



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

JOSÉ LUIZ FRIEDRICH

**CÁLCULO ANALÍTICO DE UM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO DE 75 KVA IMERSO EM ÓLEO**

Uberlândia - MG
2018

JOSÉ LUIZ FRIEDRICH

**CÁLCULO ANALÍTICO DE UM TRANSFORMADOR DE
DISTRIBUIÇÃO DE 75 KVA IMERSO EM ÓLEO**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: José Roberto Camacho

Assinatura do Orientador

Uberlândia - MG
2018

Dedico esse trabalho ao meu pai, Jaime Friedrich pelos incentivos no decorrer da minha graduação e pelo apoio na escolha da minha profissão, à minha mãe, Vilma A. C. Friedrich pela dedicação com a minha educação e pelo apoio durante a minha graduação, à minhas irmãs, Tharyn C. Friedrich e Thayne G. Friedrich, pela inspiração, companheirismo e parceria de sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar todas as dificuldades encontradas, pela minha vida, pela minha família e pelos meus amigos.

Agradeço a minha mãe Vilma A. C. Friedrich por te me dado apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço durante essa trajetória e pelo seu amor incondicional.

Agradeço ao meu pai Jaime Friedrich que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e me apoiou em toda a minha trajetória e decisões tomadas.

À minha irmã Tharyn C. Friedrich, que nos momentos de minha ausência dedicado aos meus estudos superior, sempre me fez entender que o futuro é feito de muita dedicação e que me apoiou e me deu inspiração para superar todas as dificuldades.

À minha irmã Thayne G. Friedrich, pelo companherismo e amizade que nos acompanha desde pequeno.

Ao meu cunhado Hélio Brasil dos Santos Júnior e ao seu pai Helio Brasil, por ter se dedicado em compartilhar seus conhecimentos técnicos comigo, pela inspiração na escolha do meu curso e por todo o apoio fornecido durante a minha graduação.

Obrigado! Avós, tias e primos pelas contribuições valiosas.

Ao Professor Dr. José Roberto Camacho pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Meus agradecimentos a todos os meus amigos, companheiros de trabalho e irmãos de amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar na minha vida em novas trajetórias.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

RESUMO

Máquinas elétricas, os transformadores de tensão, chamados normalmente de transformadores, são equipamentos elétricos bastante importantes para os sistemas de transmissão e distribuição de energia, são dispositivos de corrente alternada capazes de aumentar ou reduzir os valores de tensão e conseqüentemente os valores da corrente elétrica. O seu desenvolvimento é baseado nos princípios eletromagnéticos de Maxwell e Faraday, os quais buscam a eficiência e viabilidade do sistema elétrico. Desta forma, este trabalho tem como objetivo abordar alguns fundamentos básicos sobre a construção de transformadores tipicamente de distribuição, apresentando o memorial de cálculos de forma analítica e detalhando todas as etapas do processo construtivo, demonstrando os detalhes de fabricação. Desta maneira, foi necessário o auxílio de software computacionais para a elaboração dos cálculos analíticos com objetivo de facilitar e evitar incorreções no processo e para a elaboração das figuras ilustrativas.

Palavras chave: Transformadores de distribuição, projeto, construção, cálculo analítico, cálculo computacional.

ABSTRACT

Electric machines, voltage transformers, commonly called transformers, are very important electrical equipment for power transmission and distribution systems, they are alternating current devices capable of increasing or reducing voltage values and consequently the values of the electric current. Its development is based on the electromagnetic principles of Maxwell and Faraday, which seeks the efficiency and feasibility of the electric system. In this way, this work has as objective to address some basic fundamentals on the construction of transformers typically of distribution, presenting the calculation memorial analytically and detailing all the stages of the construction process, demonstrating the manufacturing details. In this way, it was necessary to use computational software to prepare the analytical calculations in order to facilitate and avoid errors in the process and in the elaboration of the illustrative figures.

Keywords: Distribution transformers, design, construction, analytical calculation, Computational calculation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Núcleo magnético de aço silício laminado	5
Figura 2 - Núcleo magnético de aço silício	5
Figura 3 - Disposição no núcleo magnético envolvido (ilustrativo).....	6
Figura 4- Núcleo magnético envolvente.....	6
Figura 5 - Disposição no núcleo magnético envolvente (ilustrativo).....	7
Figura 6 - tipos de secções de núcleos magnéticos.....	7
Figura 7 - Núcleo trifásico com junção de 45°	9
Figura 8 - núcleo trifásico pré-montado	9
Figura 9 - Processo de traspassamento do núcleo magnético [7]	10
Figura 10 - Bobina helicoidal (A) / Bobina em disco (B)	11
Figura 11 - Disposição concêntrica (A) / Disposição intercalada (B).....	11
Figura 12 - Sentido de enrolamento da bobina helicoidais.....	12
Figura 13 - Materiais isolantes	13
Figura 14 - Ligação delta	15
Figura 15 - Disposição das correntes e das tensões na ligação delta.....	15
Figura 16 - Ligação em estrela	16
Figura 17 - Disposição das correntes e tensões na ligação estrela	16
Figura 18 - ligação zig-zag	17
Figura 19 - Comutador de tap interno.....	18
Figura 20 - Comutador de tap externo	18
Figura 21 – Buchas ABNT de alta tensão	20
Figura 22 - Buchas ABNT de baixa tensão	20
Figura 23 - Radiador em transformador de distribuição.....	21
Figura 24 - Placa de identificação do transformador.....	22
Figura 25 - Indicador de nível de óleo.....	22
Figura 26 - Válvula de alívio de pressão	23
Figura 27 - TTR - Transforme turn radio	26
Figura 28 - Conexão TTR.....	27
Figura 29 - Esquema de montagem para ensaio em vazio.....	29
Figura 30 - Esquema de montagem para ensaio de curto-circuito.....	30

Figura 31 - Dimensões do núcleo	38
Figura 32 - Núcleo magnético (corte 1).....	39
Figura 33 - Núcleo magnético (corte 2).....	39
Figura 34 - Dimensões do condutor da BT	42
Figura 35 - Disposição dos condutores na BT	42
Figura 36 - Isolação do condutor da BT	43
Figura 37 - Dimensões da cabeceira das bobinas AT E BT	44
Figura 38- Espaçamento horizontal entre o núcleo e a BT.....	45
Figura 39 - Espaçamento vertical entre o núcleo e a BT	47
Figura 40- Altura das bobinas AT e BT	53
Figura 41- Curva de perda magnética.....	56
Figura 42 - Curva de potência de excitação do núcleo.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de degraus em função do diâmetro [7]	8
Tabela 2 - Corrente nominal [A] das buchas de alta tensão para transformadores trifásicos [6]	20
Tabela 3- Dados Técnicos do Transformador	32
Tabela 4 - Transformadores com derivação[6].....	33
Tabela 5 - Valores de perdas para transformadores trifásicos com tensões máxima 36,2 KV[6].....	34
Tabela 6 - Diagrama fasorial [6].....	35
Tabela 7 - Dados construtivos do núcleo magnético	38
Tabela 8 - Seção de condução para fios retangulares	41
Tabela 9 - Fator de correção da isolação sólida.....	46
Tabela 10 - Resistividade dos materiais – 20°C	49
Tabela 11 - Tabela de dimensões de fios não esmaltados	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AC – Corrente alternada.
CC – Corrente contínua.
TP – Transformador de potencial.
TC – Transformador de corrente.
BT – Baixa tensão.
AT – Alta tensão.
SF₆ – Hexafluoreto de enxofre.
V – Tensão.
A – Ampere.
I – Corrente.
W – Watt.
VA – Volt ampere
 V_f – Tensão de fase.
 V_l – Tensão de linha.
 I_f – Corrente de fase.
 I_l – Corrente de linha.
 P_n – Potência nominal.
esp. – Espiras.
 S_{nuc} – Seção de núcleo.
 S_{circ} – Seção circular.
 S_{eft} – Seção efetiva.
 S_{cond} – Seção do condutor.
 f_e – Fator de empilhamento.
 f_u – Fator de utilização.
 f – Frequência.
B – Indução.
 D_{nuc} – Diâmetro do núcleo.
 N_{BT} – Número de espiras da baixa tensão.
 N_{AT} – Número de espiras da alta tensão.
 d_{BT} – Densidade de corrente do enrolamento de baixa tensão.

d_{AT} – Densidade de corrente do enrolamento de alta tensão.
 d_{nuc} – Densidade de fluxo magnético.
 M_{axi} – Medida axial.
 M_{rad} – Medida radial.
 h_{bob} – Altura da bobina.
 h_{cab} – Altura da cabeceira.
 h_{jan} – Altura da janela.
 h_{fio} – Altura do fio.
 E_{nu-bob} – Espaço entre núcleo e bobina.
 E_{AT-BT} – Espaço entre bobina de alta tensão e baixa tensão.
 E_{AT-AT} – Espaço entre bobinas de alta tensão.
 E_{c-c} – Espaço entre os centros das colunas.
 n°_{cam} – Número de camadas.
 n°_{col} – Número de colunas.
 $Isol_{min}$ – Isolação mínima.
 $Isol_{adt}$ – Isolação adotada.
 D_{int} – Diâmetro interno.
 D_{ext} – Diâmetro externo.
 E_{mol} – Espessura do molde.
 l_{cond} – Comprimento do condutor.
 l_{med} – Comprimento médio do condutor.
 R_{AT} – Resistência da bobina de alta tensão.
 R_{BT} – Resistência da bobina de baixa tensão.
 ρ – Resistividade.
 α – Coeficiente de temperatura.
 ρ_i – Resistividade inicial.
 ρ_f – Resistividade final.
 θ_i – Temperatura inicial.
 θ_f – Temperatura final.
 \emptyset_{fio} – Diâmetro do fio
 W_{mag} – Perdas Magnéticas.

M_{nuc} – Massa do núcleo.

L_{chapa} – Largura da chapa.

W_0 – Perdas em vazio.

P_{exc} – Potencia de Excitação.

$I_0\%$ – Corrente de excitação percentual.

W_{BT} – Perdas no enrolamento de baixa tensão.

W_{AT} – Perdas no enrolamento de alta tensão.

W_{tot} – Perdas totais.

$Z\%$ – Impedância.

$X\%$ – Reatância percentual.

$R\%$ – Resistência percentual.

R_{eq} – Resistência equivalente.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. CONTRIBUIÇÕES.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	4
2.1. NÚCLEO.....	4
2.2. ENROLAMENTOS.....	10
2.3. ISOLAÇÕES.....	13
2.4. TIPOS DE LIGAÇÃO TRIFÁSICAS.....	14
2.4.1. <i>Ligação delta (triângulo)</i>	14
2.4.2. <i>Ligação estrela</i>	15
2.4.3. <i>Ligação zig-zag</i>	16
2.5. <i>Tipos de comutação</i>	17
2.6. <i>Acessórios externos</i>	18
2.6.1. <i>Tanque</i>	18
2.6.2. <i>Buchas</i>	19
2.6.3. <i>Radiadores</i>	21
2.6.4. <i>Placa de identificação</i>	21
2.6.5. <i>Indicador de nível de óleo</i>	22
2.6.6. <i>Válvula de alívio</i>	23
2.7. <i>Ensaio Típicos</i>	23
2.7.1. <i>Ensaio de rigidez dielétrica do óleo isolante</i>	23
2.7.1.1. <i>Procedimento para a coleta da amostra a ser ensaiada [9]:</i>	24
2.7.2. <i>Ensaio de relação de transformação</i>	25
2.7.2.1. <i>TTR – Transformer Turn Ratio</i>	26
2.7.2.2. <i>Método do voltímetro</i>	27
2.7.3. <i>Ensaio a vazio</i>	28
2.7.4. <i>Ensaio de curto-circuito</i>	29
3. CÁLCULO ANALÍTICO.....	32
3.1. INFORMAÇÕES TÉCNICAS DO TRANSFORMADOR.....	32
3.2. CÁLCULO DAS CORRENTES:.....	35
3.2.1. CÁLCULO DA CORRENTE DE FASE NA BOBINA DE ALTA TENSÃO, LIGAÇÃO EM DELTA:.....	35
3.2.2. CÁLCULO DA CORRENTE DE LINHA NA BOBINA DE ALTA TENSÃO, LIGAÇÃO EM DELTA:.....	35

3.2.3.	CÁLCULO DA CORRENTE DE FASE NA BOBINA DE BAIXA TENSÃO, LIGAÇÃO EM ESTRELA:.....	35
3.2.4.	CÁLCULO DA CORRENTE DE LINHA NA BOBINA DE BAIXA TENSÃO, LIGAÇÃO EM ESTRELA:	36
3.3.	CÁLCULO DO NÚCLEO:.....	36
3.3.1.	<i>Cálculo da tensão por espira.</i>	36
3.3.2.	<i>Cálculo da seção efetiva do núcleo magnético.</i>	36
3.3.3.	<i>Cálculo da seção circular do núcleo.</i>	37
3.3.4.	<i>Cálculo do diâmetro do núcleo.</i>	37
3.3.5.	<i>Degraus e empilhamentos.</i>	37
3.3.6.	<i>Cálculo do volt por espira novo.</i>	39
3.4.	CÁLCULO DA BOBINA DE BAIXA TENSÃO.	40
3.4.1.	<i>Cálculo do número de espiras.</i>	40
3.4.2.	<i>Densidade de corrente.</i>	40
3.4.3.	<i>Cálculo da seção do condutor.</i>	40
3.4.4.	<i>Calculo da densidade de corrente nova.</i>	42
3.4.5.	<i>Definição do número de camadas por bobina.</i>	43
3.4.7.	<i>Cálculo da altura da janela do núcleo.</i>	44
3.4.8.	<i>Cálculo da isolamento sólida para bobina.</i>	45
3.4.9.	<i>Cálculo do diâmetro interno do enrolamento.</i>	46
3.4.10.	<i>Calculo do diâmetro externo do enrolamento.</i>	47
3.4.11.	<i>Cálculo do comprimento do condutor.</i>	48
3.4.12.	<i>Cálculo da resistividade elétrica do condutor.</i>	48
3.5.	CÁLCULO DA BOBINA DE ALTA TENSÃO AT.....	50
3.5.1.	<i>Cálculo do número de espiras.</i>	50
3.5.2.	<i>Densidade de corrente.</i>	50
3.5.3.	<i>Cálculo da seção do condutor.</i>	50
3.5.4.	<i>Cálculo do número de camadas.</i>	52
3.5.5.	<i>Cálculo da mínima isolamento sólida.</i>	53
3.5.6.	<i>Cálculo do diâmetro interno do enrolamento.</i>	53
3.5.7.	<i>Cálculo do diâmetro externo do enrolamento.</i>	54
3.5.8.	<i>Calculo do condutor comprimento do condutor.</i>	55
3.5.9.	<i>Cálculo da resistência do condutor.</i>	55
3.6.	CÁLCULO DAS PERDAS NO NÚCLEO.....	55
3.7.	CÁLCULO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO.	57
3.8.	CÁLCULO DAS PERDAS NOS ENROLAMENTOS.	58
3.9.	PERDAS TOTAIS DO TRANSFORMADOR.	58
3.10.	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA.	59

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
5. REFERÊNCIAS.	65
6. ANEXO A	68

1. INTRODUÇÃO:

1.1. Objetivo

Esse trabalho visa estudar, simular, analisar e projetar as características construtivas dos transformadores. Acredita-se que este estudo se mostra relevante, pois se trata de um desafio que se faz presente no dia a dia de engenheiros, técnicos e principalmente estudantes da área de engenharia elétrica.

