$ ) com o uso da [Equação 3.22](#) e [Equação 3.23](#), a fim de relacionar com o número de camadas que serão adotadas para a composição da bobina de baixa tensão. Como citado anteriormente, a disposição é de dois fios na axial e dois na radial. Portanto:

$$F_{AxialBT} = 23,72 \text{ [mm]}$$

$$F_{RadialBT} = 5,72 \text{ [mm]}$$

A [Tabela 12](#) apresenta informações relacionadas aos condutores e ao feixe composto por estes presentes na BT.

**Tabela 12 – Dimensionais dos condutores - Enrolamento de BT.**

<b>Características dos Condutores</b>	
Isolamento bilateral dos condutores [mm]	0,36
Largura do condutor nú [mm]	11,50
Espessura do condutor nú [mm]	2,50
Largura do condutor isolado [mm]	11,86
Espessura do condutor isolado [mm]	2,86
Dimensões dos feixes isolados [mm]	23,72 x 5,72

**Fonte: O autor**

Com a definição dos fios, é possível focar no dimensionamento do restante da bobina. Como explicado no [Capítulo 3](#), as alturas das cabeceiras ( $H_{CabeceiraBT}$ ) são objeto de padronização devido ao seu grande impacto na parte ativa de um transformador. Para este caso específico, são regulamentadas por normativas internas dos fabricantes e apoiadas sob as normas regulamentatórias NBR-5356, NBR-5440 e IEC 60076 que sugerem alturas de cabeceiras mínimas de acordo com a classe de tensão de cada enrolamento. Logo, para uma classe de tensão de 7,2 kV, fora considerado para o projeto, cabeceiras com alturas de 20,00 [mm], assim:

$$H_{CabeceiraBT} = 20,00 \text{ [mm]}$$

Tendo-se os dimensionais axiais do conjunto de condutores e as alturas de cada cabeceira, é possível calcular a altura do enrolamento ( $H_{MecanicaBT}$ ) com o uso da [Equação 3.24](#). Considerou-se um fator de crescimento axial, devido às não-conformidades das bobinadeiras, de 1,20 %. Como resultado:

$$H_{MecanicaBT} = 732,14 \text{ [mm]}$$

Junta-se a altura mecânica no enrolamento de baixa tensão com a altura de cada uma das cabeceiras presentes neste enrolamento para obter a altura da bobina de BT ( $H_{BobinaBT}$ ). Logo:

$$H_{BobinaBT} = 772,14 \text{ [mm]}$$

Com a discretização das grandezas anteriores, tem-se a [Tabela 13](#) que reúne as informações do enrolamento e bobina na direção axial.

**Tabela 13 – Dimensionais da bobina - Enrolamento de BT.**

<b>Dimensões e partições [mm]</b>	
Espiras por camada	29,50
Altura enrolamento (elétrica)	708,14
Altura enrolamento (mecânica)	732,14
Altura bobina	772,14

**Fonte: O autor**

A partir dos dimensionais axiais definidos, pode-se dar processamento na discretização dos dimensionais radiais. Utiliza-se a [Equação 3.26](#) para obter o papel isolante presente entre as camadas do enrolamento de baixa tensão ( $Isolamento_{camadasBT}$ ). Foi considerado uma constante  $K_i$ , referenciada ao nível de controle de qualidade, de 0,05. Ao aplicar esta consideração na equação, obtém-se uma espessura elétrica de, pelo menos, 0,250 [mm]. Este isolante, segundo fabricantes, pode ser obtido com um papel diamantado termoestabilizado cuja espessura mecânica é de 0,294 [mm]. Portanto:

$$Isolamento_{camadasBT} = 0,25 \text{ [mm]}$$

Com o papel termoestabilizado presente entre as camadas definido, tem-se a maioria das informações necessárias para discretizar o enrolamento na direção radial. Utiliza-se a [Equação 3.27](#) em conjunto com a informação de que os canais totais de preenchimento de óleo para refrigeração estão dispostos após as camadas 1 e 3. Ainda, devido às não-conformidades presentes na máquina bobinadeira na direção radial, tem-se um fator de crescimento, na mesma direção, de 6,00%.

A disposição radial do enrolamento de baixa tensão pode ser particionada segundo a [Tabela 14](#).

Com ambas as direções do enrolamento tabeladas e conhecidas, é possível obter a resistência do enrolamento de BT. Como disposto na [Tabela 14](#), pode-se considerar o início da bobina de baixa tensão a partir da primeira camada e o final da mesma, na última. Desta maneira, tem-se que o comprimento médio do enrolamento da BT ( $l_{MedioBT}$ ) pode ser obtido pela [Equação 3.29](#).

$$l_{MedioBT} = 984,99 \text{ [mm]}$$

**Tabela 14 – Dimensionais radiais do enrolamento - Enrolamento de BT.**

Posição da BT	Espessura	Diâmetro	Nº de Espiras
Núcleo	-	252,00	-
Espaçamento Núcleo-BT	26,04	278,04	-
Bloco 1	5,72	290,78	29,50
Canal 1 - Total	5,00	300,78	-
Bloco 2	5,72	313,53	29,50
Bloco 3	5,72	326,28	29,50
Canal 2 - Total	5,00	336,28	-
Bloco 4	5,72	349,03	29,50

**Fonte: O autor**

A seção transversal é a mesma do feixe utilizado para compor os fios ( $S_{FeixeBT}$ ) e é resgatada pela [Tabela 11](#), isto é:

$$S_{FeixeBT} = 112,80 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Deve-se ainda normalizar o parâmetro de resistividade ( $\rho$ ) para a temperatura de 75°C, esta será tomada como referência para o cálculo de perdas nos enrolamentos, perdas em carga e impedância de curto-circuito. Com tais considerações feitas, ao se ajustar a resistividade para a temperatura base de cálculo com o auxílio da [Tabela 7](#) e da [Equação 3.30](#), tem-se:

$$\rho = 35,46 \text{ m}[\Omega \cdot \text{m}]$$

Há, portanto, todas as grandezas necessárias para calcular a resistência do enrolamento de baixa tensão ( $R_{BT}$ ). Utiliza-se a [Equação 3.31](#) em conjunto com as grandezas previamente calculadas de maneira a obter a seguinte resistência por fase:

$$R_{BT} = 36,54 \text{ m}[\Omega]$$

De forma análoga, utiliza-se a mesma [Tabela 7](#), em conjunto com a [Equação 3.32](#) e com os resultados anteriormente calculados para obter a massa aproximada da bobina de baixa tensão ( $M_{BT}$ ).

