

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ABRAMO RIBEIRO MARCHESE

**TRANSFORMADOR MONOFÁSICO: COMPARATIVO DE MATERIAIS
PARA OS ENROLAMENTOS.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

ABRAMO RIBEIRO MARCHESE

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO: COMPARATIVO DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

PATO BRANCO

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Transformador monofásico: comparativo de materiais para os enrolamentos**”, do aluno “**Abramo Ribeiro Marchese**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **195** de 2018.

Fizeram parte da banca os professores:

Profa. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Prof. MSc José Paulo de Barros Neto

Profa. Maria de Lourdes Sant'Anna Dal Molin

Prof. Dr. Sergio Luiz Masutti

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

À Vera Lucia,
À Jeane
e para toda minha família.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, que me auxiliou muito na realização deste trabalho, que foi além de uma professora orientadora, atuou como guia da conclusão da minha graduação, sou grato a Profa. Dra. Filomena por ter me ensinado tanto.

À UTFPR e todos os professores que colaboraram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Em especial à minha mãe, a Jeane e a DeJane que me incentivaram muito durante a conclusão desta jornada.

À Patoeste que venderam os fios condutores para os enrolamentos, também por disponibilizar a bobinadeira profissional para confecção dos enrolamentos, especialmente ao Jean Vendrusculo e a todo apoio técnico deste profissional que atua no segmento de rebobinagem e manutenção de transformadores há mais de dez anos e contribuiu imensamente para este trabalho, somos gratos ao Jean.

À Agência Franqueada dos Correios do bairro Baixada em Pato Branco e sua equipe, que cedeu gentilmente suas balanças para pesagem dos elementos dos transformadores.

À equipe da Sala de Apoio do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR – Campus Pato Branco, ao Celio Degaraes que auxiliou na realização dos ensaios dos protótipos.

EPÍGRAFE

Quando pratico o bem, sinto-me bem; quando pratico o mal, sinto-me mal. Eis a minha religião. (LINCON, Abraham, 1863).

RESUMO

MARCHESE, Abramo Ribeiro. Transformador monofásico: comparativo de materiais para os enrolamentos. 2018. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

O custo das matérias primas cada vez torna-se mais oneroso visto a constante inflação e a desvalorização do real frente ao dólar. Torna-se importante rever custos de fabricação de equipamentos e por consequência os materiais utilizados nos transformadores, que têm presença em muitos equipamentos tanto em eletrônica quanto na distribuição e transmissão de energia elétrica. Analisando o emprego do alumínio em transformadores de baixa potência, avaliando os requisitos para que se use alumínio ao invés de cobre nos enrolamentos. O alumínio tem maior resistência e menor condutividade, assim é necessário realizar um estudo da viabilidade do emprego do alumínio em transformadores onde a indústria ainda produz com cobre os enrolamentos. O estudo tem que avaliar se o alumínio é capaz de substituir o cobre afim de que um transformador com enrolamentos de alumínio atenda os mesmos requisitos que o de cobre atende, também é preciso se avaliar as perdas, e se esta substituição surtirá impactos significativos nestas e no tamanho do núcleo. O presente trabalho tem objetivo de realizar um algoritmo para calcular transformadores, projetar e produzir protótipos de dois transformadores: um com enrolamentos de alumínio e outro com enrolamentos de cobre. Medidas serão realizadas para permitir comparação entre os protótipos, comparação com os dados de projeto e validação do algoritmo de cálculo de transformador.

Palavras-chave: Cobre. Alumínio. Transformadores. Elementos Magnéticos. Circuito Elétrico Equivalente.

ABSTRACT

MARCHESE, Abramo Ribeiro. Single-phase transformer: comparison of materials for windings. 2018. 77 f. Final Course Assignment / Monograph - Electrical Engineering Undergraduate Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2018.

The cost of electrical materials increasingly becomes more expensive because the inflation and the devaluation of the real against the dollar. It is important to review the costs of manufacturing equipment and the materials used in transformers, which are found in many equipment in both electronics and in the electric power distribution and transmission. Aluminum has higher electrical resistance and lower electrical conductivity, so it is necessary to study the feasibility of using aluminum windings in transformers where the industry still produces copper windings. The study verify if aluminum is capable of replacing copper in order that a transformer with aluminum windings meets the same requirements as transformer with copper windings. Will be verified if this replacement will have significant impacts on losses and in the core size. The present work aims to write an algorithm to calculate transformers, design and produce two transformers prototypes: with aluminum windings and the other with copper windings. Measurements will be made in order to provide a comparison between prototypes and between design data to validate the calculus.

Keywords: Copper. Aluminum. Transformers. Magnetic Elements. Equivalent Electrical Circuit

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ilustração transformador. | 11 |
| Figura 2 – Gráfico do preço do cobre e alumínio entre jan/2013 e dez/2017 [5]. | 12 |
| Figura 3 – Tipos de núcleos para transformadores monofásicos [7] Adaptado. | 18 |
| Figura 4 – Tipos de enrolamentos [7]. | 19 |
| Figura 5 – Transformador monofásico com núcleo ferromagnético. | 20 |
| Figura 6 – Circuito equivalente referido ao secundário [2]. | 21 |
| Figura 7 – Esquema elétrico do ensaio a vazio [2]. | 22 |
| Figura 8 – Esquema elétrico do ensaio de curto-circuito [2]. | 23 |
| Figura 9 – Modelo de lâminas do núcleo dos transformadores. | 25 |
| Figura 10 – (a) Lâminas EI; (b) transformador pretendido. | 32 |
| Figura 11 – Carretéis produzidos artesanalmente: (a) para transformador com enrolamentos de cobre; (b) para transformador com enrolamentos de alumínio. | 32 |
| Figura 12 – Passos da confecção do carretel parte I. | 34 |
| Figura 13 – Passos da confecção do carretel parte II. | 35 |
| Figura 14 – Bobinadeira. | 36 |
| Figura 15 – Bobinagem. | 37 |
| Figura 16 – Contagem e separação das lâminas do núcleo para o transformador com enrolamentos de cobre. | 38 |
| Figura 17 – Carretel com enrolamentos de cobre. | 39 |
| Figura 18 – Início do processo de disposição das lâminas do núcleo do transformador com enrolamentos de cobre. | 39 |
| Figura 19 – Todas as lâminas do núcleo dispostas para o transformador com enrolamentos de cobre. | 40 |
| Figura 20 – Transformador com enrolamentos de cobre concluído. | 40 |
| Figura 21 – Montagem do núcleo. | 41 |
| Figura 22 – Bobinagem. | 42 |
| Figura 23 – Ensaio de indução transformador com enrolamentos de cobre. | 44 |
| Figura 24 – Ensaio a vazio para o transformador com enrolamentos de cobre. | 45 |
| Figura 25 – Ensaio de curto-circuito no transformador com enrolamentos de cobre. | 46 |
| Figura 26 – Circuito equivalente transformador com enrolamentos de cobre. | 46 |
| Figura 27 – Ensaio a vazio no transformador com enrolamentos de alumínio. | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 – Ensaio de curto-circuito no transformador com enrolamentos de alumínio..... | 50 |
| Figura 29 – Circuito equivalente transformador com enrolamentos de alumínio..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedades físicas do cobre e do alumínio [6]. | 13 |
| Tabela 2 – Resultados do algoritmo de cálculo. | 31 |
| Tabela 3 – Ensaio de continuidade do transformador com enrolamentos de cobre. | 43 |
| Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência dos enrolamentos do transformador com enrolamentos de cobre. | 47 |
| Tabela 5 – Outros ensaios realizados. | 48 |
| Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência dos enrolamentos do transformador com enrolamentos de alumínio. | 51 |
| Tabela 7 – Peso das peças dos transformadores. | 52 |
| Tabela 8 – Valor total dos custos financeiros para confecção dos protótipos. | 52 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 1.2 | METODOLOGIA DO TRABALHO | 15 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 15 |
| 2 | TRANSFORMADOR | 17 |
| 2.1 | ASPECTOS CONSTRUTIVOS | 17 |
| 2.1.1 | Núcleo | 17 |
| 2.1.2 | Enrolamentos | 18 |
| 2.1.3 | Dados de Placa | 19 |
| 2.2 | FUNCIONAMENTO | 19 |
| 2.3 | CIRCUITO EQUIVALENTE | 21 |
| 2.4 | ENSAIO PARA TRANSFORMADORES | 22 |
| 2.4.1 | Ensaio a Vazio | 22 |
| 2.4.2 | Ensaio de Curto-Circuito | 23 |
| 2.5 | DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR | 25 |
| 2.6 | PERDAS..... | 27 |
| 2.6.1 | Perdas no Cobre | 27 |
| 2.6.2 | Regulação de Tensão | 28 |
| 2.6.3 | Perdas no Núcleo e Elevação de Temperatura..... | 28 |
| 2.7 | JANELA DO NÚCLEO E MATERIAL À SER ADQUIRIDO | 29 |
| 2.7.1 | Utilização da Janela do Núcleo | 29 |
| 2.7.2 | Quantidade de Lâminas e Comprimento dos Condutores..... | 30 |
| 2.8 | ALGORÍTMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR..... | 30 |
| 2.8.1 | Transformador com Enrolamentos de Cobre | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8.2 Transformador com Enrolamentos de Alumínio | 31 |
| 3 MONTAGEM | 32 |
| 3.1 CARRETEL | 33 |
| 3.2 ENROLAMENTOS | 36 |
| 3.3 NÚCLEO | 38 |
| 3.4 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE ALUMÍNIO | 41 |
| 4 RESULTADOS APRESENTADOS | 43 |
| 4.1 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE COBRE | 43 |
| 4.1.1 Ensaio de Continuidade | 43 |
| 4.1.2 Ensaio de Indução..... | 44 |
| 4.1.3 Ensaio a Vazio | 44 |
| 4.1.4 Ensaio de Curto-Circuito | 45 |
| 4.1.5 Ensaio da Resistência dos Enrolamentos | 47 |
| 4.1.6 Teste de Aquecimento..... | 47 |
| 4.1.7 Outros Testes..... | 47 |
| 4.2 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE ALUMÍNIO..... | 49 |
| 4.2.1 Ensaio de Continuidade | 49 |
| 4.2.2 Ensaio de Indução..... | 49 |
| 4.2.3 Ensaio a Vazio | 49 |
| 4.2.4 Ensaio de Curto-Circuito | 50 |
| 4.2.5 Ensaio da Resistência dos Enrolamentos | 51 |
| 4.2.6 Outros Testes..... | 51 |
| 4.3 PESO DOS TRANSFORMADORES..... | 52 |
| 4.4 CUSTOS FINANCEIROS | 52 |
| 4.5 COMPARATIVO DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS..... | 53 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 54 |
| REFERÊNCIAS..... | 56 |

| | |
|--|-----------|
| APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADORES..... | 58 |
| ANEXO A – TABELA DE FIOS AWG COBRE..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores têm papel importante em sistemas de transmissão de energia elétrica. Uma das dificuldades encontradas por Thomas Edson na transmissão da energia elétrica foi a perda de tensão ao longo da linha de transmissão, por estar transmitindo energia em baixos níveis de tensão com alta corrente elétrica, assim as unidades geradoras necessitavam estar muito próximas às unidades consumidoras. Sabe-se que as perdas ôhmicas têm relação quadrática à corrente elétrica, desta forma reduzindo em mil vezes a corrente elétrica se reduz em um milhão de vezes as perdas ôhmicas ao longo da linha de transmissão. Com os transformadores de tensão é possível elevar a tensão elétrica reduzindo a corrente elétrica, desta forma minimizando as perdas ôhmicas ao longo das linhas de transmissão de energia elétrica.