O conteúdo da forma como será apresentado nesse trabalho trará uma visão prática com embasamento teórico, para auxiliar os profissionais envolvidos na área de engenharia elétrica.

1.2. Estrutura do trabalho

Além do presente capítulo introdutório este trabalho apresenta mais 3 capítulos:

- Capítulo 2 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVA:

Neste capítulo será abordado alguns fundamentos básicos sobre a construção de um transformador típico de distribuição, pretende-se abordar somente os detalhes de convívio numa fábrica de transformadores, com o propósito de apresentar e explicar os diversos aspectos de construção.

- Capítulo 3 – METODOLOGIA ANALÍTICA:

Neste capítulo será exposto e explicado as diversas etapas de cálculo para o desenvolvimento de um projeto de um transformador trifásico típico de distribuição de energia elétrica.

- Capítulo 4 - CONCLUSÕES:

Por fim, este capítulo apresenta uma simples comparação entre o método analítico e computacional no desenvolvimento de projetos de transformadores de distribuição.

2. Características construtivas.

Todo o sistema de rede de distribuição de energia elétrica é composto por um número imensuráveis de transformadores, onde cada um apresenta um comportamento diferente devido a vários aspectos construtivos, como os tipos de ligações, as formas de isolamento, núcleo e entre outras características.

Neste capítulo será abordado alguns fundamentos básicos sobre a construção de um transformador típico de distribuição. Pretende-se abordar somente os detalhes de convívio numa fábrica de transformadores, com o propósito de apresentar e explicar os diversos aspectos de construção.

Importante salientar que cada fabricante possui características construtivas diferentes durante o processo projeto e de montagem do equipamento, porém os princípios fundamentais são iguais.

2.1. Núcleo

No sistema de distribuição de energia elétrica os transformadores são constituídos com núcleos de ferro. Na sua maioria, os núcleos magnéticos são construídos através de lâminas magnéticas de aço silício, onde sua liga metálica é constituída com cerca de 3 a 5 % de silício, essa liga tem como objetivo diminuir a relutância magnética e consequentemente aumentar a permeabilidade magnética do ramo magnetizante (núcleo) [7]. A laminação do núcleo é realizada no sentido longitudinal devido a orientação dos grãos e a resistência do material, a laminação do material também é realizada com o intuito diminuir as perdas no núcleo do transformador, que podem ser classificadas em duas categorias: perda por histerese e perdas por correntes parasitas ou também conhecida como corrente de Foucault. Contudo, para diminuir ainda mais as perdas por Foucault é aplicada uma camada extremamente fina de isolante elétrico nas lâminas magnéticas, dificultando a circulação dessas correntes indesejadas.

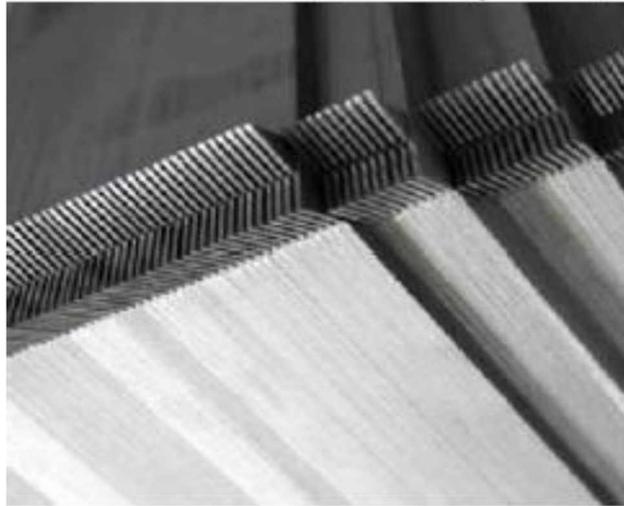


Figura 1 - Núcleo magnético de aço silício laminado

Existem diversos tipos de núcleos utilizados em transformadores perante seus aspectos construtivos, para melhor entendê-los será abordado os dois principais tipos utilizados pelos fabricantes, podendo classificá-los com núcleo envolvido e núcleo envolvente, conforme apresentados na figura 2 e 4.

Na figura 3 ilustra um transformador trifásico com o núcleo envolvido pelas bobinas concêntricas (bobinas de alta AT e bobinas de baixa BT). Em cada uma das colunas é apresentado as bobinas de alta e baixa tensão que compõem uma fase do transformador. Nesse tipo de núcleo os enrolamentos são colocados sobre as colunas envolvem o ramo magnético.

[7]



Figura 2 - Núcleo magnético de aço silício

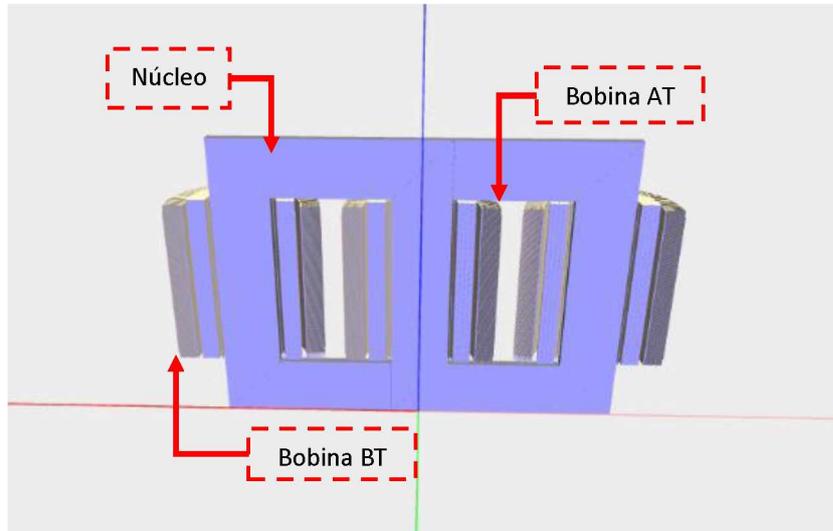


Figura 3 - Disposição no núcleo magnético envolvido (ilustrativo)

Na figura 5 ilustra um transformador trifásico com as bobinas (bobinas de alta AT e bobinas de baixa BT) envolvidas pelo núcleo magnético, diferentemente na situação anterior. Em cada uma das colunas é apresentado as bobinas de alta e baixa tensão que compõem uma fase do transformador. Nesse tipo de núcleo os enrolamentos envolvem o respectivo circuito magnético, ficando envolvidos pelo mesmo, deixando os enrolamentos praticamente cobertos pelo núcleo. [7]



Figura 4- Núcleo magnético envolvente

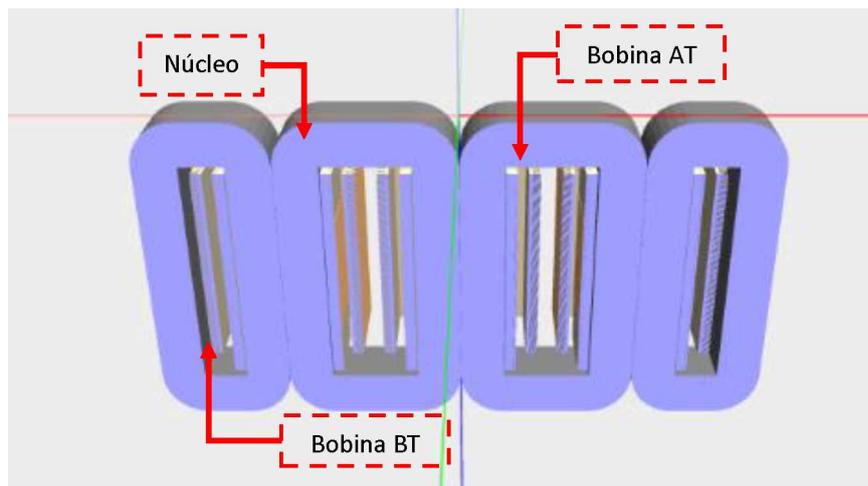


Figura 5 - Disposição no núcleo magnético envolvente (ilustrativo)

As secções dos núcleos podem ser construídas de forma quadrada (a), retangular (b), cruciforme (c) ou aproximadamente circular (em degraus simulando um cilindro - d), como é ilustrado na figura 6.

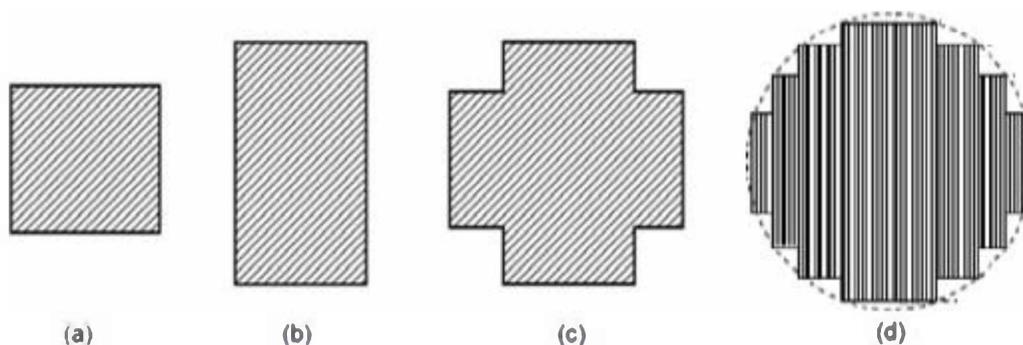


Figura 6 - tipos de secções de núcleos magnéticos

Dentre as secções apresentada na figura 6, a secção “d” que se aproxima a uma geométrica circular é a mais utilizadas no processo construtivo de transformadores de distribuição. Porém algumas dificuldades são encontradas na utilização desse tipo de núcleo, o problema consiste em estabelecer um círculo através de uma secção mínima de área e de um determinado número de degraus para um diâmetro, levando em conta o custo de fabricação e as vantagens de um maior coeficiente de utilização da secção circular. [7]

A tabela 1 mostra uma relação aproximada entre o diâmetro do núcleo e o número de degraus normalmente utilizada em projetos de transformadores de distribuição.

Diâmetro (mm)	D ≤ 50	50 < D ≤ 70	70 < D ≤ 100	100 < D ≤ 140	140 < D ≤ 200	200 < D ≤ 300	300 < D ≤ 400	400 < D ≤ 550	550 < D
Nº de degraus	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabela 1 - Número de degraus em função do diâmetro [7]

Na elaboração de um projeto devemos observar algumas medidas mais importantes com relação a constituição do núcleo magnético, são elas:

- Seção do núcleo;
- Número de degraus;
- Altura da janela (distância entre as vigas do núcleo);
- Largura da janela (distância entre os centros das colunas do núcleo).

Uma vez definido os valores citados nos 4 tópicos anteriores, aborda-se a forma mais usual pelos fabricantes de transformadores no processo de fechamento do núcleo magnético.

Com o intuito de reduzir as perdas geradas pelo ramo magnetizante e pela alta corrente de magnetização geradas pelos entreferros, os núcleos são montados com suas lâminas dispostas de modo a diminuir esses efeitos danosos, que são causados pelo entreferro na junção das lâminas. As junções ou entreferro das lâminas podem ser feitas em qualquer parte do ramo magnético (núcleo), porém nos transformadores de distribuição são realizadas na intercessão das colunas e das travessas, com o objetivo de facilitar o procedimento de montagem, apresentado na figura 7. Assim o núcleo pode ser montado em partes separadas e os enrolamentos podem ser construídos em moldes e somente depois serem colocados no núcleo, como mostra a figura 8.

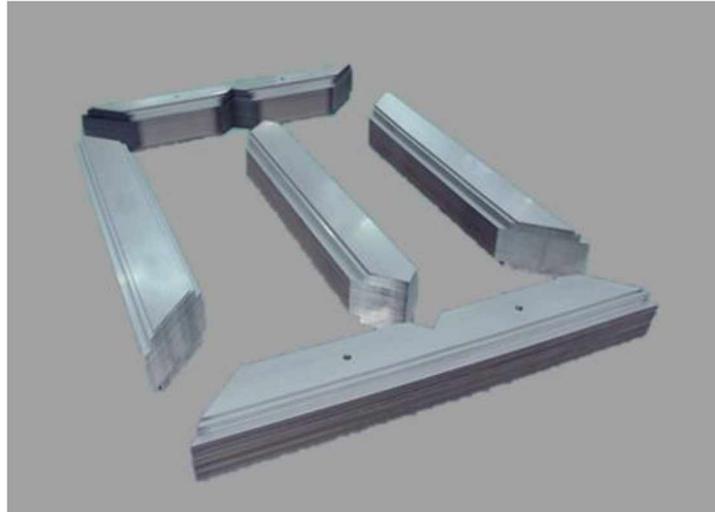


Figura 7 - Núcleo trifásico com junção de 45°



Figura 8 - núcleo trifásico pré-montado

Para minimizar ainda mais os incômodos gerados pelos entreferros no núcleo magnético, as chapas de aço silício são cortadas com angulação de 45 graus (ilustrado nas figuras 7, 8 e 9) nos cantos e provendo um pequeno traspassamento nas junções do núcleo, conforme é ilustrado na figura 9. Usualmente utiliza-se um traspassamento de 10 a 15 mm entre os conjuntos de lâminas para minimizar os efeitos causados pelo entre ferro. [7]

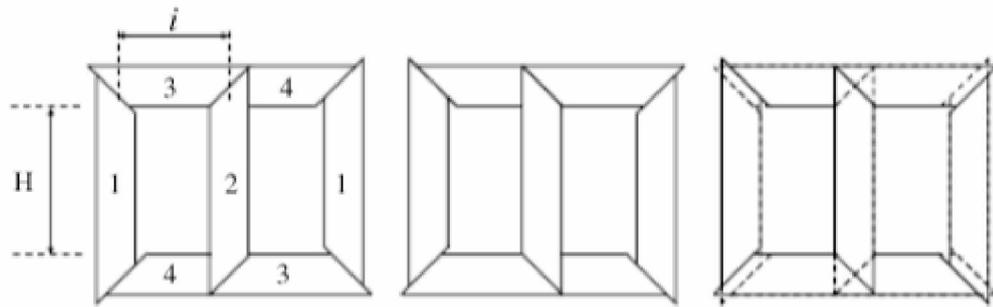


Figura 9 - Processo de traspassamento do núcleo magnético [7]

Desta forma a construção do núcleo obedece ao seguinte processo:

- Corte longitudinal das chapas;
- Corte transversal das chapas;
- Cortes por estampagem e furação da chapa quando necessário;
- Recozimento e isolamento das chapas quando necessário;
- Preparação dos acessórios;
- Montagem;
- Prensagem.