$$M_{BT} = 106,20 \text{ [kg]}$$



### 5.3 Dimensionamento da AT

O processo para dimensionamento do enrolamento de alta tensão é bem similar ao de baixa tensão. Entretanto, entre os dois enrolamentos, está presente uma certa distância, necessária para realizar a refrigeração das bobinas, servir como suportabilidade mecânica e ainda como isolamento elétrico.

Como declarado pela [Tabela 2](#), o enrolamento de alta tensão pertencerá à classe de tensão de 36,2 kV e será composto pelo mesmo material utilizado para o enrolamento anterior, isto é, alumínio. Ainda, fora considerada que a geometria de bobinas é do tipo circular e, entre estas, estarão presentes dielétricos do tipo presspahn imerso em óleo mineral naftênico. A [Tabela 8](#) reúne as características de permissividade elétrica relativa destes dois materiais.

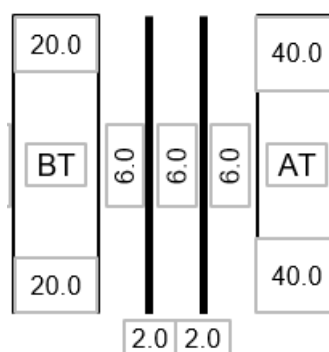
Partindo-se do diâmetros da última camada da BT, as distâncias radiais pressupostas entre AT-BT foram consideradas de maneira que sejam acomodados dois cilindros de presspahn e três canais de óleo. A [Tabela 15](#) reúne estas distâncias e a [Figura 27](#) ilustra os elementos.

**Tabela 15 – Distâncias BT-AT.**

Posição (radial) [mm]	Valor
Externo da BT	174,52
Interno C1	180,52
Externo C1	182,52
Interno C2	188,52
Externo C2	190,52
Interno da AT	196,52

Fonte: O autor

**Figura 27 – Disposição dos elementos - AT-BT.**



Fonte: O autor

Sendo os eletrodos com geometria circular, é possível, por meio da [Equação 3.33](#) e com o uso das permissividades elétricas relativas presentes na [Tabela 8](#), obter o campo elétrico aproximado em cada um dos elementos existentes entre os dois enrolamentos concêntricos. A [Tabela 16](#) apresenta estes resultados.

**Tabela 16 – Rigidez Dielétrica - Distância BT-AT.**

Rigidez dielétrica entre BT-AT	[kV/mm]
BT-C1	3,72
C1-C1	1,76
C1-C2	3,45
C2-C2	1,67
C2-AT	3,31

**Fonte: O autor**

Para dar prosseguimento ao enrolamento de AT, é necessário, primeiramente, obter o número de espiras que esta deve possuir para entregar a relação de transformação nominal adequada. Como este enrolamento será disposto em ligação delta, é exigido que o número de espiras seja ponderado por  $\sqrt{3}$  para que seja relacionado à tensão de linha do enrolamento. Neste caso, tendo-se as tensões de fase de ambos os lados e o número de espiras da BT, obtém-se, com o uso da [Equação 3.34](#) o número de espiras que a AT deve ter ( $N_{AT}$ ). Multiplica-se este resultado por  $\sqrt{3}$  para obter o número de espiras que serão ligadas em delta, logo:

$$N_{AT} = 1695$$

Ao repetir o processo anterior para as outras tensões de linha requisitadas pelas derivações, obtém-se os números de espiras equivalentes, presentes na [Tabela 17](#)

**Tabela 17 – Derivações - Enrolamento de AT.**

Tap	$V_{LinhaAT}$	Espiras
1	36225,00	1779
2	35362,50	1737
3	34500,00	1695
4	33637,50	1653
5	32775,00	1611

**Fonte: O autor**

De maneira homóloga ao que fora feito no outro enrolamento, adota-se como limite, uma densidade superficial de corrente de 2,80 [A/mm<sup>2</sup>]. Entretanto, como neste enrolamento será utilizado fio circular com isolamento esmaltada, deve-se retornar à [Tabela 9](#), que contém os fios padronizados segundo a AWG, para obter uma densidade de corrente próxima da BT. Optou-se pelo fio circular AWG 11, cujo diâmetro ( $D_{CondutorAT}$ ) é:

$$D_{CondutorAT} = 2,305 \text{ [mm]}$$

Serão utilizados dois fios destes para compor o feixe na direção axial. Define-se então o isolamento bilateral ( $Isolamento_{FioCircular}$ ) que cada um dos fios terá para realizar a isolamento entre espiras. Dado que o isolamento dos fios circulares, diferentemente do fio retangular, pode

ser feito por envernizamento, adotou-se:

$$Isolamento_{FioCircular} = 0,114 \text{ [mm]}$$

Para haver uma melhor acomodação e preenchimento do enrolamento, fora considerado um achatamento de 15 % sob o diâmetro nominal do fio. Este achatamento acarreta em mudança das dimensões axiais ( $L_{FioIsoladoAT}$ ) e radiais ( $E_{FioIsoladoAT}$ ) do fio. Pode-se utilizar a [Equação 3.37](#) e [Equação 3.38](#) para obter as dimensões em ambos os eixos do fio já isolado:

$$L_{FioIsoladoAT} = 2,76 \text{ [mm]}$$

$$E_{FioIsoladoAT} = 2,07 \text{ [mm]}$$

Como há dois fios no eixos axial, a composição dos feixes axial ( $F_{AxialAT}$ ) e radial ( $F_{RadialAT}$ ) se dá por meio da [Equação 3.39](#) e da [Equação 3.40](#):

$$F_{AxialAT} = 5,53 \text{ [mm]}$$

$$F_{RadialAT} = 2,07 \text{ [mm]}$$

A [Tabela 18](#) reúne os principais cálculos relacionados aos dimensionais dos condutores referentes ao enrolamento de alta tensão.