Transformadores também são utilizados em circuitos de baixa potência para eletrônica, em operações como casamento de impedâncias para máxima transferência de potência, isolar circuitos eletricamente e isolar circuitos CC de circuitos CA [1].

Em outras palavras a finalidade de um transformador basicamente é elevar ou rebaixar níveis de tensão de uma potência elétrica em corrente alternada mantendo a frequência de oscilação [2].

Um transformador é uma máquina elétrica com dois ou mais enrolamentos acoplados por um fluxo magnético comum, fluxo este que flui através de um núcleo. Para o núcleo comumente utiliza-se um material ferromagnético que serve de caminho para o fluxo. Existe enlace entre os enrolamentos que servem de caminho para a corrente elétrica: ao aplicar uma tensão de corrente alternada no enrolamento primário ou de entrada flui uma corrente primária que gera um campo magnético nas proximidades do enrolamento. O material ferromagnético do núcleo amplifica as linhas de campo magnético produzindo uma indução magnética. As linhas de campo magnético atravessam a seção transversal do núcleo produzindo um fluxo magnético. Como este fluxo magnético varia no tempo então surge uma tensão induzida no enrolamento secundário ou de saída. A Figura 1 ilustra um transformador. As características construtivas deste transformador irão definir a transformação que a entrada apresentará na saída, mais especificamente o nível de

tensão será alterado pela relação de espiras entre os enrolamentos primário e secundário.

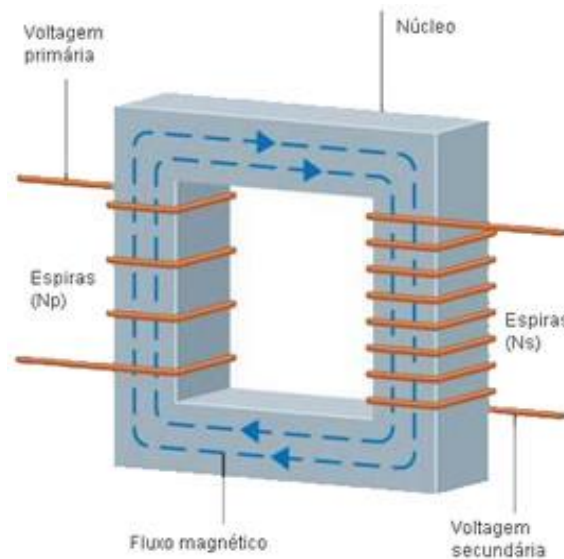


Figura 1 – Ilustração transformador.

Os enrolamentos dos transformadores têm grande importância uma vez que estão intimamente ligados à sua vida útil e seu desempenho em operação. Estes enrolamentos podem ser helicoidais, em camadas ou em discos, com diferentes disposições, podendo ser concêntricos ou intercalados. Também podem ser usados diferentes materiais para o enrolamento, comumente se utiliza cobre ou alumínio, sendo predominante a escolha do cobre devido suas características de condutividade e resistividade. O cobre apresenta menor resistividade, maior resistência à ruptura e melhor condução de calor, quando comparado ao alumínio [3].

A opção do material a ser utilizado nos enrolamentos exige análise de diversos fatores, sendo necessário o projetista saber onde será empregado aquele transformador. As condições de operação influenciam na necessidade de características mínimas para o transformador. Também é preciso o projetista saber como cada material se comporta frente a ensaios e a vida útil do transformador. A escolha do material não pode visar somente o benefício financeiro de um material mais barato que outro, mas se com aquele material escolhido o transformador vai atender às necessidades de operação em que este será empregado [4].

Todavia na conjuntura econômica atual o cobre vem sofrendo elevação de preço ao longo do tempo. Nos últimos 12 meses (abril/2017 a mar/2018) a

cotação do cobre sofreu 19% de aumento enquanto o alumínio 5% em cotação na LME [5].

O cobre e o alumínio são *commodities* sofrendo, portanto, variações diárias de preço. Estes materiais são negociados em bolsa de valores e seus preços variam conforme livre oferta e demanda de mercado. Como às reservas mundiais de cobre são menores que as de alumínio, e o consumo de cobre proporcionalmente as suas reservas ser maior que de alumínio, as de cobre devem se esgotar em um prazo menor que as de alumínio. Levando-se em consideração que o preço é ditado pela oferta e procura, a tendência é que o cobre sofra elevação de preço mais rapidamente que o alumínio [4].

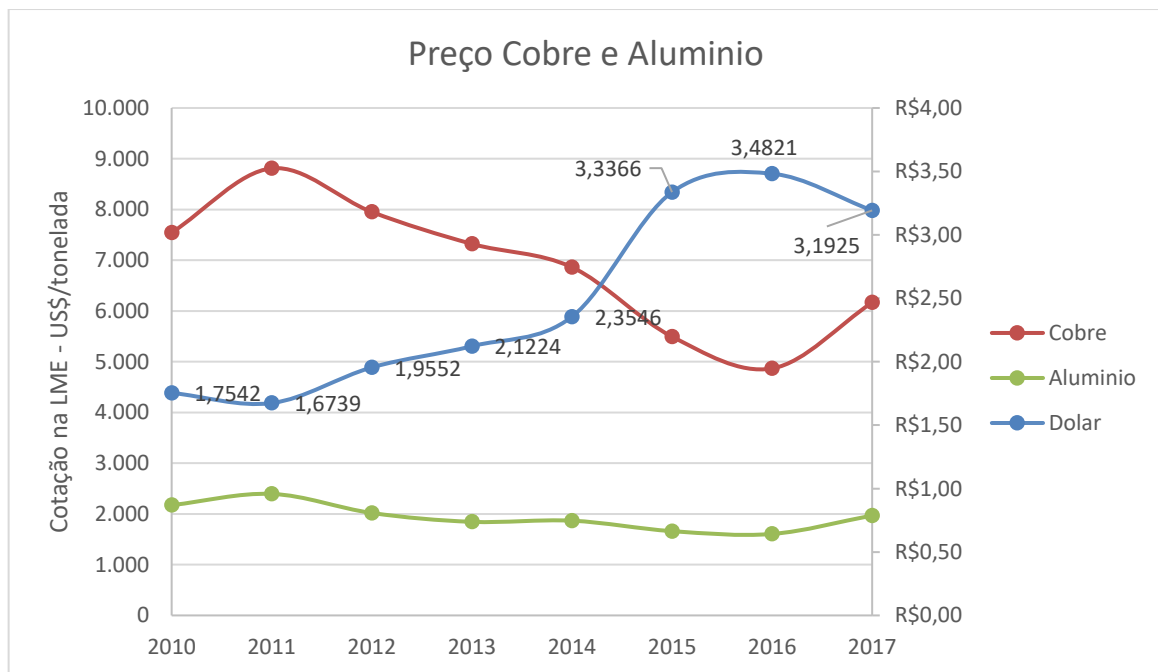


Figura 2 – Gráfico do preço do cobre e alumínio entre jan/2013 e dez/2017 [5].

A Figura 2 ilustra uma crescente alta no valor do cobre ao longo dos anos. Avaliando os períodos entre jan/2013 e dez/2017, no período que se teve uma queda no valor da cotação do cobre, ocorreu alta no dólar, tornando a baixa do cobre insignificante para o mercado brasileiro. Devido a esta crescente alta do valor do cobre fica evidente a necessidade de se reavaliar o uso desta matéria prima, levando também em consideração a elevação do preço da energia elétrica ao longo do tempo. Desta forma não é possível sacrificar eficiência pela redução do custo de aquisição de equipamentos.

Existem estratégias de redução do uso do cobre, formulando topologias que exijam menos cobre na construção dos equipamentos, visto que uma parcela

significativa do cobre em um enrolamento de alta frequência carrega pouca ou nenhuma corrente. A redução do uso de cobre pode reduzir as perdas de proximidade, desta forma reduzindo as perdas globais [6]. O efeito de proximidade é causado por correntes parasitas induzidas em um fio devido ao campo magnético alternado de outros condutores nas proximidades.

Uma solução para reduzir o uso do cobre é reduzir a área de enrolamento de cobre e utilizar um núcleo maior, deixando a janela de enrolamento em grande parte vazia. Entretanto isso gera um desperdício uma vez que a janela do núcleo pode ser reduzida para encaixar os enrolamentos, economizando no custo do núcleo e reduzindo as perdas no núcleo. Todavia esta pode ser uma abordagem estratégica em situações onde o projeto de um núcleo personalizado não seja viável financeiramente [6].

Outra solução seria substituir o cobre pelo alumínio, o qual representa um custo de aquisição menos significativo frente ao cobre conforme ilustrado na Figura 2. Nesta figura é possível observar o preço do alumínio lateralizado ao longo do tempo, entretanto com a alta do dólar para o mercado brasileiro aumenta o custo de aquisição do alumínio.

Estudos realizados concluem que é necessário utilizar um condutor de alumínio 66% maior que o de cobre para manter o mesmo valor de resistência e para o mesmo comportamento frente ao curto-circuito 80% maior [4].