2.2. Enrolamentos.

As bobinas ou enrolamentos (conhecidas como panquecas no chão de fábrica) de um transformador são vista como a parte mais significativa do transformador, sendo a parte que exige mais atenção durante o projeto e o processo de montagem. A parte ativa (bobinas, ligações e óleo) do transformador está diretamente ligada a vida útil do equipamento, tendo que ser capaz de suportar os diversos estresses durante o período de operação, aos quais pode ser relacionar a temperatura de funcionamento nominal, os curtos-circuitos e transitórios elétricos, e seu isolamento deve suportar os níveis de tensão da sua classe de tensão. [7]

A disposição das bobinas do primário (alta tensão - AT) e secundário (baixa tensão - BT) nos transformadores de distribuição, na grande maioria são montadas de modo concêntricos (ilustrado na figura 11-A), de forma que as bobinas de uma fase estejam

sobrepostas a outra, garantindo um maior acoplamento magnético e conseqüentemente diminuindo o a dispersão de fluxo.

Quanto aos tipos de bobinas, elas podem ser classificadas em dois classes, que são:

- Bobina helicoidal ou em camadas (ilustrado na figura 10-A);
- Bobina em discos (ilustrado na figura 10-B).

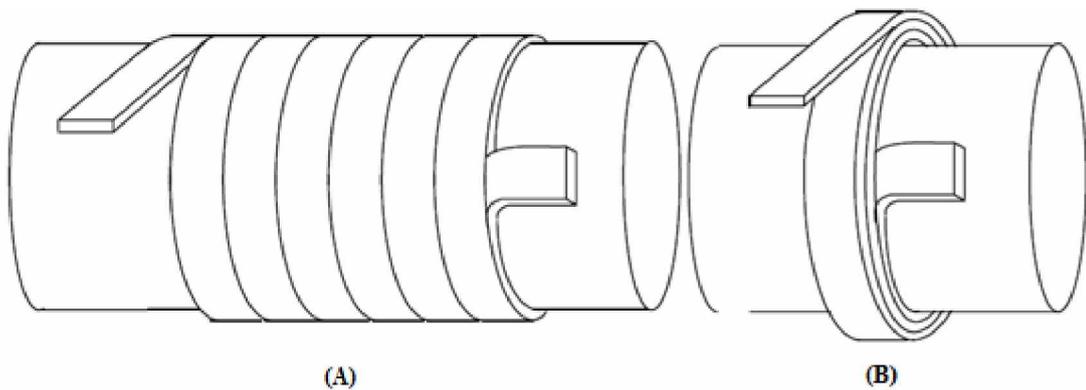


Figura 10 - Bobina helicoidal (A) / Bobina em disco (B)

Quanto à disposição das bobinas, elas podem ser:

- Concêntricas (ilustrado na figura 11-A);
- Intercaladas: em discos ou em panquecas (ilustrado na figura 11-B).

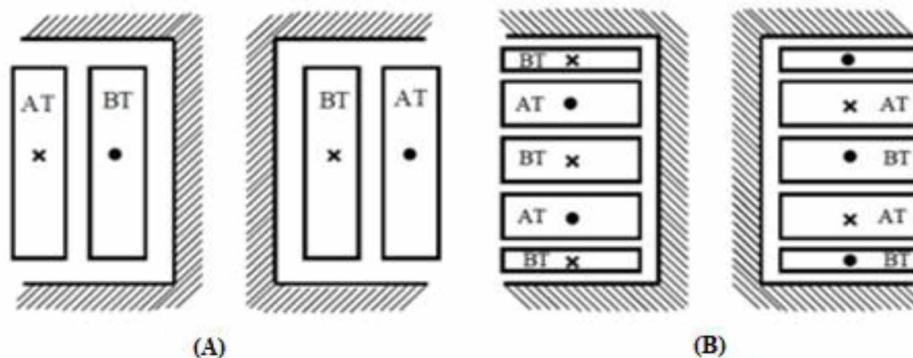


Figura 11 - Disposição concêntrica (A) / Disposição intercalada (B)

A escolha do tipo de bobina deve levar em consideração diversos fatores, tais como:

- A distribuição da tensão ao longo do enrolamento;
- As perdas adicionais;
- A rigidez mecânica para suportar curtos-circuitos;
- A disposição geométrica para facilitar a construção e as ligações;
- O custo de fabricação.

Quanto aos condutores a serem utilizados em um projeto, suas seções podem ser encontradas de várias formas, onde cada modelo possui atribuições diferente quanto ao nível de corrente e tensão e logicamente das características desejada pelo projetista. As formas mais comuns e mais utilizadas em transformadores de distribuição, são os condutores de formato retangulares, circulares e as chapas, onde podem ser encontrados de alumínio ou de cobre [7].

Independente do formato e do tipo de material escolhidos dos condutores, todos eles devem ser isolados para assim constituir uma espira. Os condutores são isolados com uma camada de esmalte (fios esmaltados), com fitas de papel, ou também com cadarço (fita especial para esse tipo de isolamento). O tipo de isolamento a ser adotada depende das características dielétricas do material a ser utilizado na isolamento e das condições físicas que o condutor será submetido.

As bobinas são constituídas de forma cilíndricas (para núcleos de forma cilíndricas e ou cruciforme), pois possibilita maior facilidade na sua constituição, uma vez que a variação do diâmetro interno das bobinas pode ser ajustada de forma simples.

Uma bobina pode ser constituída com enrolamento de DIREITA ou enrolamentos de ESQUERDA, o que depende do sentido que a mesma será enrolada. É importante salientar que o sentido de enrolamento da bobina e de estrema importância para o funcionamento do equipamento, o qual e especificado durante o projeto. Na figura 12 ilustra os dois sentidos de enrolamentos.

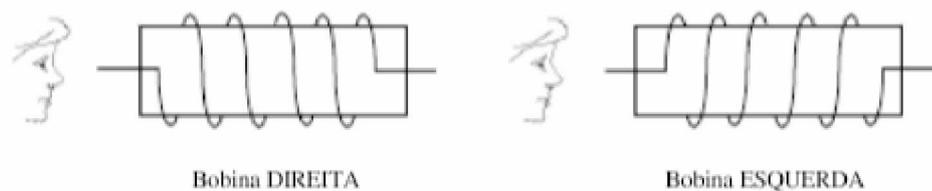


Figura 12 - Sentido de enrolamento da bobina helicoidais

Quanto as perdas nos enrolamentos, elas se dividem em:

- Perdas ôhmicas;
- Perdas por circulação de corrente em condutores paralelos;
- Perdas parasitas.

2.3. Isolação

A vida útil do transformador está ligada diretamente as partes ativas do transformador, no qual dependem essencialmente das solicitações requeridas pelo o qual o sistema de isolação é submetido durante o seu processo de operação. Desta forma o sistema de isolação requer muita atenção durante todo o processo de construção e ao longo da sua vida no campo.

Os materiais utilizados no sistema de isolação podem ser classificados em três tipos, são eles:

- Isolantes líquidos (figura 13-A);
- Isolantes sólidos (figura 13-B);
- Isolantes gasosos (SF₆).



(A)



(B)

Figura 13 - Materiais isolantes

Os quais são utilizados no isolamento dos transformadores nas seguintes partes:

- Entre espiras de uma bobina;
- Entre as camadas de uma bobina;
- Entre bobinas (panquecas) de uma fase;
- Entre as bobinas de baixa e alta tensão;
- Entre bobinas de fases diferentes;
- Entre bobinas e as colunas e culatras;
- Entre o núcleo e os elementos de montagens (fixação);
- Entre as bobinas e o tanque;
- Nas buchas de passagem dos terminais das bobinas.

Os transformadores, quanto ao isolamento utilizado, podem ser do tipo seco ou imerso em líquido isolante. Para médias tensões, até a classe 36,2 kV, podem ser construídos transformadores secos em que os principais dielétricos utilizados são as resinas naturais e sintéticas, fibra de vidro, mica, porcelana, resinas epóxi, o ar, certos gases isolantes (SF₆), etc. Nos transformadores imersos em líquido isolante, são utilizados os materiais na base de celulose como papel “kraft” de alta resistência mecânica, estruturas com papel laminado como o papelão “presspan”, madeira tratada e etc., E como líquido isolante o óleo mineral para transformadores e também alguns óleos sintéticos. [7][1]

2.4. Tipos de ligação trifásicas.

As conexões dos lados de alta e de baixa tensão do transformador podem ser feitas de três maneiras, são elas: ligação delta (triângulo); ligação estrela; ligação zig-zag. Onde cada uma dessas ligações possuem aplicações e características diferentes.

2.4.1. Ligação delta (triângulo).

A figura 14 apresenta o esquema de ligações que deve ser realizado com os três enrolamentos do transformador para que se obtenha uma conexão em Δ (delta). O início de cada

bobina é ligado ao fim da bobina vizinha, fechando o triângulo com a ligação do início da última bobina ao fim da primeira bobina.

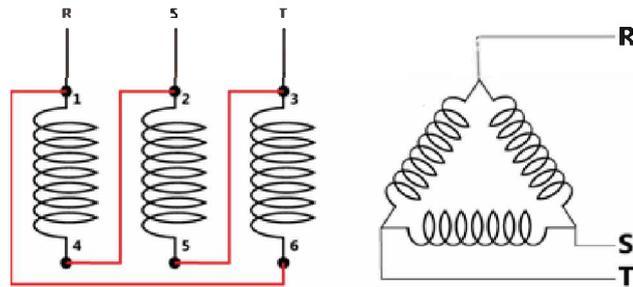


Figura 14 - Ligação delta

Quando um transformador tem seus enrolamentos ligados em Δ (delta), as tensões de linha são iguais as tensões de fase e as correntes de linha são diferentes das correntes de fase. A figura 15 apresenta a disposição e nomenclatura utilizada para as tensões e correntes em um circuito em Δ . Nesse tipo de ligação só é possível obter um nível de tensão

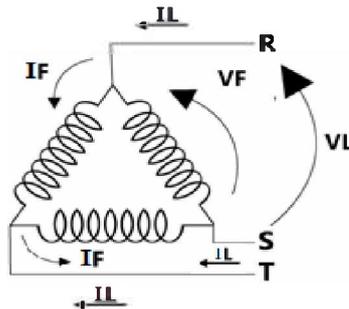


Figura 15 - Disposição das correntes e das tensões na ligação delta

2.4.2. Ligação estrela.

A figura 16 apresenta o esquema de ligações que deve ser realizado com os três enrolamentos do transformador para que se obtenha uma conexão em Y (estrela). Nesse tipo de ligação, os fins dos três enrolamentos estão ligados a um ponto comum, formando o neutro da ligação estrela e os inícios formam as linhas.

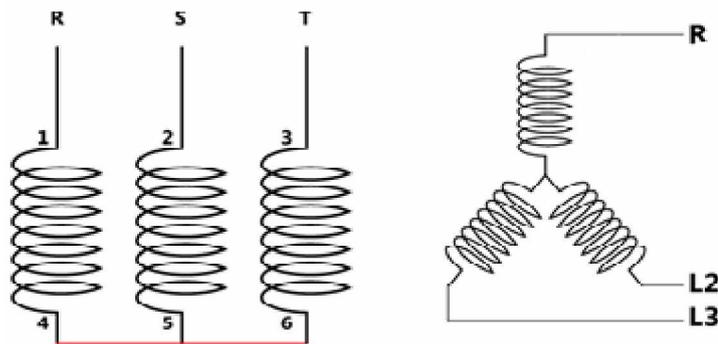


Figura 16 - Ligação em estrela

Quando um transformador tem seus enrolamentos ligados em Y, as tensões de linha são diferentes das tensões de fase e as correntes de linha são iguais às correntes de fase. A figura 17 apresenta a nomenclatura utilizada para as tensões e correntes em um circuito em Y. Nesse tipo de ligação é possível obter dois níveis de tensões.

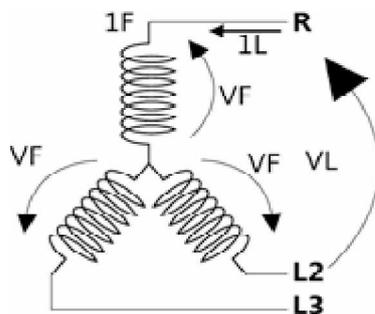


Figura 17 - Disposição das correntes e tensões na ligação estrela

2.4.3. Ligação zig-zag.

A figura 18 apresenta o esquema de ligações que deve ser realizado com os enrolamentos do transformador para que se obtenha uma conexão em zig-zag. Nesse tipo de ligação, os enrolamentos são divididos em duas metades cada, a conexão é obtida através da ligação de uma metade de uma coluna em oposição à metade da coluna vizinha.

Importante salientar que nesse tipo de ligação podemos obter 6 níveis de tensões, porém a um aumento de até 10% no valor do equipamento. [7]

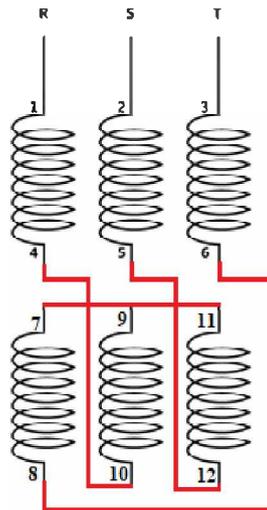


Figura 18 - ligação zig-zag

2.5. Tipos de comutação

Os comutadores de taps em transformadores tem um papel fundamental nas redes de distribuição devido à queda de tensão ao longo da linha, a qual é gerada pelo seu comprimento ou até mesmo pelo seu nível carregamento. Estes comutadores são utilizados para ajustar a relação de transformação do transformador de maneira que todos os consumidores sejam atendidos conforme especifica e regulamenta a PRODIST, ANEEL (Agencia Nacional de Energia Elétrica).

Os comutadores mais usuais em transformadores de distribuição utilizam características mecânicas de comutação, onde a robustez e o baixo custo são seus principais atributos. Devido a forma de operação desse dispositivo, no qual a comutação somente pode ser realizada de forma presencial e com o transformador desenergizado, o que dificulta o procedimento de comutação dos taps.

Devido a estas características dos comutadores mecânicos, o procedimento de comutação do tap é raramente realizado nas redes de distribuição de energia. Esses procedimentos somente são realizados quando há reclamação de uma unidade consumidora pelo baixo ou alto nível de tensão ou através de uma auditoria realizada pela concessionária de energia elétrica local.

Os comutadores de taps dos transformadores de distribuição podem ser classificados de duas maneiras, comutadores externos (imagem 20) e comutadores internos (imagem 19). O

princípio de funcionamento dos dois dispositivos é semelhante, porém o comutador interno é encontrado do lado interno do tanque do transformador, logo acima do nível máximo do óleo isolante, para realizar a comutação do tap é necessário abrir a tampa de inspeção do transformador para realizar o procedimento. No entanto, o comutador externo é localizado do lado de fora do tanque de óleo do transformados, para realizar a comutação do tap não é necessário abrir o transformador para realizar o procedimento.