**Tabela 18 – Dimensionais dos condutores - Enrolamento de AT.**

<b>Informação</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro do Condutor Escolhido [mm]	2,305
Número de Condutores - Axial	2
Número de Condutores - Radial	1
Isolação dos Condutores [mm]	0,114
Largura - Condutor com Isolamento	2,76
Espesura - Condutor com Isolamento	2,07
Dimensões - Condutores c/ Isolamento	5,53 x 2,07
Seção Transversal do Feixe [mm <sup>2</sup> ]	8,35
$J_{Nova}$ [A/mm <sup>2</sup> ]	2,32

**Fonte: O autor**

Como disposto na [Tabela 13](#), tem-se a altura do enrolamento da baixa tensão. No enrolamento de AT, considerou-se uma redução de cerca de 5,00 % em relação à altura mecânica do enrolamento de baixa tensão. Em acréscimo, levou-se em conta um desvio percentual de 1,80 % na direção axial devido às imperfeições no processo de bobinagem. Tendo-se estas considerações, obtém-se o número de espiras por camada que a AT deve possuir pelo uso da [Equação 3.41](#).

$$\frac{N_{AT}}{N_{CamadasAT}} = 122,50 \text{ [mm]}$$

De modo a acomodar todas as espiras necessárias para a comutação à vazio, retoma-se o número de espiras atreladas à maior tensão e se divide estas pela quantidade de espiras por camadas para obter o número de camadas ( $N_{CamadasAT}$ ). Assim:

$$N_{CamadasAT} = 14,52$$

A altura mecânica da AT ( $H_{MecanicaAT}$ ) é então calculada por meio da [Equação 3.42](#), considerando uma taxa de crescimento no eixo axial de 1,20 %, logo:

$$H_{MecanicaAT} = 691,44 \text{ [mm]}$$

Consequentemente, como o enrolamento de alta tensão é pertencente à classe de tensão de 36,20 [kV] e é relativamente menor que o de baixa tensão, optou-se pela utilização de uma cabeceira cuja altura é de 40,00 [mm] de maneira a tornar próximas as alturas de ambos as bobinas.

A [Tabela 19](#) reúne os cálculos efetuados atrelados à bobina de alta tensão, dispostos anteriormente.

**Tabela 19 – Dimensionais axiais da bobina - Enrolamento de AT.**

<b>Dimensões e partições [mm]</b>	
Número de espiras por camada	122,50
Número de camadas por bobina	14,52
Altura enrolamento (elétrica)	685,84
Altura enrolamento (mecânica)	691,44
Altura bobina	771,44

**Fonte: O autor**

O cálculo do isolamento entre camadas desta bobina ( $Isolamento_{camadasAT}$ ) é realizado a partir da [Equação 3.26](#), assim como feito para o enrolamento de BT. Há, portanto:

$$Isolamento_{camadasAT} = 1,20 \text{ [mm]}$$

Da mesma maneira que fora realizada para o enrolamento anterior, por meio da [Equação 3.27](#), realiza-se as adaptações para o feixe radial do enrolamento de alta tensão e isolamento do mesmo. Como na AT há isolamento progressivo, ilustrado pela [Figura 23](#), o isolamento entre camadas começa menos espesso e termina mais espesso, considerou-se em projeto o valor médio do isolamento entre camadas calculado ( $Isolamento_{MedioAT}$ ), isto é:

$$Isolamento_{MedioAT} = 0,60 \text{ [mm]}$$

Ainda, levou-se em conta um acréscimo de 3,0 % sob as camadas devido às eventuais imperfeições da máquina bobinadeira. A [Tabela 20](#) dispõe as informações radiais da bobina de alta tensão.

**Tabela 20 – Dimensionais radiais do enrolamento - Enrolamento de AT.**

Posição da AT	Espessura	Diâmetro	Nº de Espiras	Isolamento Progressivo (Médio)
Interno da AT	-	393,03	-	-
Camada 1	2,073	398,54	122,50	0,60
Camada 2	2,073	404,05	122,50	0,60
Camada 3	2,073	409,55	122,50	0,60
Camada 4	2,073	415,06	122,50	0,60
Canal 1 - Total	5,00	425,06	-	-
Camada 5	2,073	430,57	122,50	0,60
Camada 6	2,073	436,07	122,50	0,60
Camada 7	2,073	441,58	122,50	0,60
Camada 8	2,073	447,08	122,50	0,60
Camada 9	2,073	452,59	122,50	0,60
Canal 2 - Total	5,00	462,59	-	-
Camada 10	2,073	468,10	122,50	0,60
Camada 11	2,073	473,60	122,50	0,60
Camada 12	2,073	479,11	122,50	0,60
Camada 13	2,073	484,62	122,50	0,60
Camada 14	2,073	490,12	122,50	0,60
Camada 15	2,073	495,63	64,00	0,60