Tabela 1 – Propriedades físicas do cobre e do alumínio [6].

| | Cobre | Alumínio | Unidade |
|--|-------|----------|----------------------|
| Resistividade, pura | 1,67 | 2,65 | $\mu\Omega\text{cm}$ |
| Resistividade, grau do condutor | 1,72 | 2,83 | $\mu\Omega\text{cm}$ |
| Coefficiente de temperatura de resistividade | 4027 | 4308 | Ppm/K |
| Densidade | 8920 | 2700 | Kg/m^3 |

A Tabela 1 elenca características do cobre e do alumínio a fim de comparar os materiais. Percebe-se que o cobre é mais pesado que o alumínio, sugerindo que o custo de aquisição do alumínio por volume é cerca de 11% do custo do cobre [6].

Embora o alumínio tenha maior resistividade que o cobre, cerca de 64% maior, não significa em elevação de perdas, mas também com maior resistividade temos uma redução nas perdas por correntes parasitas (conforme a magnitude dessas correntes parasitas). O alumínio é significativamente mais barato que o

cobre, com esta economia é possível realizar outras melhorias que podem tornar insignificante esta elevação na resistividade do fio: como o aumento do núcleo, e uma topologia de enrolamento que minimize perdas. Desta forma, otimizando o projeto e podendo ser mais barato o custo total da confecção do transformador [6].

O cobre utilizado em transformadores é cobre eletrolítico com elevado grau de pureza, sendo superior a 99,9%. Impurezas adicionadas ao material podem reduzir sua capacidade de condução de corrente elétrica. O alumínio tende a ser mais sensível a essas impurezas. 0,5% de impurezas no alumínio podem causar a redução de mais de 10% de sua capacidade de conduzir correntes elétricas, assim sendo, os condutores de alumínio necessitam alto grau de pureza. Portanto não é aconselhável a utilização de materiais oriundos de reciclagem, pois nos processos de reciclagem o controle necessita ser muito rigoroso para que não haja impurezas no condutor e estes processos geralmente adicionam impurezas ao material, afetando suas características [4].

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo comparativo de materiais para os enrolamentos de um transformador monofásico.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral serão necessários:

1. Estudar as diferenças entre enrolamentos de cobre e de alumínio;
2. Escrever um algoritmo para projetar um transformador monofásico, enrolamentos de cobre com as especificações: 127/220 V; corrente secundária de 3,4 A; 60 Hz;
3. Montar o transformador com enrolamentos de cobre;

4. Calcular e montar o transformador com enrolamentos de alumínio com as mesmas especificações do anterior, levando em consideração a diferença de resistividade do alumínio e cobre;
5. Realizar o cálculo de um transformador de alumínio levando em consideração o curto circuito;
6. Efetuar ensaios e medições nos dois transformadores;
7. Efetuar um comparativo dos dois transformadores.

1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Com base na pesquisa bibliográfica é possível desenvolver um transformador monofásico com as seguintes especificações: 127/220 V; corrente secundária de 3,4 A; 60 Hz, enrolamentos de cobre. Com as mesmas especificações será desenvolvido um transformador com enrolamentos de alumínio para possibilitar uma análise comparativa apropriada.

Inicialmente será elaborado um algoritmo de cálculo de transformador e montado um transformador com enrolamentos de cobre, posteriormente será ensaiado este transformador, a fim de obter medidas elétricas. Na sequência será calculado um transformador com enrolamentos de alumínio, levando em conta as características do alumínio, modelando este de tal forma que tenha especificações idênticas ao transformador com enrolamentos de cobre (127/220V; corrente secundária de 3,4 A; 60 Hz). Em seguida será montado um transformador com enrolamentos de alumínio e, por fim, será ensaiado o transformador com enrolamentos de alumínio e comparados os resultados obtidos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será organizado da seguinte forma:

Capítulo I – Introdução: Breve explicação e também um panorama a cerca do tema, a fim de situar o trabalho.

Capítulo II – Transformador: Onde será exposto sobre transformadores de uma forma genérica, seu funcionamento, peças, circuito equivalente, cálculo das perdas e dimensionamento de um transformador com lâminas EI.

Capítulo III – Montagem: Apresentação dos métodos desenvolvidos para montagem dos dois transformadores.

Capítulo IV – Resultados apresentados: Neste serão apresentados os resultados obtidos e discutidos os mesmos.

Capítulo V – Conclusão: Avaliação se o trabalho atingiu seus objetivos e as dificuldades encontradas para sua realização.

2 TRANSFORMADOR

O transformador se trata de uma máquina elétrica estática, destinada a funcionar com corrente alternada, possui dois ou mais enrolamentos. Quando apresentam dois enrolamentos (primário e secundário), estes permitem transformar magnitudes de tensão (elevar ou rebaixar). Na sequência serão apresentados os aspectos construtivos, peças que o compõem, seu funcionamento, circuito elétrico equivalente, dimensionamento de um transformador com núcleo de lâminas EI e cálculo das perdas deste tipo de máquina.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Basicamente os transformadores são constituídos por dois ou mais enrolamentos, estes são envolvidos por um núcleo de material ferromagnético para uma menor dispersão do fluxo magnético conforme já explicitado no capítulo anterior.

2.1.1 Núcleo

O núcleo do transformador é definido pelo sistema que forma seu circuito magnético, comumente constituído por chapas de aço ao silício. Estas chapas quando sofrem um tratamento químico, aplicando sobre elas uma camada isolante muito fina (0,01mm), reduz consideravelmente as perdas no ferro. O circuito magnético é composto por colunas onde se montam os enrolamentos e as vigas que unem as colunas. Os espaços vazios por onde passam os enrolamentos são chamados de janelas do núcleo [7].

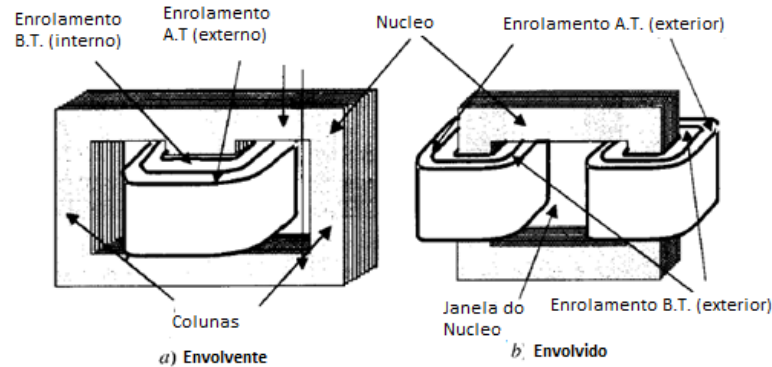


Figura 3 – Tipos de núcleos para transformadores monofásicos [7] Adaptado.

Conforme a posição relativa entre o núcleo e os enrolamentos, os núcleos dos transformadores se classificam como envolvidos ou envolventes. Na Figura 3 são ilustrados os dois tipos, sendo (a) envolvente, onde este tem sua maior parte envolvida pelo núcleo e (b) envolvido, onde os enrolamentos envolvem quase por completo as colunas do núcleo.

No transformador de núcleo envolvido, a construção é mais simples e se adapta melhor as altas tensões pelo fato da superfície isolada ser menor, por isso é o mais utilizado, salvo os transformadores monofásicos de baixa tensão [7].

2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos constituem o circuito elétrico do transformador, são formados por condutores elétricos comumente de cobre, também podem ser de alumínio (menos comum). Os condutores cilíndricos apresentam diâmetro de até 4 mm e secção transversal retangular para maiores. Estes condutores são isolados: para secção circular é utilizado um verniz isolante e para secção retangular papel isolante.

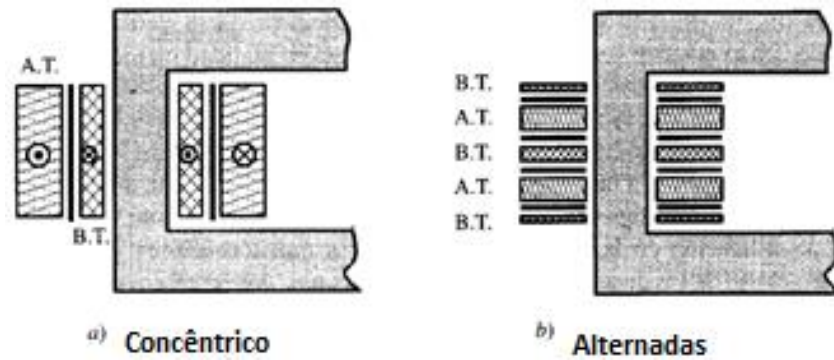


Figura 4 – Tipos de enrolamentos [7].

Os enrolamentos podem ser classificados em concêntricos e alternados como ilustrado na Figura 4, sendo que os (a) concêntricos formam um tubo coaxial e apresentam uma única camada de enrolamento, já os (b) alternados são formados por mais de uma camada [7].

2.1.3 Dados de Placa

A placa disposta na parte externa do transformador é uma chapa metálica que inclui dados como: potência aparente, tensão, frequência, fator de potência e impedância percentual. Todos estes dados são grandezas nominais da máquina, também são apresentados os esquemas e formas de ligação.

2.2 FUNCIONAMENTO

Considerando um transformador monofásico de núcleo ferromagnético com permeabilidade finita, apresenta perdas no ferro, com enrolamentos primário e secundário com N_1 e N_2 número de espiras respectivamente. Supondo que o transformador é alimentado no enrolamento de tensão mais elevada e outro enrolamento possui a tensão rebaixada, neste caso é dito transformador redutor. O transformador opera pelo princípio da indução mútua entre as bobinas do primário e secundário, desta forma elas são acopladas magneticamente, ou seja, os circuitos do primário e secundário não estão ligados fisicamente. A transferência de energia é

dependente do grau de acoplamento magnético (representado pelo coeficiente de acoplamento magnético K) entre o circuito do primário e secundário. Sendo um acoplamento fraco, núcleo de ar com baixa permeabilidade magnética, o circuito estará *frouxamente acoplado* e para o caso de um núcleo ferromagnético com alta permeabilidade magnética o circuito estará *fortemente acoplado* tendo uma transferência de energia quase completa [7], [8].