Figura 19 - Comutador de tap interno

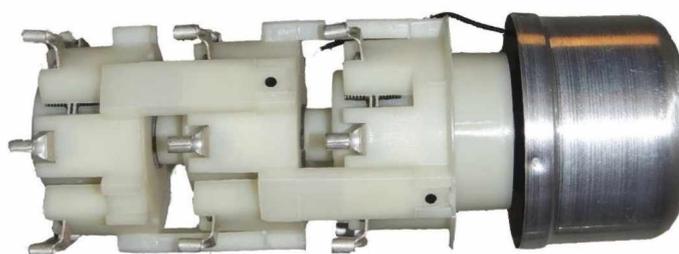


Figura 20 - Comutador de tap externo

2.6. Acessórios externos

2.6.1. Tanque

Com função de servir como revestimento da parte ativa e respectivamente do óleo isolante, o tanque é subdividido em três partes: lateral, fundo e tampa. Além de servir como revestimento o tanque tem outras funções, servindo para acrescentar uma série de itens, são elas:

- Suporte para poste (para transformadores de até 225 kVA);
- Suporte para as rodas (normalmente para potências superiores a 300KVA);
- Olhais de suspensão;
- Sistema de fechamento de tampa;
- Janela de inspeção;
- Dispositivos de drenagem e amostra de líquidos isolantes;
- Conector de aterramento;
- Furos de passagem de buchas;
- Radiadores;
- Visor de nível de óleo;
- Placa de identificação.

A constituição do tanque e a respectiva tampa devem ser de chapas de aço, laminadas a quente, conforme especifica a NBR6650 e NRR6663

2.6.2. Buchas

As buchas são os dispositivos que permitem a passagem dos condutores dos enrolamentos ao meio externo, onde são construídas basicamente pelos os seguintes itens:

- Corpo isolante: de porcelana vitrificada;
- Conductor passante: de cobre eletrolítico ou latão;
- Terminal: de latão ou bronze;
- Vedação: de borracha e papelão hidráulico.

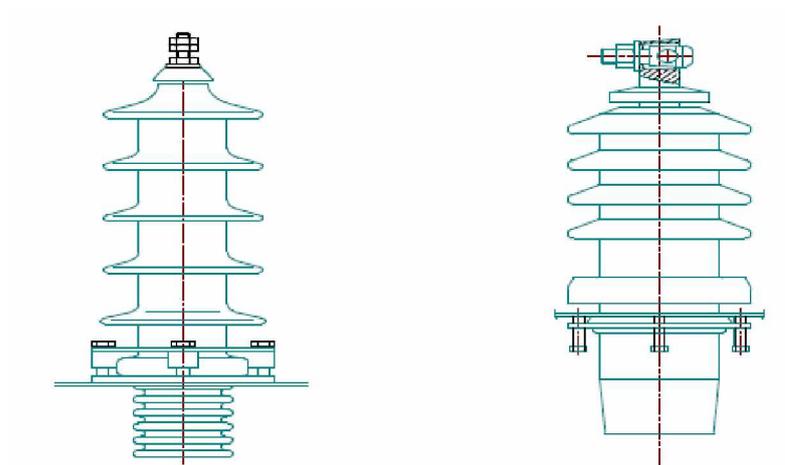


Figura 21 – Buchas ABNT de alta tensão

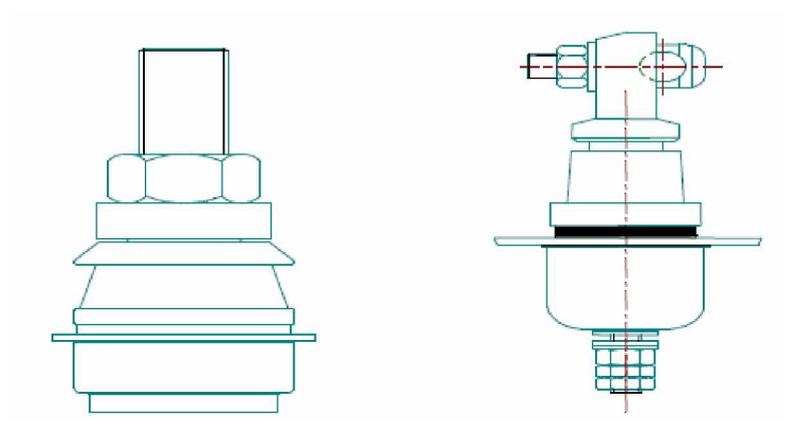


Figura 22 - Buchas ABNT de baixa tensão

A tabela 2 mostra as buchas utilizadas em transformadores de distribuição de acordo com as especificações na NBR5440.

POTÊNCIA NOMINAL DO TRANSFORMADOR [KVA]	MAIOR TENSÃO SECUNDARIA [V]	
	220	380
15 A 45	160	160
75	400	160
112,5	400	400
150	800	400
225	800	800
300	800	800

Nota: A tensão nominal das buchas de baixa tensão será conforme estabelecida na NBR 5437 (1,3KV)

Tabela 2 - Corrente nominal [A] das buchas de alta tensão para transformadores trifásicos [6]

2.6.3. Radiadores

Os radiadores são elementos utilizados nos transformadores, usualmente acima de 30KVA para dissipar todo o calor gerado pela parte ativa do transformador que se propaga através do óleo isolante. As elevações de temperatura do óleo e do enrolamento são normalizadas e devem ser limitadas para evitar a deterioração dos isolamentos de papel e do óleo. Conforme a variação de potência do transformador e das suas perdas, a área da superfície externa pode ser pequena e não o suficiente para dissipar todo o calor gerado pela parte ativa, dessa forma utiliza-se os radiadores com o intuito de aumentar a superfície de troca de calor. [4]



Figura 23 - Radiador em transformador de distribuição

2.6.4. Placa de identificação

A placa de identificação é um componente muito importante, pois é ela quem dá as principais características do equipamento. Em casos de manutenções, através dos dados informáticos contidos na placa é possível de identificar as características da parte ativa no transformador sem ter que consultar de fato o projeto, em caso de ampliação de carga ou em operações em paralelo a placa nos traz informações se é possível realizar as tais manobras.

As informações contidas na placa de identificação são estabelecidas pela norma ABNT NBR 5356.

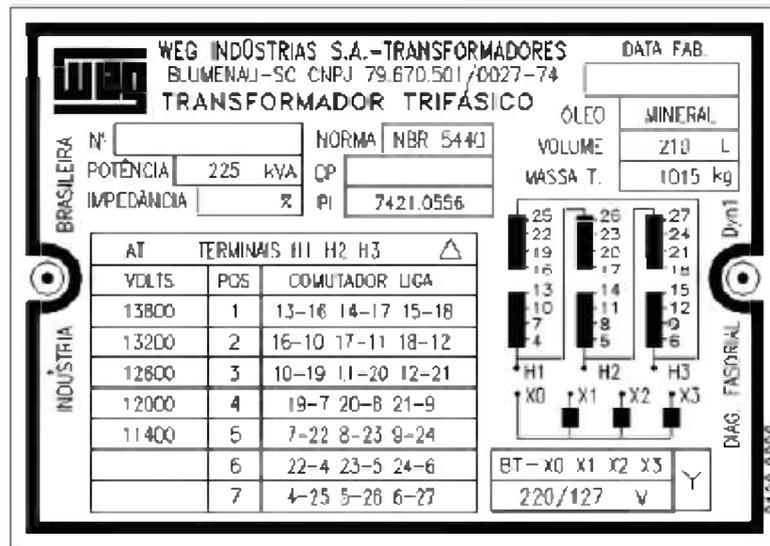


Figura 24 - Placa de identificação do transformador.

2.6.5. Indicador de nível de óleo

O óleo isolante do transformador possui uma variação do seu volume conforme a variação da temperatura interna, que é proporcional a variação da carga do transformador, dessa maneira o óleo isolante se dilata e se contrai. Sendo assim, a finalidade do indicador de nível de óleo é mostrar com perfeição o nível instantâneo do óleo no tanque, conforme a imagem 25



Figura 25 - Indicador de nível de óleo

2.6.6. Válvula de alívio

As válvulas de alívio de pressão que são instaladas em transformadores imersos em óleo isolante têm a finalidade de protegê-los contra possíveis deformações em casos de defeito interno causando uma elevada pressão no tanque, ou até mesmo pela deterioração dos materiais.

O princípio de funcionamento de válvula de alívio baseia-se em uma válvula com mola, com o surgimento de uma força superior à do seu sistema a válvula se abre permitindo a vazão desse gás ou fluido, após o alívio da pressão a válvula fecha-se automaticamente, impedindo, assim, a entrada de qualquer agente externo no interior do transformador. A mesma não necessita ser isolada do tanque quando este é submetido a vácuo.

Válvula de alívio do transformador é acionada quando a pressão interior do tanque atinge um nível de pressão de 25 a 100 KPA. [4]



Figura 26 - Válvula de alívio de pressão

2.7. Ensaios Típicos

2.7.1. Ensaio de rigidez dielétrica do óleo isolante

O processo utilizado para a determinação da rigidez dielétrica dos diferentes tipos de óleo isolante consiste em um teste de rotina, realizado com uma determinada frequência de tempo, com o objetivo de substituir o óleo isolante caso algumas das suas características físicas não estejam em conformidade.

Para a realização do ensaio serão necessários:

- Analisador de rigidez dielétrica;
- Recipientes de vidro esmerilhado;
- Álcool;
- Benzeno;
- Amostra de 1000 ml de óleo isolante mineral ou vegetal;

Para a realização do ensaio de rigidez dielétrica é necessário seguir alguns processos estabelecidos pela norma regulamentadora NBR 10576 de 2017, a qual visa e prega a confiabilidade do ensaio realizado.

2.7.1.1. Procedimento para a coleta da amostra a ser ensaiada [9]:

- Usar um recipiente de vidro transparente com capacidade de aproximadamente 1 litro, que deve ser previamente lavado com álcool e benzina;
- Esse recipiente deve ser seco e em seguida enxaguado com o próprio óleo a ser testado;
- Recomenda-se que a rolha do mesmo seja de vidro esmerilhado e que após a lavagem com o álcool e benzina, seja lavada á estufa para secagem de 100°C;
- De preferência, mergulhar a rolha em parafina;
- Os demais recipientes (copos, funis, tubos e depósitos) se possível, devem ser de vidro e devem ser submetidos ao mesmo processo de limpeza e secagem;
- Limpar cuidadosamente a válvula de drenagem do transformador, evitando o uso de panos e estopas;
- Abrir a válvula de drenagem existente no fundo do tanque do transformador, deixando escorrer aproximadamente 500 ml de óleo pela a mesma antes de coletar a amostra, isto permitirá a limpeza do sistema de drenagem propriamente dito;
- Encher devidamente o recipiente com óleo, sem usar jato forte, para evitar a formação de espumas e bolhas;

- Não deve ser permitida a entrada de qualquer impureza. Caso for evidenciado a contaminação por qualquer tipo de impureza o enchimento do recipiente deverá ser realizado novamente conforme descrito anteriormente;
- Se o ensaio não poder ser realizado no local da coleta, o óleo deverá ser armazenado em um recipiente de vidro garantindo a integridade do óleo, evitando ao máximo qualquer contato com os meios externos, até mesmo o ar;
- No preparo para a realização do ensaio o óleo deve ser agitado de forma suave para que não haja a formação de espuma e bolha na amostra, visando que o conteúdo da amostra não seja homogeneizado;
- A coleta do óleo não poderá ser realizada quando a temperatura do óleo for inferior à do meio ambiente, com o objetivo de evitar que o óleo retenha umidade e que haja condensação sobre o mesmo, também não deve ser coletada quando houver ventos forte ou empoeirado, ou sobre condições climáticas ruins;
- Evitar o máximo possível de contato com a parte interna dos recipientes utilizados no processo de análise e coleta;

2.7.2. Ensaio de relação de transformação

O ensaio de relação de transformação de um transformador é um dos vários ensaios de rotinas realizados para a validação de conformidade do equipamento, com isso, temos o objetivo deste subitem apresentar os procedimentos de realização desse ensaio.

Os métodos mais utilizados para obtenção desse parâmetro são:

- Método do voltímetro
- Método do TTR (*Transformer Turns Ratio*);

Ambos os métodos citados anteriormente são suficientes para oferecer valores que atestam a relação de transformação de um transformador. Para realizar a avaliação do teste e do transformador independente da metodologia e dos equipamentos de instrumentação utilizados, devem possibilitar que seja realizado todas as medições com variação máxima admissível de mais ou menos 5 %, em todos os tapes projetados. [1]

Onde calcula-se o erro percentual em função da relação nominal do transformador R_{nom} (dado de projeto) e da relação de transformação medida R_{med} .

$$E\% = \frac{R_{med} - R_{nom}}{R_{nom}} * 100$$

Onde $E\%$ é o erro percentual calculado.

A ABNT NBR 5356 estabelece que este ensaio deve ser realizado em todas as derivações, o que se constitui uma boa prática, principalmente na recepção do transformador. Observa-se que as tensões deverão ser sempre dadas para o transformador em vazio. A citada norma admite uma tolerância igual ao menor valor entre 10% da tensão de curto-circuito ou $\pm 0,5\%$ do valor da tensão nominal dos diversos enrolamentos, se aplicada tensão nominal no primário. [2][7]

2.7.2.1. TTR – *Transformer Turns Ratio*

TTR é as iniciais do nome de um equipamento que possibilita a realização da medição da relação de transformação de um transformador. A possibilidade de variar a tensão de entrada através de um transformador monofásico de espiras variáveis e colocando-o em paralelo com a fase do transformador que se quer medir, faz com que se possa obter esse parâmetro.

Esse ensaio normalmente é realizado ainda no processo de montagem do transformador, após o fechamento do núcleo magnético e da realização das ligações das bobinas e taps, com o objetivo de evitar possíveis erros de projetos ou de montagem.



Figura 27 - TTR - Transforme turns ratio.

A conexão do TTR ao transformador é realizada através de sete conectores quando se tem o equipamento trifásico ou com quartos conectores quando se tem um equipamento monofásico.

Em um equipamento trifásico com sete conectores, teremos três conectores ligados na alta tensão (AT), três conectores conectados da baixa tensão (BT) e um conector ligado no neutro, conforme a imagem 28.

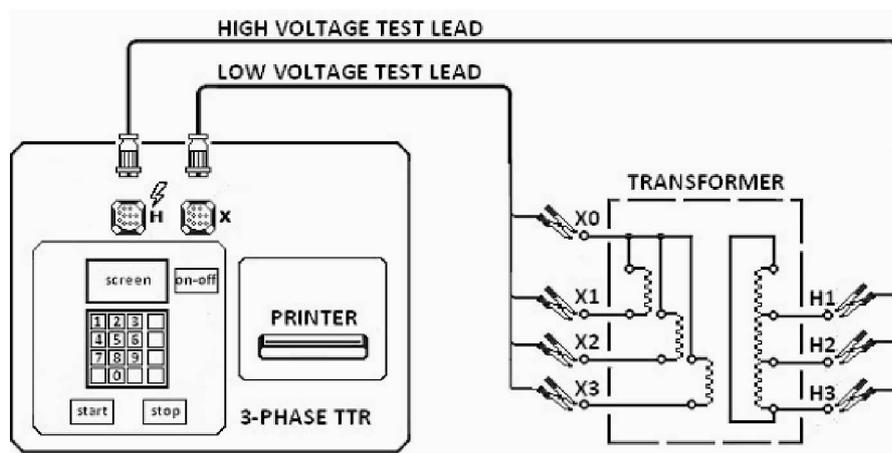


Figura 28 - Conexão TTR

2.7.2.2. Método do voltímetro

Este método tem como função aplicar uma determinada tensão dentro dos limites da capacidade de isolamento e excitação de um transformador a vazio e medir a tensão no secundário transformador, as leituras nos voltímetros devem ser realizadas de forma simultâneas para evitar erros, se possível realizar as medições com o auxílio de TPs. Caso o processo for realizado com instrumentos manuais aconselha-se que sejam realizadas mais de uma vez o experimento para evitar possíveis erros.