Fonte: O autor

Utilizando as dimensões radiais do enrolamento, é possível determinar o comprimento médio da espira da AT, em formato circular ( $l_{MedioAT}$ ). Com base nos diâmetros interno e externo listados na [Tabela 20](#), usa-se a [Equação 3.29](#) ajustada para o enrolamento de alta tensão, obtendo-se:

$$l_{MedioAT} = 1404,56 \text{ [mm]}$$

A seção transversal do feixe da AT ( $S_{FeixeAT}$ ) é a mesma presente na [Tabela 18](#), isto é:

$$S_{FeixeAT} = 8,35 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Como os materiais utilizados para compor os condutores do enrolamento da alta tensão são os mesmos presentes nos de baixa tensão, a [Tabela 13](#) é reaproveitada, deve-se então realizar os mesmos ajustes para que a resistividade do alumínio ( $\rho$ ) seja referenciada à temperatura de 75°C, logo:

$$\rho = 35,46 \text{ m}[\Omega \cdot \text{m}]$$

Assim, similarmente à sistemática adotada para o outro enrolamento, determina-se a resistência que este enrolamento possui com o auxílio da [Equação 3.31](#). Logo, a resistência por fase do enrolamento de alta tensão ( $R_{AT}$ ) é:

$$R_{AT} = 10,62 \text{ }[\Omega]$$

A massa deste enrolamento também ( $M_{AT}$ ) é calculada pela [Equação 3.32](#), apenas mudando as métricas associadas ao enrolamento a ser analisado, chegando-se a:

$$M_{AT} = 168,91 \text{ [kg]}$$

Como consequência de ambos os enrolamentos dimensionados, é possível realizar o fechamento das culatras sobre as colunas, de maneira a completar a caracterização do núcleo. Assim, para o transformador projetado, fora considerada uma distância entre jugo-bobinas ( $H_{\text{jugo-bobina}}$ ) de:

$$H_{\text{jugo-bobina}} = 16,00 \text{ [mm]}$$

A consideração desta distância é dada pela razão de haver uma folga segura para montagem de calços e anéis de prensagem responsáveis pela suportabilidade mecânica. Em adendo, este espaçamento também é responsável por ser margem de segurança entre núcleo-enrolamentos, dado os casos de possíveis rupturas de dielétricos requisitados pelos maiores gradientes de potencial elétrico presentes nas regiões das cabeceiras. Pelas mesmas considerações supracitadas, optou-se por uma distância entre as fases ( $D_{\text{entre-fases}}$ ) de:

$$D_{\text{entre-fases}} = 22,00 \text{ [mm]}$$

Portanto, calcula-se a altura da janela ( $H_{\text{Janela}}$ ) pelo uso da [Equação 3.44](#) e a distância entre-eixos ( $\text{Entre} - \text{eixos}$ ) por intermédio de [Equação 3.45](#). De modo a haver distâncias com certa folga, optou-se por arredondar os resultados para os múltiplos de cinco imediatamente superiores. Logo:

$$H_{\text{Janela}} = 805,00 \text{ [mm]}$$

$$\text{Entre} - \text{eixos} = 520,00 \text{ [mm]}$$

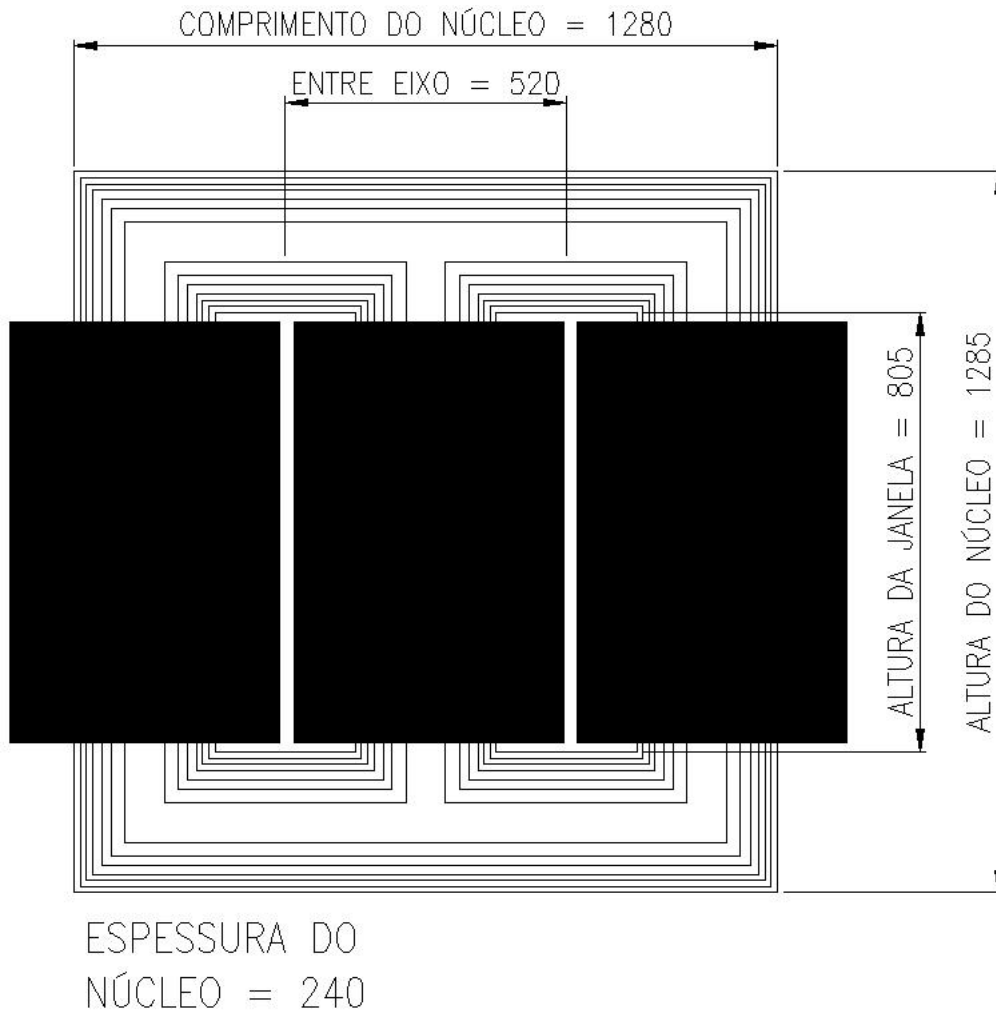
Por fim, há todas as métricas necessárias para o dimensionamento do núcleo. Desta maneira, utiliza-se a [Equação 3.46](#) em conjunto com o resultado da altura da janela e a largura da maior chapa para obter a altura do núcleo ( $H_{\text{Nucleo}}$ ).

$$H_{\text{Nucleo}} = 1285,00 \text{ [mm]}$$

E, por intermédio da [Equação 3.47](#), utilizando a mesma largura da maior chapa do núcleo e a distância de entre-eixos, tem-se a largura do núcleo ( $L_{\text{Nucleo}}$ ), assim:

$$L_{\text{Nucleo}} = 1280,00 \text{ [mm]}$$

De modo a ilustrar os dimensionais calculados, tem-se a [Figura 28](#) que contém uma planificação dos enrolamentos de alta tensão e o núcleo composto por sete degraus.