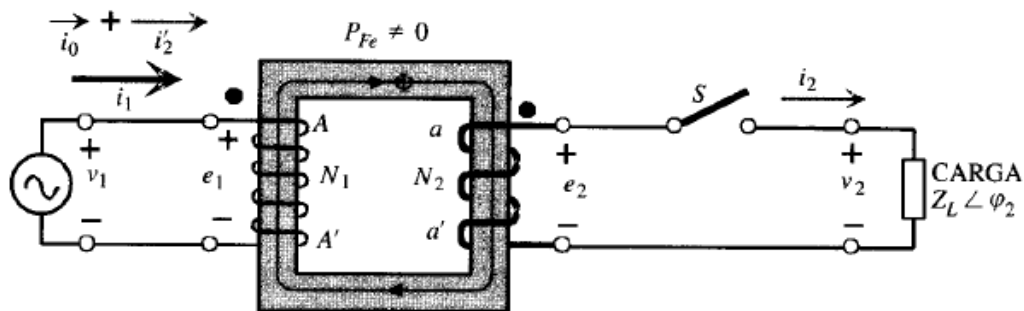


Figura 5 – Transformador monofásico com núcleo ferromagnético.

Na Figura 5 é representado o transformador elencado no parágrafo anterior. Também se pode notar um ponto na entrada de corrente e um ponto na saída de corrente induzida, esta é a regra do ponto para ilustrar onde entra a corrente e onde ela sai para que aqueles que não projetaram o transformador saibam o sentido da corrente no transformador e esta informação pode vir nos dados de placa (ver item 2.1.3).

Quando se aplica uma tensão no enrolamento primário com corrente alternada, produzindo um fluxo magnético variante no tempo que circulará no núcleo, o sentido da corrente elétrica induzida será determinado pela lei de Ampère. Devido à variação do fluxo magnético serão produzidas f.e.m.s. nos enrolamentos, e pela lei de Faraday tem-se [7]:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Sintetizando, podemos ver que o transformador tem como funcionamento generalizado de forma ideal, rebaixar ou elevar níveis de tensão conforme:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2)$$

Desta forma a é a relação de transformação do transformador.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE

O circuito equivalente pode ser elencado de diversas formas e simplificações. Neste trabalho será abordado o mais completo referido ao secundário a fim de se ter um modelo mais próximo do equipamento real, este modelo leva em consideração os efeitos da resistência dos enrolamentos, os fluxos dispersos, perdas no ferro e as correntes finitas de excitação. Neste circuito equivalente tem-se as seguintes componentes: resistência do enrolamento primário R_1 ; reatância de dispersão do enrolamento primário X_1 ; resistência do enrolamento secundário R_2 ; reatância de dispersão do enrolamento secundário X_2 ; resistência de perdas no núcleo R_c ; reatância de magnetização X_m . Destas temos que as resistências (R_1 e R_2) são intimamente ligadas com as perdas por ôhmicas nos enrolamentos e a resistência R_c vinculada as perdas no ferro. Para obtenção das constantes do circuito equivalente de um transformador se faz necessário a realização de dois ensaios: *ensaio a vazio* e *ensaio de curto-circuito*. Para obtermos as impedâncias do circuito equivalente, conforme ilustradas na Figura 6, no item 2.4 será visto como realizar estes ensaios [1], [2], [7] e [8].

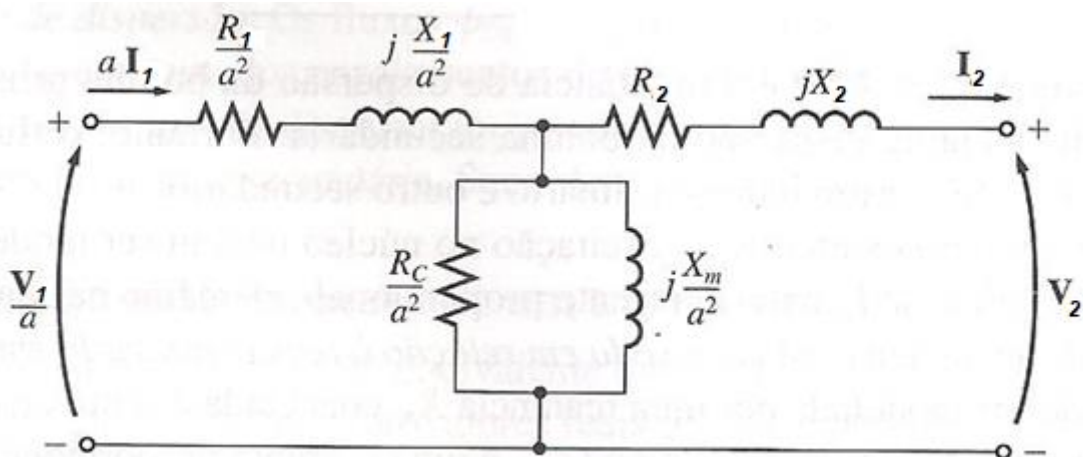


Figura 6 – Circuito equivalente referido ao secundário [2].

2.4 ENSAIO PARA TRANSFORMADORES

2.4.1 Ensaio a Vazio

Para o *ensaio a vazio* são necessários: um wattímetro, um amperímetro, um voltímetro, um *varivolt*, cabos para conexões, e o transformador a ser ensaiado. Neste ensaio, alimenta-se o primário do transformador com tensão nominal. Utilizando o *varivolt* para alimentar o primário vai se elevando a tensão aos poucos, a fim de não se produzir uma rápida variação de tensão, até chegar à tensão nominal do enrolamento que está sendo alimentado. Já o enrolamento secundário permanece em aberto e sem carga. No primário é posto o wattímetro, o amperímetro e o voltímetro, para as leituras de potência (perdas no ferro), corrente elétrica e tensão elétrica respectivamente (P_{VZ} , I_{VZ} , V_{VZ}). A Figura 7 ilustra como é feita a ligação dos equipamentos [1], [2] e [8].

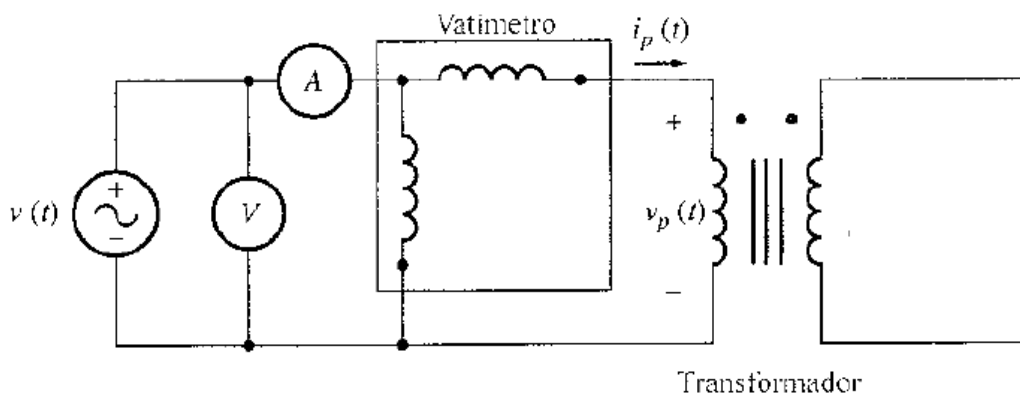


Figura 7 – Esquema elétrico do ensaio a vazio [2].

Neste ensaio, a corrente elétrica nos elementos em série do circuito equivalente será muito pequena quando comparado a corrente elétrica do ramo de excitação, causando queda de tensão quase insignificante. Desta forma neste ensaio toda queda de tensão no transformador pode ser atribuída ao ramo de excitação. Com este ensaio é possível determinar o fator de potência (FP) durante o ensaio, tanto como a magnitude e o ângulo da admitância (Y_E) do ramo de excitação.

$$FP = \frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}} \quad (3)$$

$$Y_E = \frac{I_{VZ}}{V_{VZ}} \angle -\cos^{-1}\left(\frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}}\right) \quad (4)$$

$$Y_E = \frac{1}{R_C} + j\frac{1}{X_M} \quad (5)$$

$$Y_1 = \frac{I_{VZ}}{V_{VZ}} \quad g_1 = \frac{P_{VZ}}{V_{VZ}^2} \quad b_1 = \sqrt{Y_1^2 - g_1^2} \quad (6)$$

Onde: $g_1 = 1/r_1$ é a condutância de perdas e $b_1 = 1/X_M$ é a susceptância de magnetização.

$$Y_2 = a^2 Y_E \quad (7)$$

Onde Y_2 é a admitância Y_E referida ao secundário.

2.4.2 Ensaio de Curto-Circuito

Para o *ensaio de curto-circuito* se faz necessário os mesmos materiais do *ensaio de circuito aberto*. Neste ensaio alimenta-se o enrolamento de alta tensão e curto circuita-se o enrolamento de baixa tensão, se eleva a tensão aos poucos com uso do *varivolt* até atingir a corrente nominal do enrolamento secundário (que está sendo alimentado). Realiza-se a leitura da potência no wattímetro (perdas nos enrolamentos), corrente elétrica no amperímetro e tensão elétrica no voltímetro, respectivamente se denominam: P_{CC} , I_{CC} e V_{CC} . A Figura 8 ilustra o esquema de ligação dos equipamentos para este ensaio [1], [2] e [8].

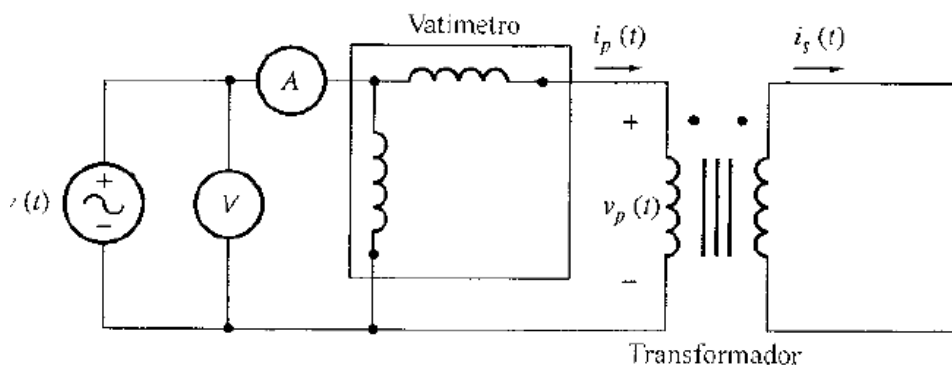


Figura 8 – Esquema elétrico do ensaio de curto-circuito [2].