Tem-se que por motivos de segurança dos operadores, a alimentação do transformador para a realização do ensaio é feita na bobina de alta tensão e com tensão de alimentação reduzida com relação a tensão nominal, pois uma vez que o valores de corrente na AT são menores que os da BT.

O ensaio descrito nos apresenta dois problemas, os quais não resultam em um experimento totalmente concreto, são eles:

- As fontes, em grande parte dos casos, apresentam tensões desequilibradas, mascarando os resultados das medições;
- Se aplicar, por exemplo, três níveis de tensões distintos, mesmo balanceados, – podem resultar em três valores diferentes de relação de transformação.

Portanto em ambas as situações apresentadas, os erros de medições e a imprecisão nos valores obtidos descaracterizam os objetivos desse experimento.

Na atualidade, já é possível encontrar equipamentos que tem oferecidos soluções mais adequadas para a realização desse ensaio, como por exemplo, equipamentos micro processados que garantem a estabilidade da tensão e medidas mais precisas, que tem a capacidade de apontar a real relação de transformação do transformador, são equipamentos mais adequados para a realização deste ensaio que a metodologia dos voltímetros.

2.7.3. Ensaio a vazio

O ensaio em vazio de um transformador de tem como objetivo principal a determinação do ramo magnético do transformado, sendo assim possível determinar as perdas no núcleo magnético por histerese e Foucault que também conhecida como perda no ferro, determinar a corrente de magnetização do ramo magnético (corrente em vazio I_0) e a relação de transformação através dos métodos dos voltímetros, apresentada no item 2.10.2.2.

Para a realização do ensaio serão necessários:

- 3 Amperímetros com escala apropriadas;
- 1 Voltímetro com escala apropriada;
- 1 Wattímetro trifásico ou 2 Wattímetros monofásico de escala apropriada;
- 1 Varivolt trifásico.

As normas da ABNT sugerem que o ensaio a vazio seja realizado pelo lado de baixa tensão (BT) por segurança e também para facilitar, visto que deve ser aplicada a tensão nominal, logo uma tensão mais baixa é mais fácil de ser conseguida.

A corrente adotada no ensaio vazio e sempre a média das três correntes que circula no transformador trifásico sendo que a corrente que circula no meio e sempre a menor.

Os cálculos podem ser feitos por fase, independentemente da ligação do transformador.

Os principais parâmetros a serem calculados são:

- Impedância do ramo magnetizante;
- Fator de potência a vazio;
- Componente de perdas no ferro da corrente a vazio;
- Componente de magnetização da corrente a vazio;
- Resistência equivalente de perdas no ferro do ramo paralelo;
- Reatância de magnetização do ramo paralelo.

Na figura 29 ilustra o modelo de ligação no qual os equipamentos devem ser ligados para que seja possível obter os dados necessários para a realização dos cálculos.

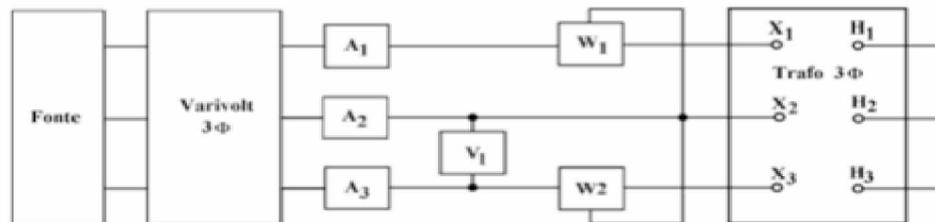


Figura 29 - Esquema de montagem para ensaio em vazio

2.7.4. Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto circuito de um transformador de tem como objetivo principal a determinação das perdas geradas nos enrolamentos devido a sua resistência natural (perda por efeito Joule), cujo o conhecimento é fundamental uma vez que esse valor é limitado por normas nacionais e internacionais, também tem como objetivo determinar a impedância, a resistência e reatância percentuais, e a queda de tensão interna gerada.

Para a realização do ensaio serão necessários:

- 3 Amperímetros com escala apropriadas;
- 1 Voltímetro com escala apropriada;
- 1 Wattímetro trifásico ou 2 Wattímetros monofásico de escala apropriada;
- 1 Varivolt trifásico.

O ensaio é realizado curto circuitando-se um dos lados do transformador e aplicando-se tensão no outro lado. As normas da ABNT sugerem que o ensaio de curto-circuito seja realizado pelo lado de alta tensão (AT) por segurança e também para facilitar, visto que deve ser aplicada a corrente nominal, logo devido as relações de transformação da corrente em um transformador torna-se mais fácil a realização do ensaio.

Na figura 30 ilustra o modelo de ligação no qual os equipamentos devem ser ligados para que seja possível obter os dados necessários para a realização dos cálculos.

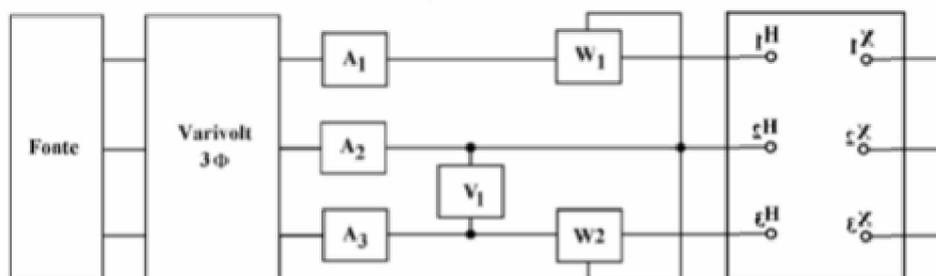


Figura 30 - Esquema de montagem para ensaio de curto-circuito

3. CÁLCULO ANALÍTICO

Esse capítulo oferece um embasamento técnico e teórico para o desenvolvimento de um projeto de transformador típico de distribuição, apresentando de forma dinâmica e interativa os devidos conceitos e fórmulas práticas com o auxílio de um exercício de aplicação.

Perante a metodologia a ser exposta neste capítulo, frisa-se que os projetos de transformadores são de extrema importância, sua metodologia de cálculo analítico é um processo fundamentalmente interativos, onde tem como objetivo desenvolver equipamentos mais eficientes e com o menor custo de produção, buscando atender todas as regulamentações apresentadas segundo a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em suas últimas edições. [7][4].

3.1. Informações técnicas do transformador.

A tabela 3 apresenta a definição dos principais dados técnicos do transformador para o início do desenvolvimento dos devidos cálculos da metodologia analítica de projeto.

Dados do Transformador			
	Alta	Baixa	Unidade
Potência	75.000		VA
Ligação	Delta	Estrela	-
Tensão	34.500	220	V
Frequência	60		Hz
Núcleo	Envolvido		-
Enrolamento	Cilíndrico		-
Condutor	Cobre		-
Nº de Tapes	4		-

Tabela 3- Dados Técnicos do Transformador

Esse projeto visa em seu desenvolvimento todos os itens estabelecidos e apresentados na norma NBR 5440, NBR 5380, NBR 7037, NBR 5356, as quais estabelecem os requisitos das características elétricas e mecânicas dos transformadores aplicáveis a redes aéreas de distribuição, nas tensões de até 36,2 KV e nas tensões secundárias usais dos transformadores monofásico e trifásico, com enrolamentos de cobre ou alumínio, imersos a óleo isolante com resfriamento natural [6].

A norma tem como objetivo principal estabelecer alguns parâmetros elétricos para se obter maior eficiência nos transformadores e a padronização do sistema nacional de distribuição.

Nas tabelas 4 e 5 mostra todos os requisitos estabelecidos perante a norma NRB5440, especificando a classe de tensão, perdas, rendimento, eficiência, nível de tensão nos terminais e as respectivas derivações (tape).

Tensão Máxima do equipamento (KVeficaz)	Derivação Nº	Tensão (v)				
		Primário		Secundário		
		Trifásico (FF)	Monofásico (FN)	Trifásico	Monofásico	
15	1	13.800	7.967	380/220 ou 220/127	Dois Terminais: 220 ou 127	
	2	13.200	7.621			
	3	12.600	7.275			
24,2	1	23.100	13.337		380/220 ou 220/127	Três terminais: 440/220, 254/127, 240/120 ou 230/115
	2	22.000	12.702			
	3	20.900	12.067			
36,2	1	34.500	19.919	380/220 ou 220/127		Três terminais: 440/220, 254/127, 240/120 ou 230/115
	2	33.000	19.053			
	3	31.500	18.187			

NOTA: FF - Tensão entre fase.
FN - Tensão entre fase e neutro.

Tabela 4 - Transformadores com derivação[6]

Potência do transformador KVA	Eficiência	Perda em vazio	Perda total	Rendimento mínimo C=0,5 e FP=0,92	Corrente de excitação	Tensão de curto-circuito
	Nível	W	W	%	%	%
45	A	125	695	98,72	3,8	4
	B	145	770	98,57		
	C	175	875	98,34		
	D	200	970	98,14		
	E	230	1075	97,91		
75	A	175	1025	98,89	3,4	
	B	200	1135	98,76		
	C	240	1285	98,57		
	D	280	1430	98,38		
	E	320	1580	98,19		
112,5	A	240	1335	99,02	3	
	B	275	1470	98,9		
	C	330	1665	98,73		
	D	385	1860	98,56		
	E	440	2055	98,4		

Tabela 5 - Valores de perdas para transformadores trifásicos com tensões máxima 36,2 KV[6]

As células realçadas em vermelho nas tabelas 4 e 5 representam os valores a serem respeitados no decorrer dos cálculos desse projeto.

Conforme definido na tabela 3, usaremos o diagrama fasorial “delta – estrela” exigido na NBR 5440 para a classe de tensão de 36,2 KV – B entre as fases, apresentado na tabela 6.

Tensão máxima do equipamento fase-fase (KV)	Primário	Secundário
15 24,2 e 36,2		
36,2 ^a		

Tabela 6 - Diagrama fasorial [6]

3.2. Cálculo das Correntes:

3.2.1. Cálculo da corrente de fase na bobina de alta tensão, ligação em delta:

$$I_{fAT} = \frac{P_n}{3 * V_f} \quad (1)$$

$$I_{fAT} = \frac{75000}{3 * 34500} = 0,724638 \text{ A}$$

Onde P_n representa a potência nominal do transformador e V_f a tensão entre fase e neutro.

3.2.2. Cálculo da corrente de linha na bobina de alta tensão, ligação em delta:

$$I_{LAT} = \frac{P_n}{3 * V_f} * \sqrt{3} \quad (2)$$

$$I_{fAT} = \frac{75000}{3 * 34500} * \sqrt{3} = 1,255109 \text{ A}$$

3.2.3. Cálculo da corrente de fase na bobina de baixa tensão, ligação em estrela:

$$I_{fBT} = \frac{P_n}{3 * V_f} \quad (3)$$

$$I_{fBT} = \frac{75000}{3 * 220} = 113,950711 \text{ A}$$

3.2.4. Cálculo da corrente de linha na bobina de baixa tensão, ligação em estrela:

$$I_{lBT} = I_{fBT} = \frac{P_n}{3 * V_f} \quad (4)$$

$$I_{lBT} = \frac{75000}{3 * 220} = 113,950711 \text{ A}$$

3.3. Cálculo do núcleo:

3.3.1. Cálculo da tensão por espira

$$\frac{V}{esp.} = \sqrt{0,24 * \frac{P_n}{1000}} \quad (5)$$

$$\frac{V}{esp} = \sqrt{0,24 * \frac{75000}{1000}} = 4,2426407 \text{ V}$$

3.3.2. Cálculo da seção efetiva do núcleo magnético.

$$S_{eft} = \frac{V/esp * 10000}{4,44 * f * B} \quad (61)$$

Onde f representa a frequência de operação da rede em Hz e B a densidade de fluxo magnético ou indução magnética em Tesla (T) ou Webers/m².

Os valores a serem adotados em B , são pertinentes a curva de perda em W/kg em função de B , como mostrada na figura 41.

Uma vez que a indução magnética influencia diretamente nas perdas do núcleo devido a relutância do circuito magnético, neste exemplo escolheu-se o valor 1,75T ou 17500 Gauss de densidade de fluxo, portanto:

$$S_{eft} = \frac{4,2426407 * 10000}{4,44 * 60 * 1,75} = 91,004734 \text{ cm}^2$$

3.3.3. Cálculo da seção circular do núcleo.

$$S_{circ} = \frac{S_{eft}}{f_e * f_u} \quad (7)$$

Onde f_e é o fator de empilhamento do núcleo magnético, uma vez que as chapas possuem isolamento entre si, maneira utilizada para atenuação das correntes parasitas. f_u denomina-se o fator de utilização do núcleo magnético que tem como objetivo o cálculo da área circular do mesmo. Nesse exemplo utilizaremos $f_e = 0,96$ e $f_u = 0,90$ para as chapas de aço silício com espessura de 0,27 mm.

$$S_{circ} = \frac{91,004734}{0,96 * 0,90} = 105,329553 \text{ cm}^2$$

3.3.4. Cálculo do diâmetro do núcleo.

$$D_{nuc} = \sqrt{\frac{S_{circ}}{\pi}} * 2 \quad (8)$$

$$D_{nuc} = \sqrt{\frac{105,329553}{\pi}} * 2 \cong 115,805765 \text{ mm}$$

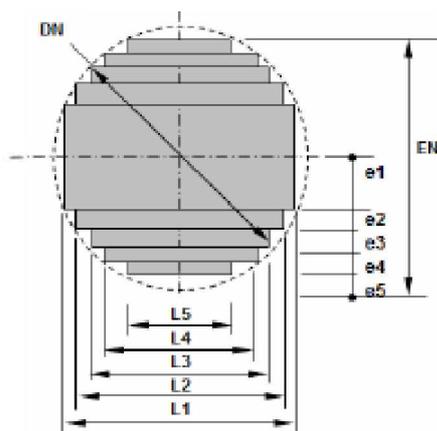
3.3.5. Degraus e empilhamentos.

Conforme demonstrado na tabela 1, para um núcleo de aproximadamente 115,81 mm de diâmetro, recomenda-se adotar 5 degraus no projeto de construção. A tabela 7 apresenta o

detalhamento das chapas e dimensões do núcleo magnético, assim como, as figuras 31, 32 e 33 ilustram o modelo construtivo do mesmo.