**Figura 28 – Planificado do núcleo com AT.**

Fonte: O autor

### 5.3.1 Cálculo das Perdas à Vazio e nos Enrolamentos

Com toda a estrutura do núcleo e de ambos os enrolamentos bem definidos, é possível utilizar os valores calculados para estimar os parâmetros de saída associados às principais perdas e ao parâmetro de impedância percentual por fase.

Como o valor de indução magnética fora fixado em 1,71 [T] na subseção anterior, pode-se aproximar as perdas à vazio com o uso da [Figura 24](#). Desta maneira, tem-se que as perdas à vazio ( $p_0$ ) aproximadas são de:

$$p_0 = 1,75 \text{ [W/kg]}$$

Este valor de perdas, como relatado no [Capítulo 4](#) já abrange tanto as perdas por corrente de Foucault (correntes parasitas) como também as perdas por histerese. Deve-se, portanto, obter o caminho médio equivalente que o fluxo magnético mútuo percorre ( $l_{Nucleo}$ ), definido pela [Equação 4.4](#), elencado pelos dimensionais do núcleo, adquiridos na subseção anterior. Assim:

$$l_{Nucleo} = 4999,00 \text{ [mm]}$$

Resgata-se a seção empilhada do molde/mandril, presente na [Tabela 10](#) e, coletivamente com o caminho médio do fluxo, determina-se o volume equivalente do núcleo ( $Vol_{Nucleo}$ ), dado por:

$$Vol_{Nucleo} = 248,72 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Por consequência, as perdas em vazio do núcleo são estimadas com a massa específica do aço-silício ( $\rho_{aco-silicio}$ ) utilizado nas chapas de montagem do núcleo. Esta grandeza é apresentada no [Capítulo 4](#), isto é:

$$\rho_{aco-silicio} = 7650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Em união destas duas últimas grandezas, mediante o uso da [Equação 4.6](#), tem-se a massa do núcleo ( $M_{Nucleo}$ ), estimada em:

$$M_{Nucleo} = 1902,67 \text{ [kg]}$$

A potência em vazio ( $W_0$ ) é então determinada pela [Equação 4.7](#), para este núcleo dimensionado, tem-se:

$$W_0 = 3329,68 \text{ [W]}$$

A [Tabela 21](#) disponibiliza os principais cálculos referenciados às perdas à vazio e aos parâmetros do núcleo.

**Tabela 21 – Perdas à vazio - Resultados.**

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>
$p_0$ [W/kg]	1,75
$l_{Nucleo}$ [m]	4,99
$S_{Circulo}$ [cm <sup>2</sup> ]	497,53
$V_{Nucleo}$ [mm <sup>3</sup> ]	248,72
$M_{Nucleo}$ [kg]	1902,67
$W_0$ [W]	3329,68

**Fonte: O autor**

Como no [Capítulo 3](#) já fora realizada a conversão da temperatura de referência para a temperatura de 75°C, basta, para ambos os enrolamentos, resgatar as resistências atreladas a cada um destes e multiplicar pelas suas respectivas correntes de fase, ponderando ainda por 3, número de fases existentes. Assim, a [Equação 4.9](#) reúne todas estas grandezas e, para o enrolamento de baixa tensão, tem-se uma potência consumida atrelada às perdas ôhmicas ( $W_{BT}$ ) de:

$$W_{BT} = 8446,21 \text{ [W]}$$

Homólogo a este procedimento, tem-se a potência consumida pelo enrolamento de alta tensão ( $W_{AT}$ ).

$$W_{AT} = 11894,19 \text{ [W]}$$



### 5.3.2 Cálculo da Impedância Percentual

De maneira a completar o projeto do transformador trifásico, deve-se determinar um dos parâmetros fundamentais, a impedância percentual, abordada no final do [Capítulo 4](#). Como mencionado no mesmo capítulo, a impedância a ser estimada será a impedância de curto-circuito, obtida pelo ensaio de mesmo nome. Fora referenciada no início do [Capítulo 3](#), [Tabela 2](#), como 5,75 % e, pode sofrer uma variação de, no máximo,  $\pm 7,50$  % se referenciada à NBR-5356 ou  $\pm 10,00$  %, se referenciada à IEC 60076.

Para estimar a indutância de dispersão de qualquer um dos enrolamentos, é necessário primeiro obter o *Fator de Rogowski* - ( $K$ ) por aplicação da [Equação 4.13](#). Tem-se primeiramente:

$$K = 955,15 \cdot 10^{-3}$$

A *Altura de Rogowski* ( $h_K$ ) é então estimada a partir da [Equação 4.12](#), isto é:

$$h_K = 808,40 \text{ [mm]}$$

Com a auxílio dos dimensionais dispostos em cada um dos enrolamentos presentes na [Tabela 14](#) e [Tabela 20](#) e, mediante a aplicação da [Equação 4.11](#), em conjunto com os valores dos diâmetros e das espessuras de cada um dos tubos de fluxo magnético presentes nos enrolamentos e no canal existente entre BT-AT, é possível obter uma indutância de dispersão ( $L$ ) do lado da BT dada por:

$$L_{BT} = 1,32 \text{ [mH]}$$

Por meio da [Equação 4.15](#), tomando como referência o lado de baixa tensão para haver uma impedância de base para o sistema, pôde-se chegar numa reatância indutiva de dispersão percentual ( $X_{\%}$ ) de aproximadamente:

$$X_{\%} = 5,77 \%$$

Utilizando o mesmo lado referenciado, divide-se a resistência de baixa tensão pela impedância de base, obtendo-se a resistência percentual do lado de baixa tensão ( $R_{BT\%}$ ), Tal que:

$$R_{BT\%} = 422,31 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Por fim, a impedância percentual ( $Z_{\%}$ ) é obtida pelo uso da [Equação 4.10](#). Logo:

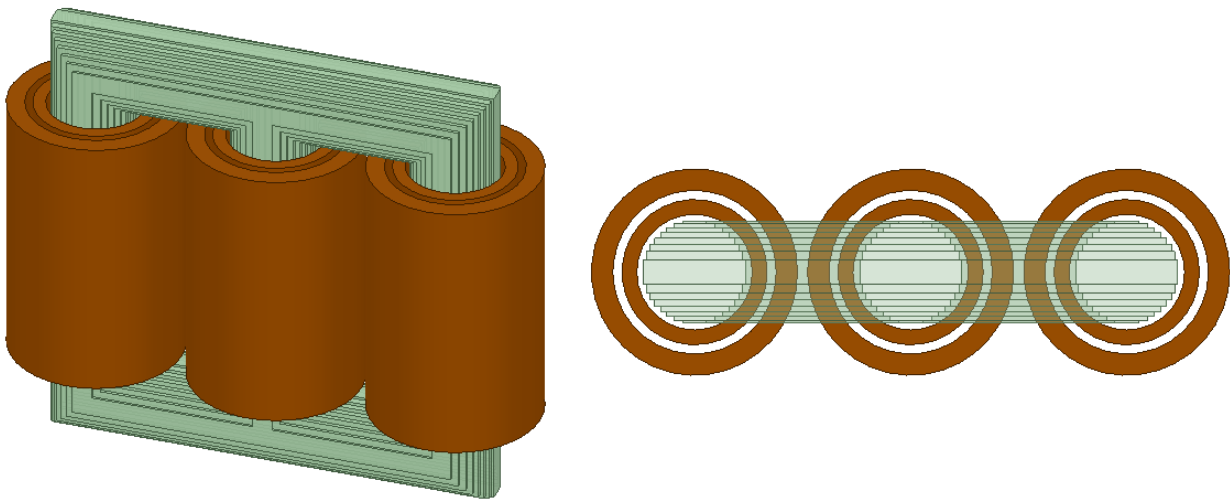
$$Z_{\%} = 5,78 \%$$

## 5.4 Simulações Usando o MEF

Esta seção apresenta os resultados das simulações usando o software comercial Ansys Maxwell que utiliza o método de elementos finitos (MEF). Os resultados simulados para o TCC são: a indução magnética no núcleo para a condição a vazio e a indutância de dispersão do enrolamento BT.

A [Figura 29](#) apresenta a geometria do transformador dimensionado neste TCC.

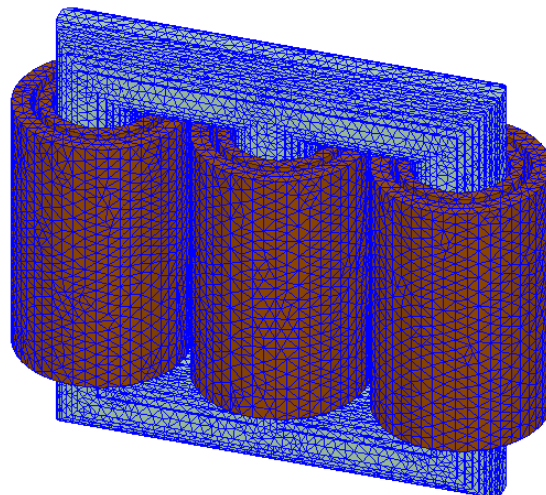
**Figura 29 – Geometria utilizada na simulação do MEF.**



**Fonte: O autor**

Já a [Figura 30](#) mostra a malha tridimensional tanto do núcleo quanto dos enrolamentos BT e AT. Envolvero a parte ativa do transformador, há uma região de ar que não foi mostrada nessa figura para facilitar a visualização da parte ativa do transformador.

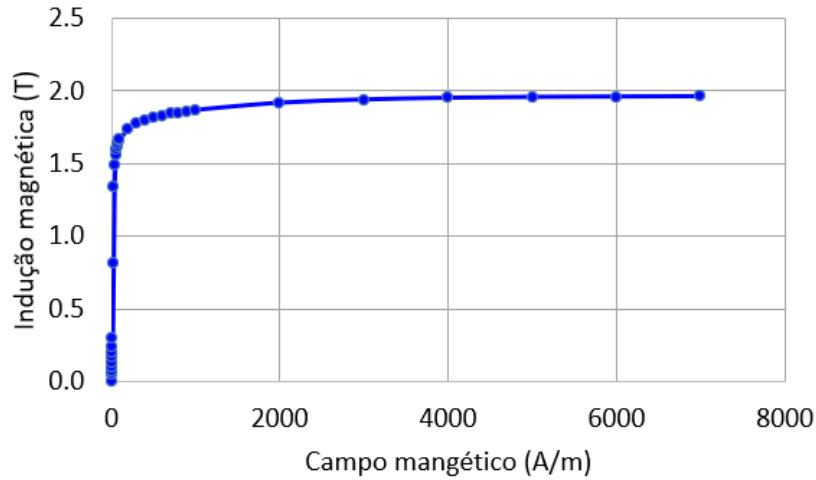
**Figura 30 – Malha 3D utilizada na simulação do MEF.**



**Fonte: O autor**

Para a simulação a vazio, utilizou-se uma curva BH de um aço de GO mostrada na Figura 31.