No *ensaio de curto-circuito* se terá uma tensão pequena de entrada, desta forma uma corrente desprezível circula no ramo de excitação podendo assim

despreza-la. Toda queda de tensão do transformador pode ser atribuída aos elementos, que são representados na impedância em série do circuito equivalente (Z_{SE} engloba: R_p , X_p , R_s e X_s) visto no item 2.3 (p.21). Com este ensaio é possível determinar a impedância total (Z_{SE}) em série referida ao lado de alta tensão, quando alimentado o lado de alta tensão [2].

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} \left(\frac{P_{CC}}{V_{CC} * I_{CC}} \right) \quad (8)$$

$$Z_{SE} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (9)$$

$$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}; R_{eq} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (10)$$

É importante observar que o *ensaio a vazio* comumente é alimentado o enrolamento de baixa tensão, e o *ensaio de curto-circuito* é alimentado o enrolamento de alta tensão, desta forma em um ensaio temos valores de impedância referidos ao lado de baixa tensão e no outro ensaio, referidos ao lado de alta tensão, respectivamente. Para obter-se o circuito equivalente se faz necessário referir os valores ao lado de alta ou de baixa tensão. Opta-se por referir o circuito equivalente ao lado de alta tensão (secundário, no caso de um transformador elevador), conforme explicitado no item 2.3 (p.21), desta maneira será possível determinar o circuito equivalente conforme ilustrado na Figura 6 (p.21).

Onde: Z_{eq2} é a impedância em serie referenciada ao secundário.

$$Z_{eq2} = Z_{SE,S} = R_{eq2} + jX_{eq2} \quad (11)$$

A resistência do enrolamento primário é representada por R_1 , do secundário por R_2 .

$$R_1 = a^2 R_2 \quad (12)$$

E, R_{eq2} é a resistência equivalente referenciada ao secundário.

$$R_{eq2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2 = R_2 + R_2 \quad (13)$$

A reatância de dispersão do enrolamento primário representada por X_1 e do secundário X_2 .

$$X_2 = \frac{X_1}{a^2} \quad (14)$$

E, X_{eq2} é a reatância de dispersão equivalente referenciada ao secundário.

$$X_{eq2} = \frac{X_1}{a^2} + X_2 = X_2 + X_2 \quad (15)$$

$$X_1 = a^2 X_2 \quad (16)$$

2.5 DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADOR

Neste item serão elencadas formas de calcular condutores cilíndricos e núcleo de um transformador com lâminas EI.

Supondo um transformador com dois enrolamentos isolados e que a janela seja dividida proporcionalmente a energia que transportam os enrolamentos.

A regulação de tensão percentual é dada por:

$$\alpha = \frac{P_t}{2 * K_g * K_e} [\%] \quad (17)$$

A equação (19) é utilizada para calcular a constante da geometria do núcleo K_g para um dado valor de regulação de tensão. K_e é a constante das condições elétricas e magnéticas dada por:

$$K_e = 0,145 * K_f^2 * Freq^2 * B_m^2 * 10^{-4} \quad (18)$$

Onde K_f é a constante da forma de onda cujo valor é 4,44 para onda senoidal, $Freq$ é a frequência de operação do transformador em Hertz, B_m é a indução máxima do transformador em Tesla.

Com (17) e (18) é possível inferir:

$$K_g = \frac{P_t}{2 * K_e * \alpha * 100} [\text{cm}^5] \quad (19)$$

Para calcular os enrolamentos é necessário ter o núcleo definido.

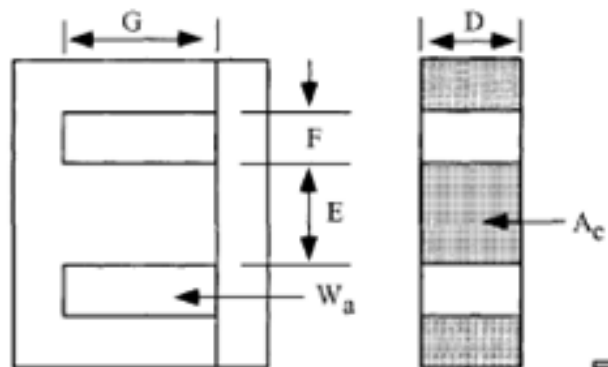


Figura 9 – Modelo de lâminas do núcleo dos transformadores [9].

Com a Figura 9 é possível identificar que G é a altura da janela do núcleo em cm, F a largura da janela do núcleo em cm, W_a a área da janela do núcleo em cm^2 , E a largura da perna central do núcleo, D a profundidade, ou seja, a altura das laminas empilhadas em cm, e A_c a área do núcleo de material ferromagnético em cm^2 .

Também se tem: MLT comprimento médio das espiras em cm, W_{tfe} peso do núcleo em gramas, A_p produto das áreas W_a e A_c em cm^4 , A_t área total das superfícies cm^2 (área requerida para dissipação de calor).

$$W_a = F * G [cm^2] \quad (20)$$

$$A_c = D * E [cm^2] \quad (21)$$

$$A_p = A_c * W_a [cm^4] \quad (22)$$

$$MLT = 2 * (D + 2 * 0,05) + 2 * (E + 2 * 0,05) + \Pi * F [cm] \quad (23)$$

$$K_{gnovo} = \left(\frac{A_p}{8,3} \right)^{10/8} \quad (24)$$

$$A_t = 41,3 * A_p^{0,5} [cm^2] \quad (25)$$

$$W_{tfe} = 68,2 * A_p^{0,75} [g] \quad (26)$$

Para se determinar o número de espiras do primário, deve-se equacionar conforme abaixo:

$$N_p = \frac{V_{in} * 10^4}{K_f * B_m * Freq * A_c} [voltas] \quad (27)$$

E para o secundário:

$$N_s = \left(N_p * \frac{V_s}{V_{in}} \right) * (1 + \alpha) [voltas] \quad (28)$$

A densidade de corrente é determinada por:

$$J = \frac{P_t * 10^4}{K_f * K_u * B_m * Freq * A_p} [A/cm^2] \quad (29)$$

Onde: K_u é o fator de utilização da janela.

Para a corrente de entrada ou do primário tem-se, onde $Rend$ é o rendimento e P_o a potência de saída da máquina:

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in} * Rend} [A] \quad (30)$$

Para determinar a bitola do fio condutor para o primário utilizar a seguinte equação:

$$A_{wpb} = \frac{I_{in}}{J} [cm^2] \quad (31)$$

E para o secundário:

$$A_{wsb} = \frac{I_o}{J} [cm^2] \quad (32)$$

2.6 PERDAS

2.6.1 Perdas no Cobre

Dado um fio condutor cilíndrico pode-se equacionar sua resistência conforme abaixo, onde ρ é a resistividade elétrica do material condutor (Ωm), L comprimento do condutor (m) e A é a área da seção transversal (m^2)

$$R = \frac{\rho * L}{A} [\Omega] \quad (33)$$

As perdas ôhmicas são calculadas para o enrolamento primário e para o enrolamento secundário separadamente tal como segue abaixo. A partir da resistência por centímetro ($\mu\Omega/cm$) obtida com o fabricante do condutor ou em referências bibliográficas, é possível calcular a resistência do condutor e equacionar as perdas tendo em vista a corrente nominal do primário e do secundário.

Onde R_p é a resistência do enrolamento primário:

$$R_p = MLT * N_p * (\mu\Omega p/cm) [\Omega] \quad (34)$$

E R_s é a resistência do enrolamento secundário:

$$R_s = MLT * N_s * (\mu\Omega s/cm) [\Omega] \quad (35)$$

Assim as perdas ôhmicas no enrolamento primário são dadas por:

$$P_p = I_{in}^2 * R_p [Watts] \quad (36)$$

E as perdas ôhmicas do enrolamento secundário são dadas por:

$$P_s = I_o^2 * R_s [Watts] \quad (37)$$

Para totalizar as perdas ôhmicas somam-se as perdas do enrolamento primário com aquelas do enrolamento secundário:

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad (38)$$

P_{cu} são as perdas ôhmicas totais englobando o enrolamento primário e o enrolamento secundário.

2.6.2 Regulação de Tensão

Para uma dada regulação de tensão (α) calcula-se a constante da geometria do núcleo K_g . Para o núcleo do transformador é utilizada uma lâmina EI que apresenta uma constante de geometria do núcleo maior ou superior a K_g calculado. Como essa constante pode ser atualizada, então é necessário verificar se a regulação de tensão calculada está de acordo com o valor inicialmente pretendido:

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} [\%] \quad (39)$$

2.6.3 Perdas no Núcleo e Elevação de Temperatura

As perdas magnéticas [11]-[15] são amplamente estudadas para se obter um modelo matemático que as represente adequadamente. As perdas no ferro em W/Kg são dadas por:

$$W/Kg = (K) * (Freq^M) * (B_m^N) \quad (40)$$

As constantes das perdas (k, m, n) dependem da espessura da lâmina, do material que constitui a lâmina e da frequência. Para nosso caso $k = 0,004$; $m = 1,3$; $n = 1,7$.

Para terem-se as perdas no ferro equaciona-se:

$$P_{fe} = W/Kg * WTFE * 10^{-3} \quad (41)$$

A equação (41) relaciona as perdas relativas ao peso e multiplica esta pelo peso do ferro do transformador.

P_{soma} é o somatório das perdas no cobre e no ferro, sendo no cobre somadas as perdas dos enrolamentos primário e secundário.

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe} [watt] \quad (42)$$

Tem-se que A_t é a área requerida para dissipação de calor. A perda por unidade de área é expressa em watts dissipados por unidade de área:

$$P_{por\ area} = \frac{P_{soma}}{A_t} [W/cm^2] \quad (43)$$

Sabendo que o aumento de temperatura em graus Celsius é dado pela equação:

$$T_r = 450 \left(\frac{P_{soma}}{A_t} \right)^{0,826} [^{\circ}C] \quad (44)$$

Desta forma a equação (44) relaciona o aumento de temperatura com as perdas somadas do cobre e do ferro e com a área requerida para dissipação de calor.