Dados Construtivos do Núcleo Magnético			
Dimensões	Largura (L)	Empilhamento (E)	Unidade
7	x	x	mm
6	x	x	mm
5	30	1,587080034	mm
4	40	8,211681935	mm
3	70	9,689254426	mm
2	90	18,33452318	mm
1	110	18,10369578	mm
1	110	18,10369578	mm
2	90	18,33452318	mm
3	70	9,689254426	mm
4	40	8,211681935	mm
5	30	1,587080034	mm
6	x	x	mm
7	x	x	mm
Área Circular	105,3295529		cm ²
Área Total	92,96457418		cm ²
Área Magnética	89,24599122		cm ²
Fator de Empilhamento	0,96		%
Fator de Utilidade	0,90		%
Densidade de fluxo	1,75		T
Densidade de fluxo	17500		Gauss
Números de degraus núcleo	5		-

Tabela 7 - Dados construtivos do núcleo magnético



Dimensões Núcleo				
	Largura (L)	Empilhamento (E)	Unidade	
5	30	5	1,587080034	mm
4	40	4	8,211681935	mm
3	70	3	9,689254426	mm
2	90	2	18,33452318	mm
1	110	1	18,10369578	mm
Diâmetro	115,805765		mm	

Figura 31 - Dimensões do núcleo

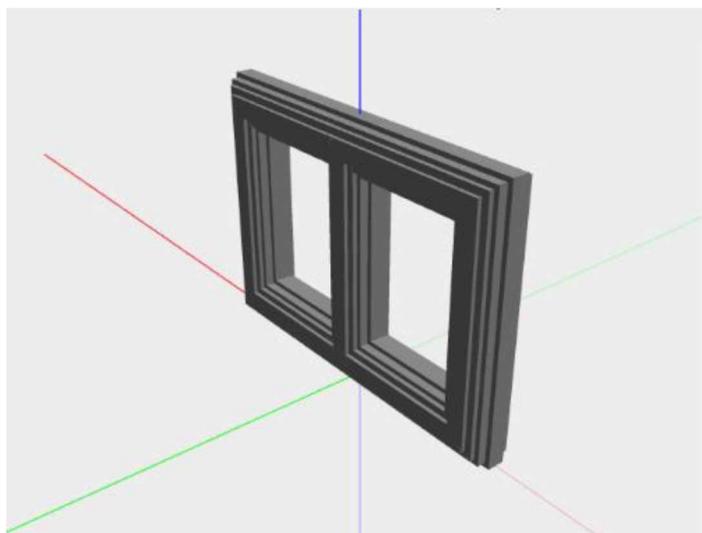


Figura 32 - Núcleo magnético (corte 1)

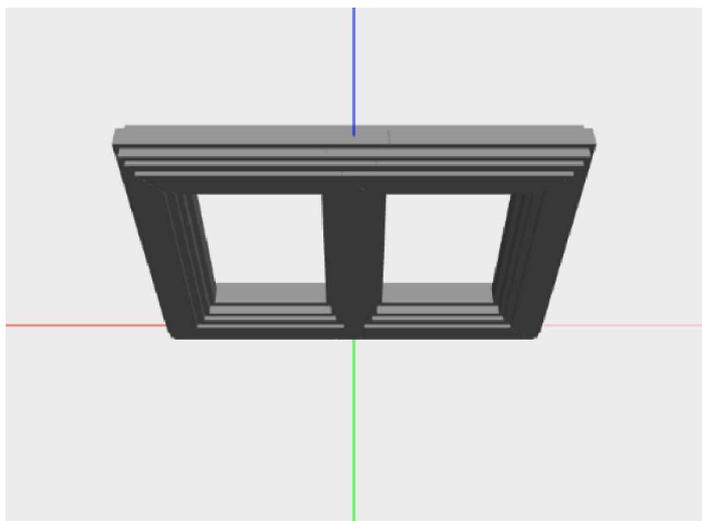


Figura 33 - Núcleo magnético (corte 2)

3.3.6. Cálculo do volt por espira novo.

Devido o cálculo da seção do núcleo magnético tem-se uma seção diferente da seção adotada para o cálculo preliminar da tensão entre as espiras (diferença de potencial entre as espiras subsequente nas bobinas de baixa tensão), desta forma calcula-se novamente a tensão por espira para obter maior exatidão nos cálculos, utiliza-se a equação abaixo:

$$V/esp = B * S_{nuc} * 4,44 * f * 10^{-4} \quad (9)$$

$$V/esp = 1,75 * 89,245991 * 4,44 * 60 * 10^{-4} = 4,160648$$

3.4. Cálculo da bobina de baixa tensão.

3.4.1. Cálculo do número de espiras.

$$N_{BT} = \frac{V_f}{V/esp} \quad (10)$$

$$N_{BT} = \frac{127}{4,160648} = 52,876377 \text{ espiras}$$

3.4.2. Densidade de corrente.

Após o cálculo da corrente que circulará no enrolamento, tem-se que abordar a definição de quantos ampères poderá circular por mm² sem prejudicar o enrolamento, a isolação e conseqüentemente o equipamento. Esse parâmetro recebe o nome de densidade de corrente d em A/mm², medida que dimensiona o limite de corrente que pode passar por uma determinada seção condutora, seja ela de alumínio ou cobre.

Usualmente tem-se que para condutores de cobre a densidade de corrente $d \leq 4,0$ A/mm² para transformadores imersos a óleo e $(d) \leq 3,0$ A/mm² para transformadores a secos [1][5], nesse caso utilizaremos a base para transformadores imerso a óleo, estabelecendo a densidade em 3,4 A/mm².

$$d_{BT} = 3,4 \text{ A/mm}^2$$

3.4.3. Cálculo da seção do condutor.

$$S_{condBT} = \frac{I_{fBT}}{d_{BT}} \quad (11)$$

$$S_{condBT} = \frac{113,950711}{3,4} = 33,514915 \text{ mm}^2$$

Devido a seção do condutor ser grande, optou-se por fracionar essa medida em 2 condutores que resultasse em uma seção maior ou igual a seção já calculada (S_{condBT}), desta forma chegamos a 2 condutores de 5 x 3,5 mm definidos com o auxílio da tabela 8. Portanto, a densidade de corrente encontrada é:

$$S_{condBT} = 2 * (5 * 3,5) = 35 \text{ mm}^2$$

Espeçsura mm \ Largura	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	6,5
3	4,29	5,64	7,14	8,45								
3,5	5,04	6,64	8,39	9,95	11,7							
4	5,79	7,64	9,64	11,45	13,45	15,14						
4,5	6,54	8,64	10,89	12,95	15,2	17,14	19,39					
5	7,29	9,64	12,14	14,45	16,95	19,14	21,64	24,14				
5,5	8,04	10,64	13,39	15,95	18,7	21,14	23,89	26,64	29,39			
6	8,79	11,64	14,64	17,45	20,45	23,14	26,14	29,14	32,14	35,14		
6,5	9,54	12,64	15,89	18,95	22,2	25,14	28,39	31,64	34,89	38,14	41,39	
7	10,29	13,64	17,14	20,45	23,95	27,14	30,64	34,14	37,64	41,14	44,64	48,14
7,5	11,04	14,64	18,39	21,95	25,7	29,14	32,89	36,64	40,39	44,14	47,89	51,64
8	11,79	15,64	19,64	23,45	27,45	31,14	35,14	39,14	43,14	47,14	51,14	55,14
8,5	12,54	16,64	20,89	24,95	29,2	33,14	37,39	41,64	45,89	50,14	54,39	58,64
9	13,29	17,64	22,14	26,45	30,95	35,14	39,64	44,14	48,64	53,14	57,64	62,14
9,5	14,04	18,64	23,39	27,95	32,7	37,14	41,89	46,64	51,39	56,14	60,89	65,64
10	14,79	19,64	24,64	29,45	34,45	39,14	44,14	49,14	54,14	59,14	64,14	69,14
10,5	15,54	20,64	25,89	30,95	36,2	41,14	46,39	51,64	56,89	62,14	67,39	72,64
11	16,29	21,64	27,14	32,45	37,95	43,14	48,64	54,14	59,64	65,14	70,64	76,14
11,5	17,04	22,64	28,39	33,95	39,7	45,14	50,89	56,64	62,39	68,14	73,89	79,64
12	17,79	23,64	29,64	35,45	41,45	47,14	53,14	59,14	65,14	71,14	77,14	83,14

Tabela 8 - Seção de condução para fios retangulares

A seção apresentada pela formula (S_{condBT}) não se igual aos valores apresentado na tabela, pois salientamos que estes condutores apresentam os cantos arredondados e há com isso uma perda de seção em função do raio de arredondamento, conforme a figura 34.

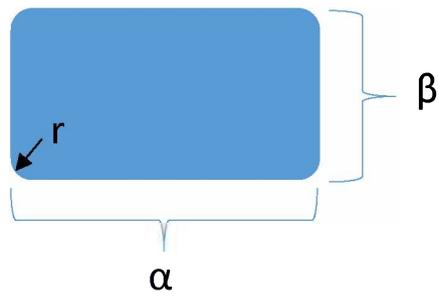


Figura 34 - Dimensões do condutor da BT

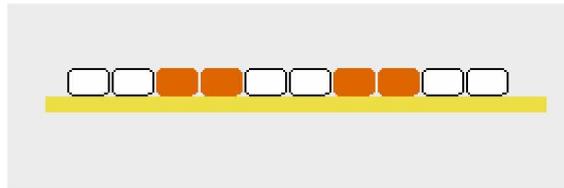


Figura 35 - Disposição dos condutores na BT

3.4.4. Cálculo da densidade de corrente nova

$$d_{BT} = \frac{I_f}{S_{condBT}} \quad (12)$$

$$d_{BT} = \frac{113,950711}{35} = 3,255734 \text{ A/mm}^2$$

Por efeitos da resistência dielétrica sabe-se que os condutores devem ser isolados para que não se tenha problemas de suportabilidade e situações pontuais como aos ensaios previstos pelas normas nacionais e internacionais.

Para condutores circulares normalmente a isolação se constitui no esmalte que estes são produzidos e são conhecidos como fios esmaltados. No caso de fios retangulares, a isolação ocorre de acordo com a figura 36.

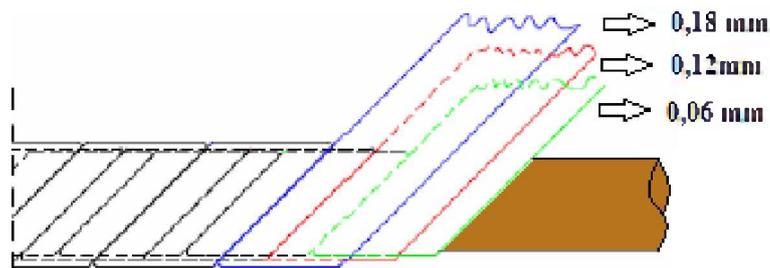


Figura 36 - Isolação do condutor da BT

A configuração utilizada é composta por três papéis de aproximadamente 0,06 mm de espessura cada um, desta forma temos $3 \times 0,06 \text{ mm} = 0,18 \text{ mm}$ de isolamento de cada lado do condutor, resultando desta forma uma isolamento total de 0,36 mm.

Com isso, calcula-se a medida axial e radial do conjunto de condutores.

$$M_{axi} = ((5 + 0,36) + (5 + 0,36)) = 10,72 \text{ mm}$$

$$M_{rad} = ((3,5 + 0,36) + (3,5 + 0,36)) = 7,72 \text{ mm}$$

3.4.5. Definição do número de camadas por bobina.

Em transformadores de distribuição aconselha-se construir as bobinas de baixa tensão com 2 ou mais camadas de espiras, o fracionamento da bobina em camadas se dá pela necessidade física do núcleo magnético, uma vez que a altura da janela é limitada por motivos econômicos, tornando assim mais viável o fracionamento da bobina em camadas com o objetivo de diminuir a altura da bobina. Nesse trabalho usaremos 2 camadas de espiras por bobina na baixa tensão (camadas sobrepostas).

3.4.6. Altura da bobina.

A altura da bobina é calculada pela equação abaixo (eq. 13) onde é considerado a medida axial do condutor, o número de espiras desejada por camada e a altura da cabeceira da bobina de baixa tensão.

Nesse exemplo utilizamos a altura da cabeceira igual a 17,5 mm, a mesma deve ser maior ou igual 16 mm conforme ilustrado na figura 37.

$$h_{bob} = \left(\frac{N_{BT}}{n^{\circ}_{cam}} + 1 \right) * M_{axi} + 2 * h_{cabBT}$$

$$h_{bob} = \left(\frac{52,876377}{2} + 1 \right) * 10,72 + 2 * 17,5 \quad (13)$$

$$h_{bob} = 329,137383mm$$

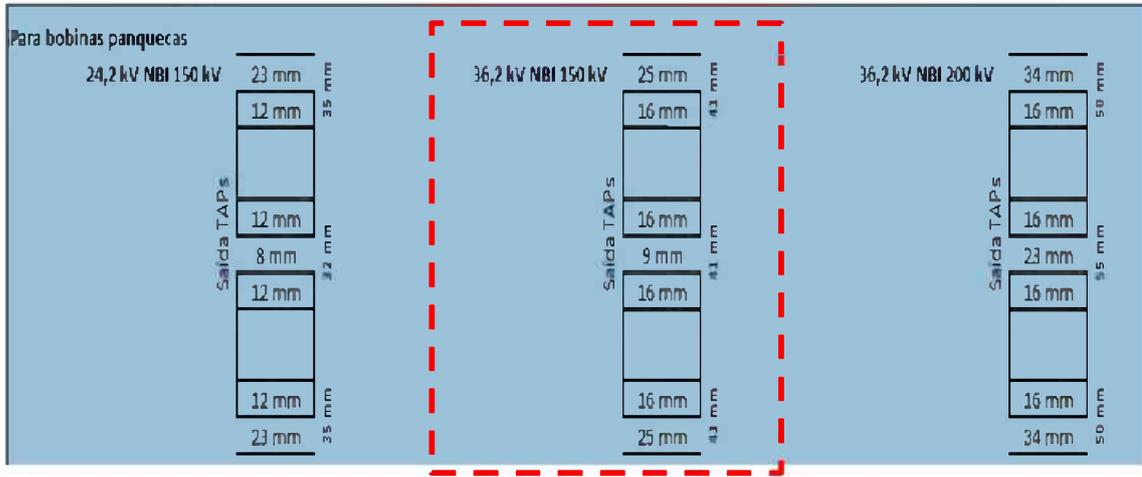


Figura 37 - Dimensões da cabeceira das bobinas AT E BT

3.4.7. Cálculo da altura da janela do núcleo.

Após o cálculo da altura da bobina de baixa tensão, pode-se calcular a altura da janela do núcleo. Nesse cálculo é admitir um espaçamento entre a bobina e o núcleo para garantir a isolamento dielétrica entre as bobinas de baixa e alta tensão com o núcleo e para facilitar a

circulação do óleo. Portanto foi admitido um espaçamento de 5mm na parte superior e inferior conforme ilustrado na figura 38.

$$h_{jan} = h_{bob} + 2 * E_{nu-bob} \quad (14)$$

$$h_{jan} = 329,137383 + 2 * 5 = 339,137383 \text{ mm}$$

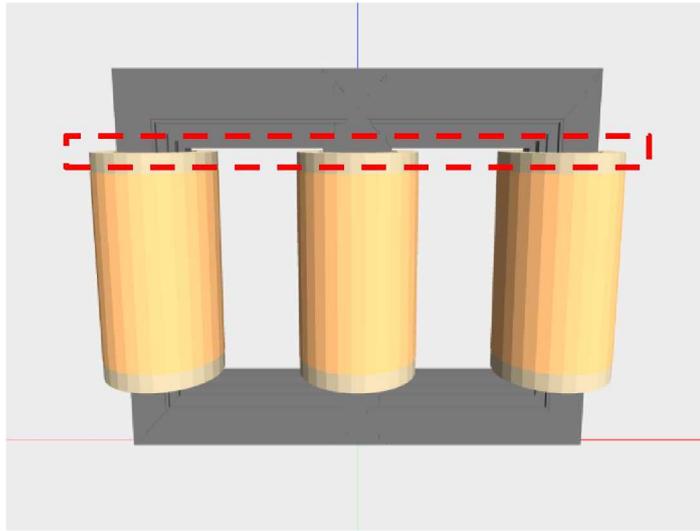


Figura 38- Espaçamento horizontal entre o núcleo e a BT

3.4.8. Cálculo da isolação sólida para bobina.

Sabe-se a importância do dielétrico na construção de um transformador que é atribuído como a isolação que devemos ter para que não haja problemas de disruptura dielétrica. Desta forma é realizar o cálculo propriamente dito da isolação mínima necessária entre as camadas da bobina através da equação abaixo (equação 15).