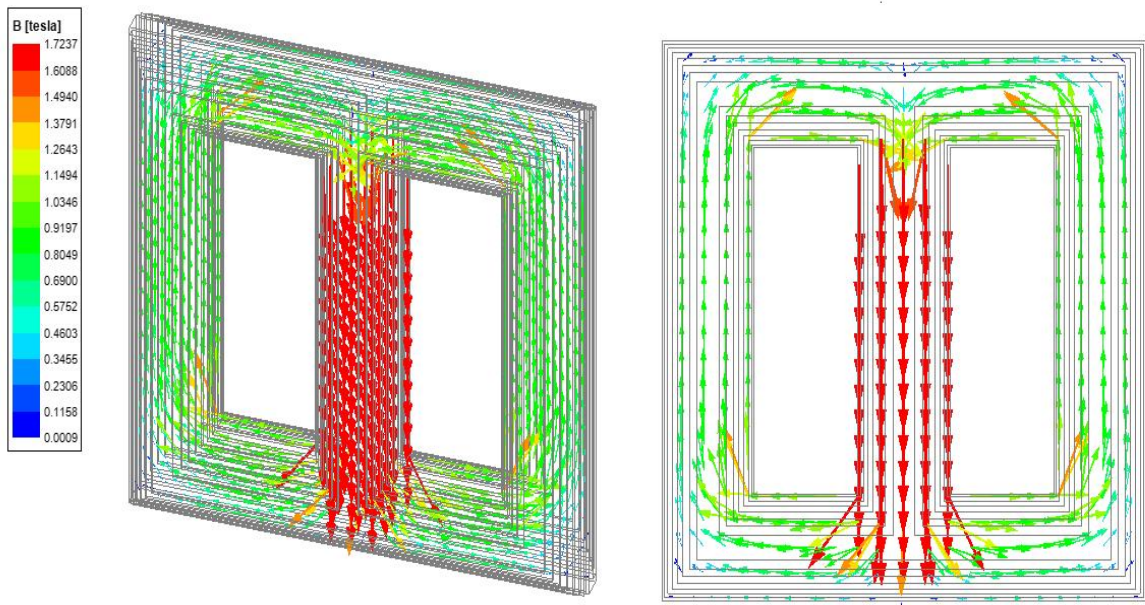
**Figura 31 – Curva BH de aço GO usada na simulação do MEF.**



**Fonte: O autor**

A Figura 32 mostra a distribuição dos vetores de indução magnética no núcleo do transformador na condição a vazio (transformador energizado somente com as correntes trifásicas na AT). É possível notar que o valor máximo da indução magnética na perna central foi de 1,7237 T. Esse valor ficou muito próximo do valor do projeto de 1,71 T (diferença de 0,79%).

**Figura 32 – Distribuição de vetores de indução magnética no núcleo.**



**Fonte: O autor**

O software comercial de elementos finitos utilizado calcula também a indutância total dos enrolamentos. Para calcular a indutância de dispersão dos enrolamentos foi usado o seguinte procedimento:

1. No núcleo, utiliza-se um material com permeabilidade magnética relativa de 10000;
2. Aplica-se a corrente na fase BT ou AT da perna central;
3. Calcula-se a energia magnética na região dos enrolamentos e do ar envolvendo o transformador;
4. Por fim, a indutância de dispersão é obtida multiplicando-se o valor da energia magnética por dois e dividindo-o pelo quadrado da corrente do enrolamento analisado.

A [Tabela 22](#) apresenta a comparação dos valores de indutância de dispersão obtidas analiticamente e por simulação.

**Tabela 22 – Indutâncias de dispersão - Resultados.**

Indutâncias de dispersão - AT e BT			
Enrolamento	Analítico	MEF 3D	Diferença
AT	0,270 H	0,310 H	12,90%
BT	1,325 mH	1,526 mH	13,17%

**Fonte: O autor**

O método analítico da indutância de dispersão considera que os enrolamentos estão sempre envolvidos pelo núcleo e que a permeabilidade magnética do núcleo é infinita. Por isso, na simulação via MEF, utilizou-se uma permeabilidade relativa de 10000 para o núcleo. Porém, na simulação em 3D, os enrolamentos só são envolvidos pelo núcleo na janela do transformador. Essas diferentes considerações é que explicam as diferenças percentuais obtidas entre os resultados analíticos e numéricos.

O próximo capítulo apresenta as conclusões do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

---

## Conclusão

Neste TCC, adotou-se uma metodologia analítica para o dimensionamento da parte ativa de um transformador trifásico de distribuição. A metodologia permitiu dimensionar as geometrias do núcleo e dos enrolamentos da BT e da AT. Com esse dimensionamento foi possível calcular as resistências dos enrolamentos, as indutâncias de dispersão, as perdas no núcleo e nos enrolamentos, e a massa de material tanto do núcleo quanto dos enrolamentos.

Para se ter uma comparação com o método analítico, modelou-se a parte ativa do transformador em um software comercial de elementos finitos. Com as simulações em 3D, calculou-se a indução no núcleo e as indutâncias de dispersão da BT e da AT. Verificou-se que a indução magnética obtida numericamente ficou com um valor bem próximo da indução prevista no projeto analítico. Todavia, para os valores de indutância de dispersão, notou-se discrepâncias maiores que 10%.

Como sugestões para trabalhos futuros, destaca-se os seguintes itens:

1. Dimensionamento analítico dos elementos adjacentes do transformador, como tirantes, armaduras e calços. Estes elementos desempenham um papel crucial na sustentação mecânica do transformador, garantindo a estabilidade estrutural. Um estudo mais aprofundado sobre a seleção adequada desses elementos, considerando diferentes condições de operação e requisitos normativos, seria de grande relevância para o projeto de transformadores de distribuição.
2. Utilização de uma metodologia mais sofisticada para o cálculo de perdas à vazio, perdas totais e para obtenção da impedância percentual de curto-circuito, parâmetros de saída fundamentais para o projeto. Embora a metodologia adotada neste trabalho tenha fornecido resultados satisfatórios, a utilização de técnicas mais avançadas, como simulações magnéticas em conjunto com simulações térmicas, podem proporcionar uma análise muito mais exata do comportamento dessas grandezas, contribuindo assim, para o desenvolvimento de projetos mais robustos, econômicos e eficientes.