2.7 JANELA DO NÚCLEO E MATERIAL À SER ADQUIRIDO

2.7.1 Utilização da Janela do Núcleo

Para calcular a constante de utilização total da janela do núcleo é necessária a bitola do fio do primário (A_{wpb}) e do fio secundário (A_{wsb}). Lembrando que é a bitola (seção transversal do condutor ou área em cm^2) que será utilizada e não a calculada, ou seja, a bitola em valores comerciais. Também é preciso o número de espiras dos enrolamentos primário (N_p) e secundário (N_s). Onde K_u é a constante de utilização total da janela do núcleo.

$$K_u = K_{up} + K_{us} [\%] \quad (45)$$

As constantes de utilização da janela para os enrolamentos primário e secundário são respectivamente:

$$K_{up} = \frac{N_p * A_{wpb}}{W_a} [\%] \quad (46)$$

$$K_{us} = \frac{N_s * A_{wsb}}{W_a} [\%] \quad (47)$$

2.7.2 Quantidade de Lâminas e Comprimento dos Condutores

A profundidade do núcleo é dada por:

$$Profundidade = \frac{A_c}{E} [cm] \quad (48)$$

Para calcular a quantidade de lâminas é necessário saber a espessura da chapa (*ESPLAM*).

$$QUANTLAM = \frac{Profundidade}{ESPLAM} \quad (49)$$

Para estimar a quantidade de metros de fio a ser comprado, será utilizada como referência a volta do perímetro maior do carretel *PERIMEXT*. Isto simula a maior volta possível dentro da janela do núcleo. *UMAVOLTA* é um valor seguro de uma volta, pois foi adicionado no perímetro externo um coeficiente de segurança:

$$UMAVOLTA = PERIMEXT * (1 + Kseg) \quad (50)$$

A *METRAGEM1* e a *METRAGEM2* são a quantidade em metros dos condutores do primário e do secundário respectivamente a serem adquiridos para confecção do transformador:

$$METRAGEM1 = N_p * UMAVOLTA * 10^{-2} \quad (51)$$

$$METRAGEM2 = N_s * UMAVOLTA * 10^{-2} \quad (52)$$

2.8 ALGORÍTMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR

2.8.1 Transformador com Enrolamentos de Cobre

Para calcular o transformador com enrolamentos de cobre foi escrito o algoritmo apresentado no Apêndice A [9]. As equações utilizadas foram descritas nas seções 2.5, 2.6 e 2.7 deste trabalho. Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo são mostrados na Tabela 2.

2.8.2 Transformador com Enrolamentos de Alumínio

Para calcular o transformador com enrolamentos de alumínio pode ser utilizado o algoritmo apresentado no Apêndice A [9]. Considerando que:

$$S_{Al} = 1,7S_{cu} \quad A_{cAl} = 1,7A_{cCu} \quad (53)$$

Para o transformador enrolamento de alumínio é necessário escolher lâminas EI de dimensões maiores que aquelas utilizadas para o transformador enrolamento de cobre. Isto acontece, pois no transformador com enrolamentos de alumínio a secção dos fios condutores será maior que dos fios condutores do com enrolamentos de cobre, devido às diferenças de grandezas físicas (ver Tabela 1 pg. 13). Os enrolamentos de alumínio não cabem na janela do núcleo do transformador com enrolamentos de cobre.

Para seleccionar a bitola do fio de alumínio utilizar a tabela de fio de cobre. A resistência por cm do fio de alumínio será 1,7 vezes a resistência por cm do fio de cobre.

Os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do algoritmo de cálculo.

| Enrolamento | Alumínio | Cobre |
|---|------------------------------------|--|
| Dimensões da lâmina (cm) | F = 3,5000 E = 7 G = 10,5000 | F = 2,8580 E = 5,7150 G = 8,5730 |
| Número de espiras primário | 81,0760 | 128,0367 |
| Área do fio primário (cm ²) | 0,0930 | 0,0392 |
| Fio primário AWG | 9 | 11 |
| Número de espiras secundário | 147,4689 | 232,8857 |
| Área do fio secundário (cm ²) | 0,0510 | 0,0215 |
| Fio secundário AWG | 11 | 13 |
| Quantidade de lâminas E | 92,1053 | 71,4371 |
| Quantidade de lâminas I | 92,1053 | 71,4371 |
| Metragem fio primário | 42,9054 | 55,2736 |
| Metragem fio secundário | 78,0405 | 100,5370 |

3 MONTAGEM

O processo de montagem de um transformador pode ser feito de diversas maneiras. Neste trabalho foi adotado o método que será descrito a seguir.

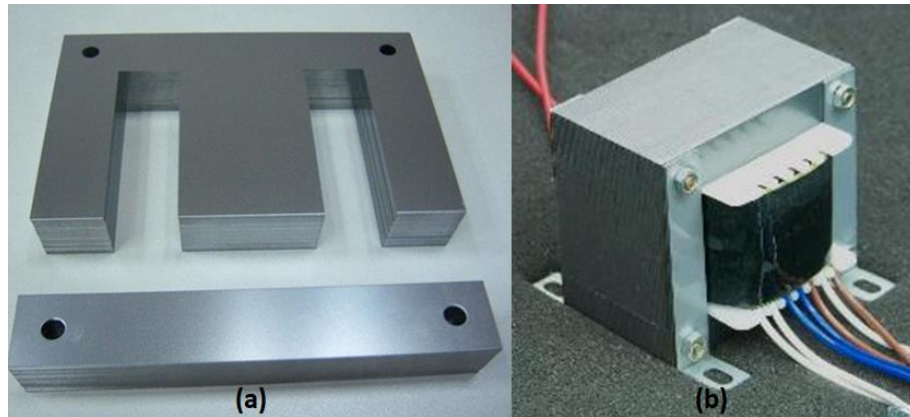


Figura 10 – (a) Lâminas EI; (b) transformador pretendido.

Conforme ilustrado na Figura 10 (a) as lâminas do transformador têm formato EI. O tipo de núcleo é envolvente com os enrolamentos entorno da perna central da lâmina E. Enrolam-se os fios em um carretel e na sequência encaixam-se as lâminas no carretel. A Figura 10 (b) representa um transformador semelhante ao pretendido neste trabalho. É possível visualizar o emprego do carretel na imagem. Neste trabalho será utilizado um carretel confeccionado artesanalmente, pois não foi possível encontrar para aquisição carretéis nos tamanhos pretendidos.

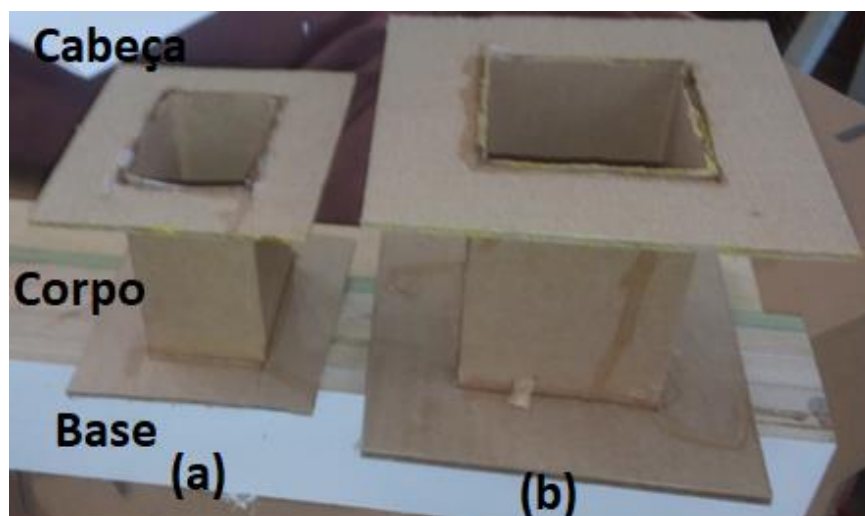


Figura 11 – Carretéis produzidos artesanalmente: (a) para transformador com enrolamentos de cobre; (b) para transformador com enrolamentos de alumínio.

Na Figura 11 ilustram-se as partes do carretel: cabeça (parte superior), corpo (parte do meio) que une a cabeça à base e a base (parte inferior). A base e a cabeça são peças idênticas, apenas uma é disposta no ápice e a outra na parte mais inferior do corpo.

3.1 CARRETEL

Para confecção do carretel é necessário que se tenha uma ripa de madeira dura de gabarito, já com as dimensões devidas e uma tira de papelão ou papel isolante (que foi o utilizado neste trabalho). Com este gabarito deve-se ir dobrando o papel em torno da madeira e quando chegar ao encontro do início da segunda volta vai sendo colada cada face da segunda volta. Antes de iniciar o processo da colagem sugere-se que sejam realizadas as dobras no papel, pois irá facilitar a colagem. Em cada dobra é necessário um corte superficial nas esquinas no papel (antes de forçar a dobra). Se forçado sem marcação o papel tende a rasgar. Será feita uma dobra de 180 graus para que a marcação da dobra fique bem demarcada. Após o papel todo marcado em cada esquina de dobra, em duas voltas completas em torno da madeira e cortada a parte que sobra, pode-se iniciar o processo da colagem. Será colada cada face da segunda volta. Na colagem de cada face é recomendado que seja comprimida a face a ser colada após passada a cola, isto faz com que a cola fixe melhor. Foi utilizada cola para madeira (pode ser facilmente encontrada em lojas de produtos para móveis).

Na Figura 12 são mostrados: (1) material necessário; (2) medindo as dobras; (3) realizando marcações com estilete; (4) cortando o final da segunda dobra; (5) papel pronto para a colagem; (6) colando a primeira face; (7) pressionando a face que foi colada; (8) medindo o tamanho do corpo; (9) corpo já cortado e pronto para colar a cabeça e a base no corpo.