Nesse projeto foi adotado o coeficiente K_i igual a 0,05 conforme as condições apresentadas na tabela 9.

$$Isol_{minBT} = \frac{\left(\frac{V}{esp} * \frac{N_{BT}}{n^{\circ}_{camBT}} \right) - 100}{100} * K_i \quad (152)$$

$$Isol_{minBT} = \frac{(4,161 * 52,876/2) - 100}{100} * 0,05 = 0,005$$

Caso o resultado obtido for negativo ou menor que 0,05, adotar isolação mínima de 0,2 mm de espessura. [5]

$$Isol_{adt} = 0,2mm$$

Ki	Condição
0,03	Utilizar quando se tiver o controle total do processo de recebimento e inspeção do material isolante a ser utilizado no enrolamento e também tiver o controle do processo do enrolamento propriamente dito. Condição mais AGRESSIVA de projeto.
0,05	Utilizar quando se tiver um bom controle do processo de recebimento e controle de qualidade do papel a ser empregado na construção do enrolamento, bem como possuir um bom controle do processo construtivo do referido enrolamento. Condição SATISFATÓRIA de projeto.
0,06	Utilizar quando não se tiver um controle plenamente confiável no recebimento e controle de qualidade do papel isolante, bem como do processo fabril da bobina como um todo. Condição CONSERVADORA de projeto.

Tabela 9 - Fator de correção da isolação sólida

3.4.9. Cálculo do diâmetro interno do enrolamento

Para o cálculo do diâmetro interno do enrolamento é necessário que realizar algumas definições para obter essa medida, com isso, temos que o diâmetro do núcleo magnético deve

ser um pouco menor que o diâmetro interno da bobina de baixa tensão, uma vez que o núcleo escolhido nesse trabalho é envolvido pela BT. Portanto, adotou-se um espaçamento de 3mm entre o núcleo magnético e o enrolamento de baixa tensão (BT), ilustrado na figura 39.

$$D_{intBT} = 115,805765 + 3 = 118,805765 \text{ mm}$$

No procedimento de montagem do transformador o espaçamento entre as bobinas de baixa tensão e o núcleo magnético é utilizado no processo de fixação da bobina ao núcleo magnético, no qual utiliza-se taliscas confeccionadas de madeira para a fixação das bobinas, evitando a vibração e o auto índice de ruído do equipamento durante seu momento de operação.

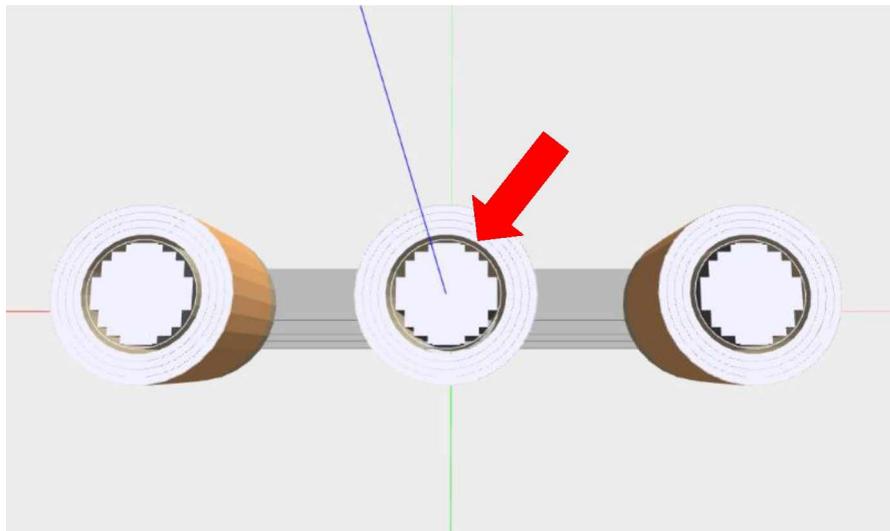


Figura 39 - Espaçamento vertical entre o núcleo e a BT

3.4.10. Cálculo do diâmetro externo do enrolamento.

Para o cálculo da medida externa do enrolamento é utilizada a equação 16:

$$D_{extBT} = D_{intBT} + 2 * (E_{molBT} + (M_{rad} * n^{\circ}_{camBT}) + ISOL_{adt}) \quad (16)$$

$$D_{extBT} = 118,8057 + 2 * (2 + (10,72 * 2) + 0,2)$$

$$D_{extBT} = 166,085765mm$$

3.4.11. Cálculo do comprimento do condutor.

Para fim econômicos e para o cálculo da resistência do condutor, calcula-se o comprimento do condutor para os três enrolamentos, utilizando a seguinte equação 17.

$$l_{condBT} = \frac{\left((D_{intBT} + 2 * E_{moldBT}) + \frac{(D_{extBT} - (D_{intBT} + 2 * E_{moldBT}))}{2} \right) * \pi * N_{BT} * n^{\circ}_{col}}{1000} \quad (17)$$

$$l_{condBT} = \frac{\left((118,805765 + 2 * 2) + \frac{(166,085765 - (118,805765 + 2 * 2))}{2} \right) * \pi * 52,8763775 * 3}{1000}$$

$$l_{condBT} = 71,984275 m$$

3.4.12. Cálculo da resistividade elétrica do condutor.

A resistividade ou resistência elétrica oferecida pelo condutor e a capacidade que o material tem em se opor ao fluxo de corrente elétrica. Quanto mais baixa for a resistividade mais facilmente o material permite a passagem da corrente elétrica.

Dessa forma, temos que: a resistência elétrica de um condutor é diretamente proporcional ao comprimento e à resistividade e inversamente proporcional à área da seção transversal. Portanto, a resistência do condutor é encontrada através da equação 18.

$$R_{BT} = \rho * \frac{l_{condBT}}{S_{condBT}} \quad (18)$$

A resistividade (ρ) do alumínio e o coeficiente de temperatura (α), é dada pela tabela 10.

Característica dos principais condutores – 20°C			
Material	Resistividade - ρ $\Omega mm^2/m$	Condutibilidade - χ S.m/mm ²	Coefficiente de temperatura - α $^{\circ}C^{-1}$

Alumínio	0,0292	34,2	0,0039
Bronze	0,067	14,9	0,002
Cobre puro	0,0162	61,7	0,00382
Cobre duro	0,0178	56,1	0,00382
Cobre recozido	0,0172	58,1	0,00382
Constantan	0,5	2	0,00001
Estanho	0,115	8,6	0,0042
Grafite	13	0,07	0,0005
Ferro puro	0,096	10,2	0,0052
Latão	0,067	14,9	0,002
Manganina	0,48	2,08	0
Mercúrio	0,96	1,004	0,00089
Nicromo	1,1	0,909	0,00013
Níquel	0,087	10,41	0,0047
Ouro	0,024	43,5	0,0034
Prata	0,00158	62,5	0,0038
Platina	0,106	9,09	0,0025
Tungstênio	0,055	18,18	0,0041
Zinco	0,056	17,8	0,0038

Tabela 10 - Resistividade dos materiais – 20°C

Visto que a tabela acima apresenta valores característicos a 20°C, é preciso fazer a correção dos valores para 75°C, pois as perdas posteriormente calculadas, por norma, devem ser calculadas a essa temperatura. Através da equação a seguir, é possível fazer a correção [4].

$$\rho_f = \rho_i * [1 + \alpha * (\theta_f - \theta_i)] \quad (19)$$

$$\rho_{75^\circ} = 0,0162 * [1 + 0,00382 * (75 - 20)]$$

$$\rho_{75^\circ} = 0,01960362$$

Portanto a resistência do condutor a 75°C corresponde a:

$$R_{BT} = 0,01960362 * \frac{71,984275}{35}$$

$$R_{BT} = 0,0403186\Omega$$

3.5. Cálculo da bobina de alta tensão AT

Nesse sub tópico será calculado os mesmos itens realizado anteriormente para os enrolamentos de baixa tensão, porém com o objetivo de projetar a bobina de alta tensão AT.

3.5.1. Cálculo do número de espiras.

Para o cálculo de espiras usa-se a relação:

$$\frac{V_{BT}}{V_{AT}} = \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \quad (20)$$

$$\frac{34500}{220} = \frac{N_{AT}}{52,876378}$$

$$N_{AT} = 8291,977376 \text{ espiras}$$

3.5.2. Densidade de corrente.

A densidade de corrente utilizada inicialmente para a bobina de alta tensão é a mesma da bobina de baixa tensão, conforme o item 3.4.2 temos que a densidade de corrente é:

$$d_{AT} = 3,4 \text{ A/mm}^2$$

3.5.3. Cálculo da seção do condutor.

A tabela 11 apresenta as dimensões dos fios não esmaltados comercializados, para esse cálculo não se utiliza a seção de fio esmaltados para obter maior exatidão nos devidos cálculos.

AWG	mm ²	mm
10	2,588	5,26

11	2,304	4,169
12	2,052	3,307
13	1,829	2,627
14	1,628	2,082
15	1,45	1,651
16	1,29	1,307
17	1,151	1,04
18	1,024	0,8235
19	0,912	0,6533
20	0,813	0,5191
21	0,724	0,4117
22	0,643	0,3247
23	0,574	0,2588
24	0,511	0,2051
25	0,455	0,1626
26	0,405	0,1282

Tabela 11 - Tabela de dimensões de fios não esmaltados

Desta forma, o condutor empregado será o seguinte.

$$S_{condAT} = \frac{I_f}{d} \quad (21)$$

$$S_{condAT} = \frac{0,724638}{3,4}$$

$$S_{condAT} = 0,213129mm^2$$

Tendo em vista que na tabela 11, a seção de fio que mais se aproxima da seção calculada é a do fio 24 AWG. Conforme esta realçado tabela 11 mostra os dados do fio escolhido.

Portanto a nova densidade de corrente será:

$$(22)$$

$$d_{AT} = \frac{I_{fAT}}{S_{condAT}}$$

$$d_{AT} = \frac{0,724638}{0,2051}$$

$$d_{AT} = 3,533094A/mm^2$$

Por tanto os condutores especificados nos cálculos a cima estão conforme os limites de densidade de corrente apresentados no item 3.4.2 para os condutores de cobre.

3.5.4. Cálculo do número de camadas.

Ambos os enrolamentos devem ter a mesma altura (figura 40). Todavia, as cabeceiras dos enrolamentos podem ser diferentes. A altura ocupada pelo fio na bobina pode ser determinada pela equação 23.

Nesse exemplo utilizamos a altura da cabeceira igual a 17,5 mm, a mesma deve ser maior ou igual 16 mm conforme ilustrado na figura 37 no item 3.4.6.

$$h_{fioAT} = h_{bob} - 2 * h_{cabAT} \quad (233)$$

$$h_{fioAT} = 329,137383 - 2 * 17,5$$

$$h_{fioAT} = 294,137383 \text{ mm}$$

Desta forma, pode-se calcular o número de camadas que compõe a bobina de alta tensão através da equação abaixo.

$$n^{\circ}_{camAT} = \frac{N_{AT}}{h_{fioAT} / \phi_{fioAT}} \quad (24)$$

$$n^{\circ}_{camAT} = \frac{8291,977376}{294,137383 / 3,533094}$$

$$n^{\circ}_{camAT} = 14,394239 \text{ camadas}$$

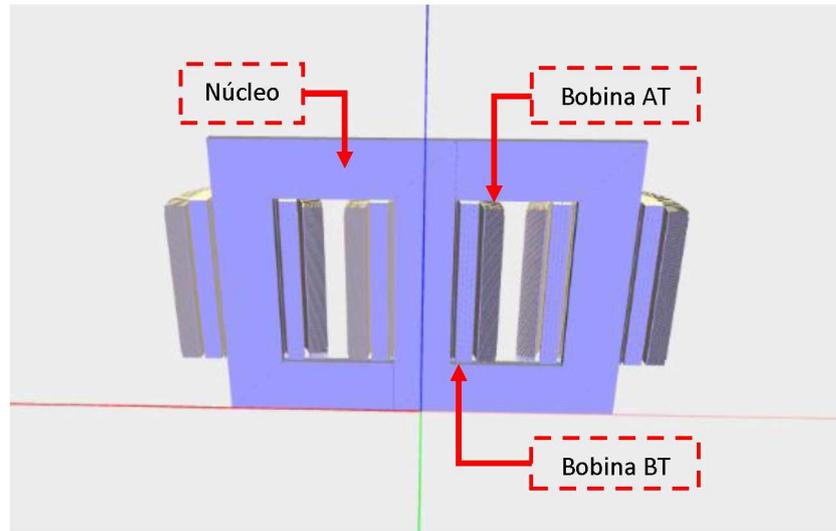


Figura 40- Altura das bobinas AT e BT

3.5.5. Cálculo da mínima isolação sólida.

A isolação pode ser encontrada pela equação 25.

$$Isol_{minAT} = \frac{(V/esp * N_{AT} / n^{\circ}_{camAT}) - 100}{100} * 0,05 \quad (25)$$

$$Isol_{minAT} = \frac{(4,161 * 8291,977 / 14,394) - 100}{100} * 0,05$$

$$Isol_{minAT} = 1,148396mm$$

Será adotado a mínima isolação sólida comercializada mais próxima.

$$Isol_{minAT} \cong 1,2 \text{ mm}$$

3.5.6. Cálculo do diâmetro interno do enrolamento.

Uma vez definido no início do projeto o tipo de núcleo que seria utilizado é o núcleo envolvido. Portanto, temos que o enrolamento de alta tensão deve envolver o enrolamento de baixa tensão e conseqüentemente os dois enrolamentos envolvem uma das 3 colunas do núcleo, conforme apresentado na figura 40. Desta forma, para os cálculos iniciais do diâmetro interno da bobina de alta tensão admitiu-se uma folga de 13 mm entre as bobinas primária e secundária do transformador.

$$D_{intAT} = D_{extBT} + 2 * E_{AT-BT} \quad (26)$$

$$D_{intAT} = 166,805765 + 2 * 13$$

$$D_{intAT} = 192,085765mm$$

3.5.7. Cálculo do diâmetro externo do enrolamento.

O diâmetro externo da bobina de alta tensão deve ser calculado pela equação 27.