3. Neste trabalho, utilizou-se um modelo de núcleo considerando a laminação no software de elementos finitos. Porém, considerou-se o material como sendo isotrópico. Na prática, o aço de GO é anisotrópico e essa condição é importante de ser levada em consideração na simulação da parte ativa do transformador. Todavia, para o uso de material anisotrópico se faz necessário obter curvas BH na direção da laminação e na direção transversal da laminação das chapas do núcleo. Essa caracterização não foi possível de ser realizada dentro do prazo de elaboração deste trabalho. Assim, é uma sugestão para trabalhos futuros.

De maneira resumida, esse TCC apresentou uma comparação da aplicação de equações analíticas com simulações numéricas no dimensionamento da parte ativa de transformadores trifásicos de distribuição, permitindo a avaliação de seu desempenho magnético. As conclusões obtidas destacaram uma boa concordância entre os resultados analíticos e numéricos para a parte ativa do transformador desenvolvido, além de fornecer sugestões para futuros trabalhos, visando o aprimoramento do dimensionamento dos elementos adjacentes e a utilização de metodologias mais avançadas para o cálculo de perdas. Com o contínuo aperfeiçoamento das ferramentas de projetos, será possível, gradativamente, desenvolver transformadores cada vez mais eficientes e confiáveis, contribuindo para o avanço da área de sistemas de distribuição de energia elétrica.

---

## Referências

- ACESITA, S. **Catálogo de Produtos**. [S.l.]: Disponível: <http://www.acesita.com.br>, acessado em: Maio de 2023, 2005. Citado na página 43.
- APERAM. **Aços Elétricos de Grão Orientado Ficha Técnica**. 2023. Disponível em: [https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/GO\\_PerformanceCurves.pdf](https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/GO_PerformanceCurves.pdf), acessado em: Maio de 2023. Citado na página 67.
- CHINA, M. L.; TOMMASINI, D. Comparative study of heat transfer from nb-ti and nb 3 sn coils to he ii. **Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams**, APS, v. 11, n. 8, p. 082401, 2008. Citado na página 53.
- DAWOOD, K. et al. Calculation of the leakage reactance in distribution transformers via numerical and analytical methods. **Journal of Electrical Systems**, Engineering and Scientific Research Groups, v. 15, n. 2, p. 213–221, 2019. Citado na página 40.
- FRIEDRICH, J. L. Cálculo analítico de um transformador de distribuição de 75 kva imerso em óleo. Universidade Federal de Uberlândia, 2019. Citado na página 55.
- JC. **Núcleo Enrolado**. 2013. Disponível em: <http://www.jc-cores.com/Uni-Core-pd26485067.html>. Citado na página 37.
- KENNEDY, B. W. **Energy efficient transformers**. [S.l.]: McGraw Hill Professional, 1998. Citado na página 66.
- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer engineering: design, technology, and diagnostics**. [S.l.]: CRC press, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 69.
- MARTIGNONI, A. Transformadores. **8va Edição**. Editora Globo, 1991. Citado na página 42.
- NAIR, K. **Power and Distribution transformers: Practical design guide**. [S.l.]: CRC press, 2021. Citado na página 59.
- NICOREINDIA. **Núcleo Enrolado**. 2013. Disponível em: <https://nicoreindia.com/wp-content/uploads/2020/10/1-1024x585.jpg>. Citado na página 37.
- RIES, W. **Transformadores – Fundamentos para o Projeto e Cálculo**. 1. ed. PORTO ALEGRE: EDIPUCRS, 2007. Citado 21 vezes nas páginas 27, 32, 33, 35, 36, 37, 40, 42, 43, 44, 47, 48, 53, 54, 55, 58, 62, 63, 65, 66 e 71.

- RVB. **Papel Isolante**. 2023. Disponível em: <<http://rvbisolantes.com.br>, acessado em: **Maiode2023**>. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 58.
- SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de Transformadores para Redes de Média Tensão I**. Brasil: [s.n.], 2012. Citado 6 vezes nas páginas 44, 45, 47, 50, 60 e 65.
- SOBRINHO, A. M. **Uma Contribuição aos Projetos de Transformadores Via Algoritmos Naturais e Elementos Finitos**. Tese (Doutorado) — Ph. D. dissertation Universidade Federal de Uberlândia, PPGEELT, Uberlândia-MG, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.
- SUPPLIES, I. **Insulation Winding Kits**. 2023. Disponível em: <<http://intercosupplies.co.za/>>. Citado na página 39.
- UDESC. **Tabela de condutores de cobre AWG**. 2013. Disponível em: <[https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id\\_cpmenu/9731/Tabela\\_condutores\\_cobre\\_AWG\\_x\\_MM\\_16527824735972\\_9731.pdf](https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/9731/Tabela_condutores_cobre_AWG_x_MM_16527824735972_9731.pdf)>. Citado na página 60.
- UPADHYAY, K. **Design of Electrical Machines**. New Age International (P) Limited, 2011. (New age). ISBN 9788122422825. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JLfoQFLc8s4C>>. Citado na página 46.
- VILAÇA, P. et al. Application of fsw to join aluminium foil winding coils for electrical transformers. **Int J Mech Syst Eng**, v. 2, n. 1, p. 115–111, 2016. Citado na página 38.
- WEG. **Condutores WEG**. 2023. Disponível em: <<http://www.weg.net>, acessado em: **Maiode2023**>. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- WEIDMANN. **Papel Isolante**. 2023. Disponível em: <<https://weidmann-electrical.com/strip-flex-k-transformers-magazine/>, acessado em: **Junhode2023**>. Citado na página 62.