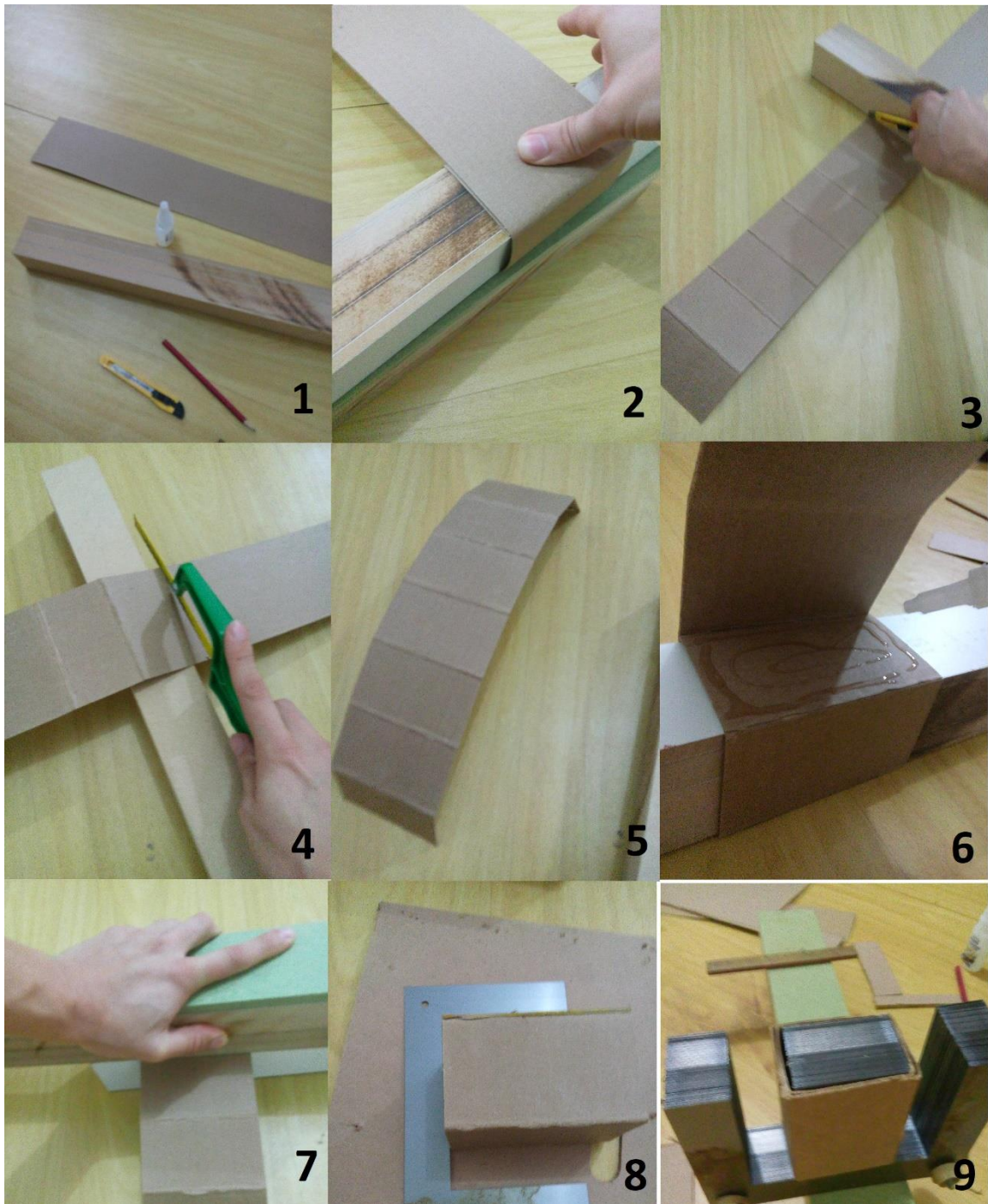


Figura 12 – Passos da confecção do carretel parte I.

Após a colagem das faces, as mesmas foram deixadas paradas por cerca de 5 minutos. Para fazer as cabeças do carretel utilizou-se um papel isolante mais grosso, também é possível utilizar chapa de “Eucatex”. Utiliza-se a peça já produzida para marcar no papel onde deve ser cortado (para alcançar um bom encaixe e que não fique nem justo e nem frouxo). Para cortar no meio pode-se utilizar um formão e um martelo ou um estilete. Neste trabalho foi utilizado o estilete (porém foi necessário passar a lâmina diversas vezes para o corte). Após o corte das duas

peças que serão a base e a cabeça do carretel, foi cortado o corpo no tamanho adequado para a altura da perna central do E das lâminas (como pode ser visto na Figura 12 (8), a altura do corpo do carretel tem que se encaixar na altura da perna central da lâmina E). Na sequência foi posta a cabeça e a base no corpo do carretel e passada a cola de madeira nos dois lados da cabeça e da base nas junções com o corpo (é importante ter cuidado para não utilizar muita cola porque esta pode escorrer). Deixar secar a cola por 5 minutos preferencialmente apoiado em uma superfície que não vá colar caso a cola escorra.

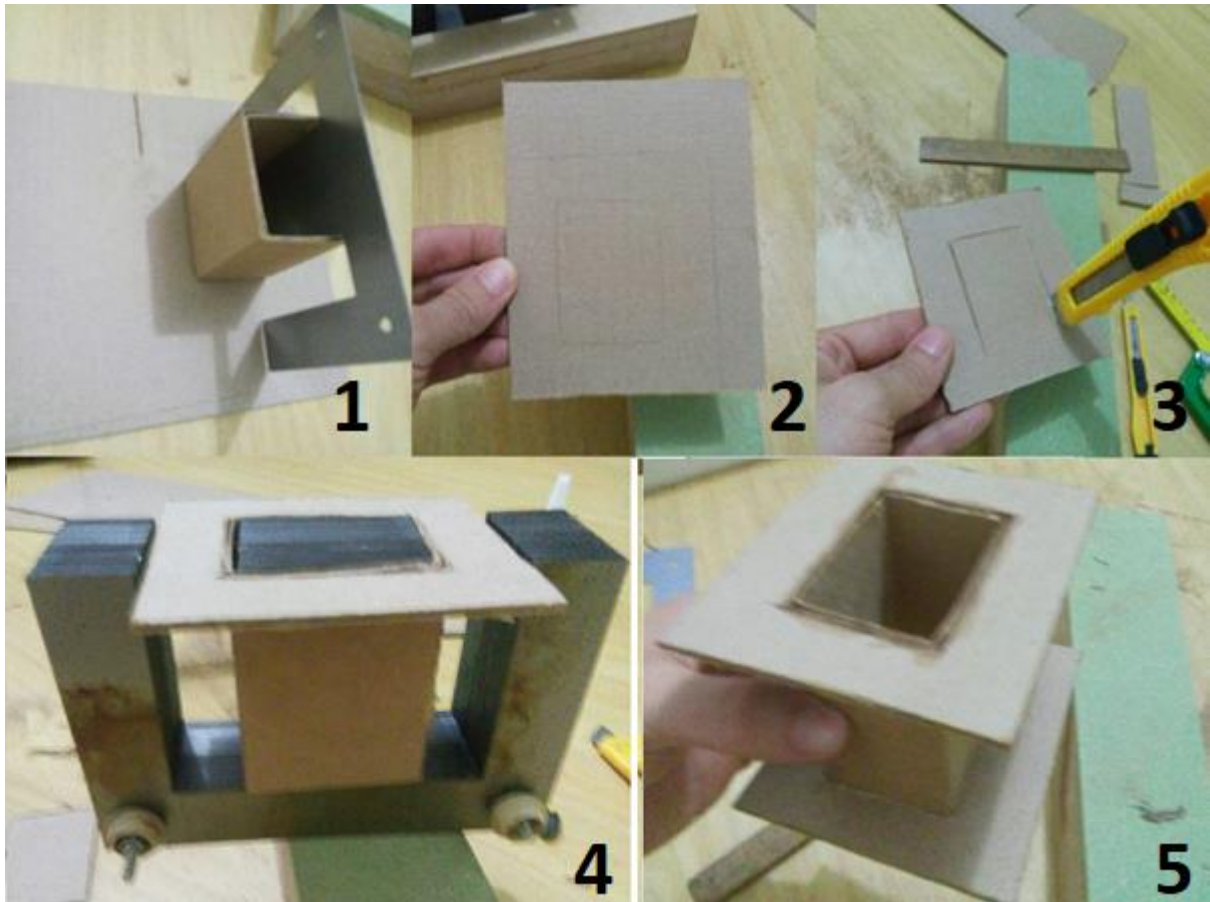


Figura 13 – Passos da confecção do carretel parte II.

Pode ser observado na Figura 13: (1) medição da base; (2) cortes a serem realizados, desenhados; (3) corte da base; (4) medição do encaixe da base ao núcleo; (5) carretel pronto.

3.2 ENROLAMENTOS

Os enrolamentos foram enrolados em uma bobinadeira profissional. Por ter pouco espaço na janela do núcleo e os condutores escolhidos possuírem uma bitola grande e pelo fio ser pouco maleável tornou-se difícil enrolar manualmente. As esquinas do carretel também dificultam a bobinagem.



Figura 14 – Bobinadeira.

A Figura 14 ilustra a bobinadeira utilizada no processo de enrolar os enrolamentos do transformador (com enrolamentos de cobre). Conforme é detalhado na Figura 15, o processo de colocar os enrolamentos no carretel foi feito da seguinte maneira: foi atravessado o início do fio do enrolamento de baixa tensão (primário para o nosso caso) com um tecido de proteção afim de não danificar o carretel em movimentações futuras do condutor. Foram enroladas 128 voltas com fio de cobre AWG 11. Devido ao ângulo reto dos cantos do carretel foi necessário ajustar a posição do fio batendo com martelo (onde se formam “barrigas” na posição média de cada face do corpo do carretel). Ao total foram quatro camadas para o enrolamento

de baixa tensão. Foi posto papel isolante DMD classe F 0,3 mm de espessura entre os enrolamentos primário e secundário. Na sequência foi bobinado o enrolamento de alta tensão (secundário para o nosso caso) com 233 voltas de fio AWG 13. No total neste enrolamento foram seis camadas. Por fim foi posto duas voltas de papel isolante.