$$D_{extAT} = D_{intAT} + 2 * (E_{molAT} + ((D_{condAT} + Isol_{adtAT}) * n^{\circ}_{camAT})) \quad (27)$$

$$D_{extAT} = 192,086 + 2 * (2 + ((0,5106 + 1,2) * 14,3942))$$

$$D_{extAT} = 245,331334mm$$

Com o diâmetro da bobina de alta tensão calculado, pode-se encontrar a distância entre os centros da coluna do núcleo através da equação 28. Admitindo um espaçamento 15 mm entre as bobinas de alta tensão.

$$E_{c-c} = D_{extAT} + E_{AT-AT} \quad (28)$$

$$E_{c-c} = 245,331334 + 15$$

$$E_{c-c} = 260,331334 mm$$

3.5.8. Cálculo do comprimento do condutor

O comprimento do condutor para os três enrolamentos, pode ser calculado pela equação 29:

$$l_{condAT} = \frac{\left((D_{intAT} + 2 * E_{moldAT}) + \frac{(D_{extAT} - (D_{intAT} + 2 * E_{moldAT}))}{2} \right) * \pi * N_{AT} * n_{col}}{1000} \quad (294)$$
$$l_{condAT} = \frac{\left((192,086 + 2 * 2) + \frac{(245,331 - (192,086 + 2 * 2))}{2} \right) * \pi * 8291,977 * 3}{1000}$$
$$l_{condAT} = 17248,383 \text{ m}$$

3.5.9. Cálculo da resistência do condutor

Como visto anteriormente a resistividade (ρ) do alumínio a 75°C é 0,0354 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Portanto, a resistência do condutor de alta tensão é calculada da seguinte forma.

$$R_{AT} = \rho * \frac{L_{condAT}}{S_{condAT}} \quad (30)$$
$$R_{AT} = 0,019604 * \frac{17248,383}{0,2131287}$$
$$R_{AT} = 1586,509479\Omega$$

3.6. Cálculo das perdas no núcleo

Para o cálculo das perdas no núcleo deve-se ter em mãos os dados do ensaio do núcleo, normalmente os fabricantes disponibilizam esses dados, juntamente com as chapas. A figura 41 mostra uma curva de perdas magnéticas para um fluxo de 60Hz. Observa-se que para a indução 1,75 T, a perda magnética correspondente é 1,75 W/kg.

$$W_{mag} = 1,75 \text{ W/kg}$$

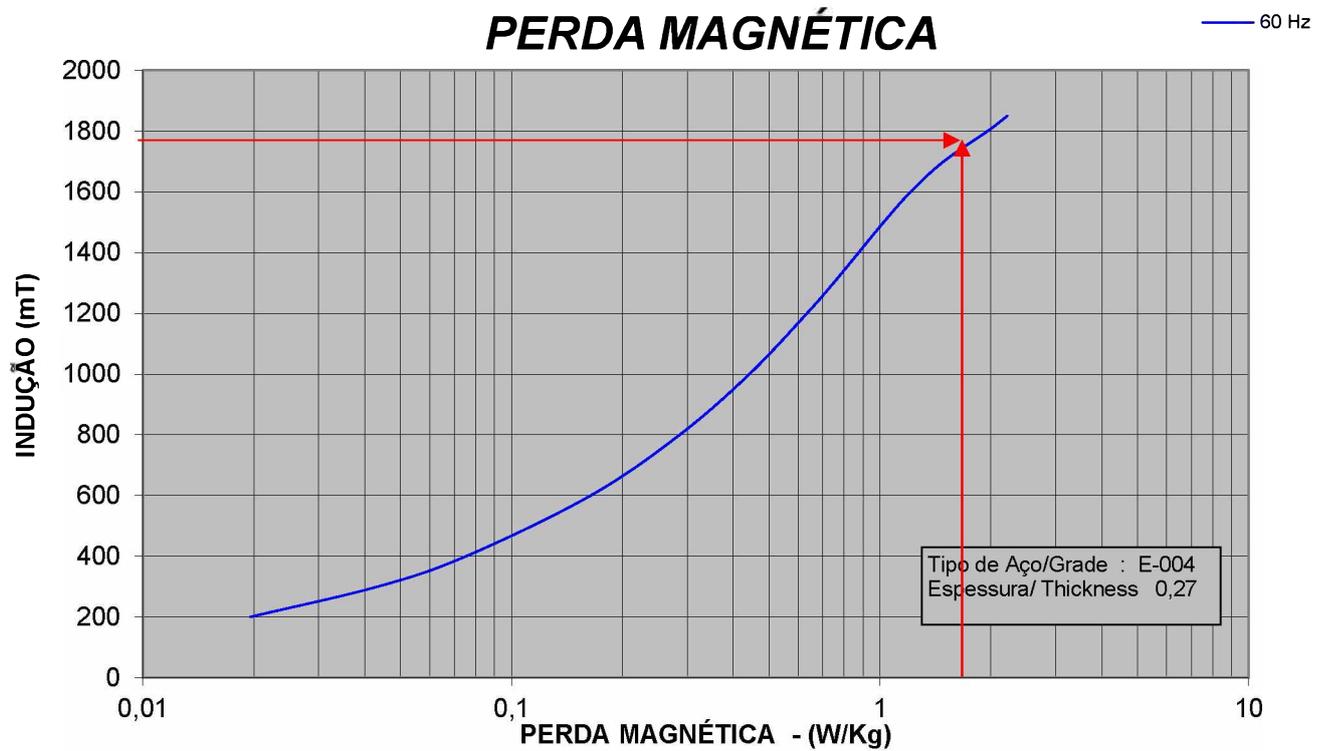


Figura 41- Curva de perda magnética.

A massa do núcleo pode ser calculada usando a equação 34, onde a densidade do material é $0,00765 \text{ kg/cm}^3$. (Transformar unidades de comprimento em cm)

$$M_{nuc} = \left((4 * E_{c-c} + 3 * (h_{jan} + L_{chapa})) * S_{nuc} \right) * d_{nuc} \quad (31)$$

$$M_{nuc} = \left((4 * 260,33 + 3 * (33,914 + 9,296)) * 105,32 \right) * 0,00765$$

$$M_{nuc} = 197,18 \text{ kg}$$

Através dos dados acima calculados, pode-se encontrar a perda no núcleo do transformador com auxílio da equação 35.

$$W_0 = W_{mag} * M_{nuc} \quad (32)$$

$$W_0 = 1,75 * 197,18$$

$$W_0 = 345,065 W$$

3.7. Cálculo da corrente de excitação

A figura 42 mostra a curva de potência de excitação do núcleo. Pode-se observar que para a indução de 1,75 T, a potência de excitação correspondente é 6,7 VA/kg.

$$P_{exc} = 6,7 VA/kg$$

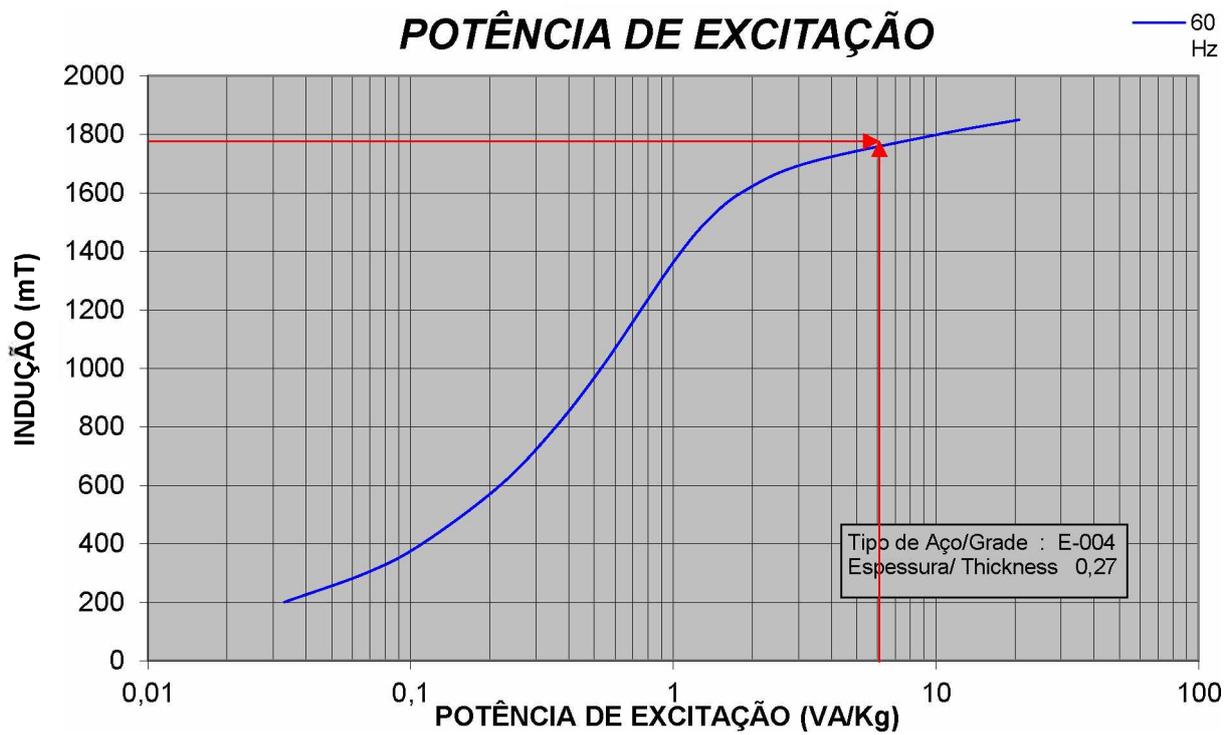


Figura 42 - Curva de potência de excitação do núcleo.

A corrente de excitação do núcleo pode ser calculada com auxílio da equação 33.

$$I_0 \% = 100 * \frac{P_{exc} * M_{nuc}}{P_n} \quad (33)$$

$$I_0\% = 100 * \frac{6,7 * 197,18}{75000}$$

$$I_0\% = 1,761474667 \%$$

3.8. Cálculo das perdas nos enrolamentos

A perdas no enrolamento são calculadas separadamente para cada enrolamento. Portanto, para o enrolamento de baixa tensão as perdas correspondem a:

$$W_{BT} = R_{BT} * I_{nBT}^2 \quad (34)$$

$$W_{BT} = 0,00812 * 295,27^2$$

$$W_{BT} = 523,528037 \text{ W}$$

Para o enrolamento de alta tensão as perdas correspondem a:

$$W_{AT} = R_{AT} * I_{fAT}^2 \quad (35)$$

$$W_{AT} = 1586,509479 * 0,724638^2$$

$$W_{AT} = 833,0757607 \text{ W}$$

3.9. Perdas totais do transformador

A perdas totais no transformador correspondem a simples soma das perdas no núcleo com as perdas nos enrolamentos, conforme a equação 36.

$$W_{tot} = W_0 + W_{AT} + W_{BT} \quad (36)$$

$$W_{tot} = 345,065 + 523,528 + 833,076$$

$$W_{tot} = 1701,668798W$$

3.10. Cálculo da impedância

Para calcular a impedância é preciso calcular a resistência percentual e a reatância percentual, conforme a equação 37.

$$Z\% = \sqrt{X\%^2 + R\%^2} \quad (37)$$

O primeiro passo é o cálculo da reatância, através da equação 38:
(A potência nominal é dada em MVA).

$$X\% = \frac{0,79 * (P_{nom}/3) * f * bx}{(V/esp)^2 * h_{bob}/sx} \quad (38)$$

Onde:

$$bx = E_{AT-BT} + \left(\frac{E_{AT} + E_{BT}}{3}\right) \quad (39)$$

$$bx = 15 + \left(\frac{53,245568 + 47,28}{3}\right)$$

$$bx = 48,508523$$

E:

$$sx = \frac{l_{medAT} + l_{medBT}}{2} \quad (405)$$

$$sx = \frac{538,952 + 421,513}{2}$$

$$sx = 480,2325$$

Logo:

$$X\% = \frac{0,79 * \left(\frac{0,075}{3} \right) * 60 * 48,5085}{(4,16)^2 * 329,137 / 480,2325}$$

$$X\% = 4,844944\%$$

O segundo passo é calcular a resistência percentual através da equação 41.

$$R\% = \frac{R_{eq} * \frac{I_{fAT}}{\sqrt{3}}}{V_1} \quad (41)$$

Onde:

$$R_{eq} = \frac{W_{AT} + W_{BT}}{3 * \left(\frac{I_{fAT}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (42)$$

$$R_{eq} = \frac{833,07 + 523,52}{3 * \left(\frac{1,255}{\sqrt{3}} \right)^2}$$

$$R_{eq} = 861,172091$$

Logo:

$$R\% = \frac{861,172091 * \frac{1,255}{\sqrt{3}}}{34500}$$

$$R\% = 0,018088\%$$

Finalizando o cálculo da impedância percentual tem-se:

$$Z\% = \sqrt{4,844944^2 + 0,018088^2}$$

$$Z\% = 4,844978\%$$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Os transformadores de tensão, chamados normalmente de transformadores (ou por “trafo” no meio industrial), são equipamentos elétricos bastante importantes para os sistemas de transmissão e distribuição de energia, são dispositivos de corrente alternada capazes de aumentar ou reduzir os valores de tensão e conseqüentemente os valores da corrente elétrica. O seu desenvolvimento é baseado nos princípios eletromagnéticos de Maxwell e Faraday, os quais buscam a eficiência e viabilidade do sistema elétrico. Devido essas circunstâncias, é essencial o conhecimento da teoria, dos princípios de funcionamentos, as características de fabricação e projeto do transformador para garantir o funcionamento, a eficiência e a confiabilidade de todo o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Contudo, esse trabalho teve como objetivo concluído, abordar e demonstrar alguns dos fundamentos básicos sobre a construção de transformadores tipicamente de distribuição, apresentando o memorial de cálculo de forma analítica e o detalhamento de todas as etapas do processo construtivo.

Perante todos os cálculos analíticos realizados, pode-se apontar que a metodologia é altamente eficaz, porém não é eficiente, a metodologia computacional torna o processo de projeto mais preciso e mais rápido devido aos números de interações necessários para se obter um resultado de projeto satisfatório.

5. REFERÊNCIAS.

- [1] HEATHCOTE, M. J. **The J&P Transformer book**. 20° edição. ed. [S.l.]: Newnes, 1998.
- [2] MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8° edição. ed. São Paulo: Globo, 1991
- [3] FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétrica**. 6° edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006
- [4] WEG ENERGIA (Emp.). **Características e Especificações de Transformadores de Distribuição e Força**. Blumenau: 2013. 339 p.
- [5] LUCCATECH (Emp.). **Cálculo de Transformadores – Noções Básicas**. Rio de Janeiro:2011. 85p.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5440**: Transformadores para redes aéreas de distribuição - Requisitos. 3 ed. São Paulo: Crb, 2014. 52 p.
- [7] RIES, W. **Transformadores - Fundamentos para projeto e cálculo**. 1° edição. ed. [S.l.]: EDIPUCRS, 2007
- [8] SALUSTIANO, Rogério. **Análise técnica de transformadores para redes de média tensão**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá [s.n], 2012.