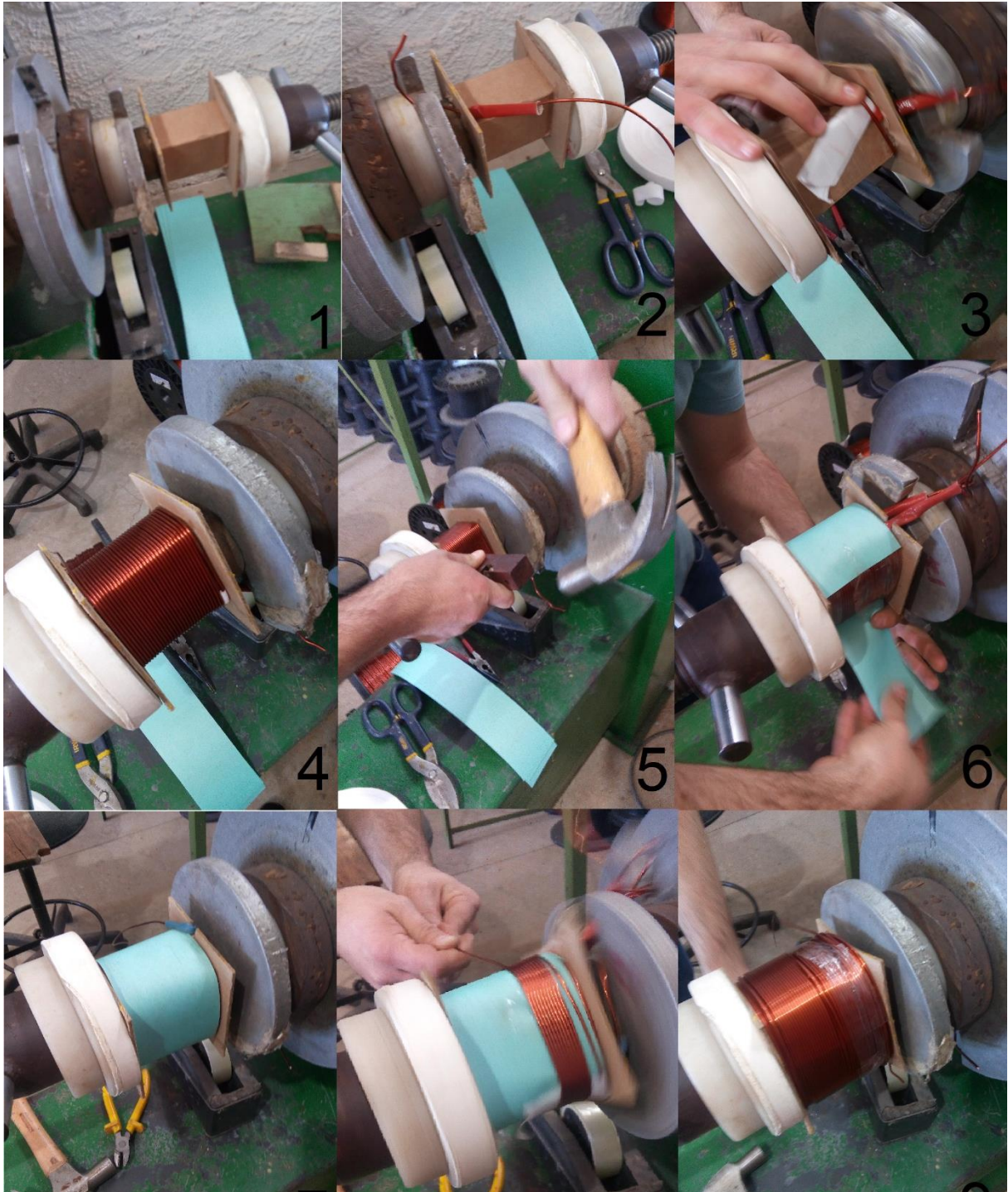


Figura 15 – Bobinagem.

No processo de bobinagem ilustrado na Figura 15: (1) o carretel foi colocado na bobinadeira; (2) atravessou-se o início do fio do enrolamento de baixa tensão na cabeça do carretel; (3) iniciou-se o processo de bobinagem; (4) colocou-se a primeira camada do enrolamento de baixa tensão; (5) realizou-se o endireitamento do enrolamento pois cria-se ondulações devido a curva de 90° dos cantos do carretel; (6) entre os enrolamentos primário e secundário foi posto um papel isolante; (7) papel isolante já disposto em torno de todo o enrolamento de baixa tensão; (8) iniciou-se o processo de enrolamento do enrolamento de alta tensão; (9) finalizado o enrolamento de alta tensão.

3.3 NÚCLEO

Inicialmente foi contado quantas chapas E e I se tinha, resultando em 78 lâminas E e 75 lâminas I. Desta forma foram destinadas 38 E e I para um lado e para o outro 37 lâminas de cada formato, conforme ilustra a Figura 16. Com o carretel já com os enrolamentos conforme apresentado na Figura 17 se iniciou a colocação das lâminas E e I, encima E embaixo I, embaixo E encima I e assim sucessivamente até se preencher todo o espaço destinado ao núcleo (apresentado o início do processo na Figura 18).



Figura 16 – Contagem e separação das lâminas do núcleo para o transformador com enrolamentos de cobre.



Figura 17 – Carretel com enrolamentos de cobre.

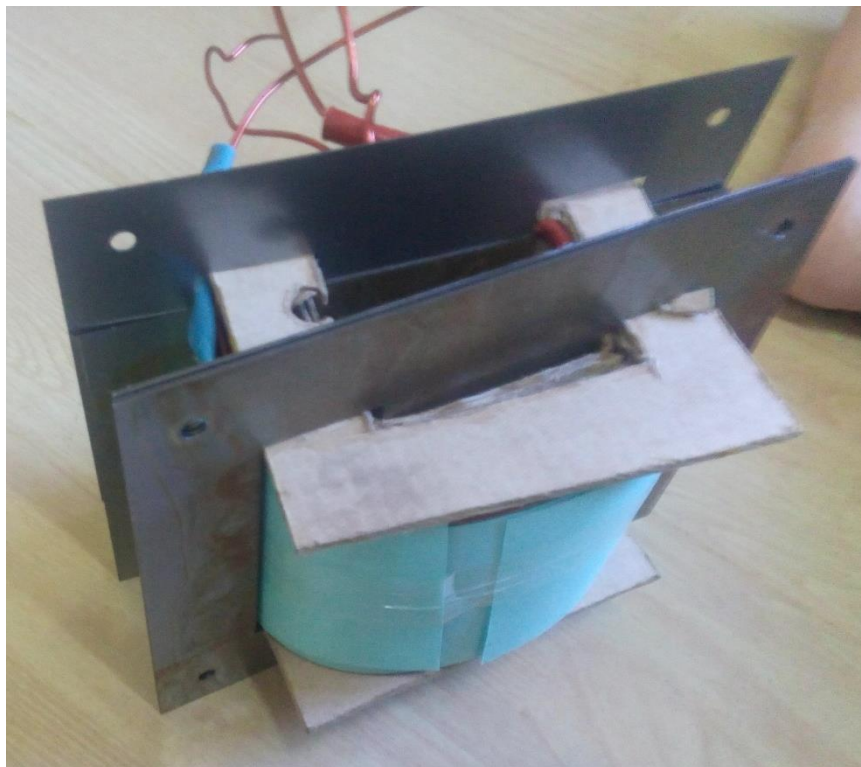


Figura 18 – Início do processo de disposição das lâminas do núcleo do transformador com enrolamentos de cobre.

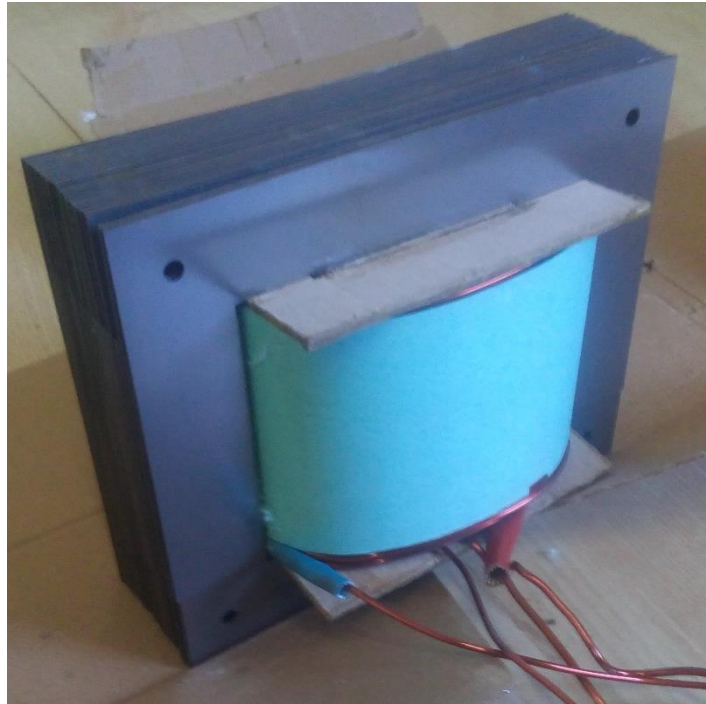


Figura 19 – Todas as lâminas do núcleo dispostas para o transformador com enrolamentos de cobre.

Após todas as lâminas dispostas no transformador conforme ilustrado na Figura 19, foram postos parafusos nos 4 furos encontrados nos cantos do núcleo. Para o parafuso entrar se fez necessário bater com martelo encima das lâminas, também para que não permanecessem espaços vazios no encontro E-I.

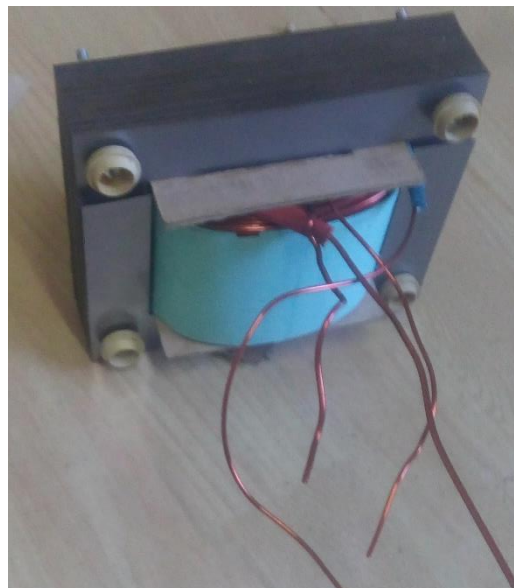


Figura 20 – Transformador com enrolamentos de cobre concluído.

A Figura 20 ilustra o transformador concluído, já com os parafusos para manter as lâminas o mais próximo possível a fim de minimizar vibrações.

3.4 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE ALUMÍNIO

O processo de confecção do protótipo do transformador com enrolamentos de alumínio foi semelhante ao transformador com enrolamentos de cobre, com a única distinção que foi disposto papel isolante entre cada camada de enrolamento. Isto facilita a bobinagem e faz com que as linhas de fio sejam dispostas adequadamente de tal maneira que na próxima camada não fiquem espaços vazios (permite encaixar melhor as linhas de fio dentro de cada camada). Isto foi possível devido a constante de utilização da janela deste protótipo ser 0,3135. Tendo este fato o enrolador teve segurança para utilizar mais folhas de papel isolante. A Figura 22 ilustra a bobinagem dos enrolamentos e a Figura 21 ilustra a montagem do núcleo do transformador, seguindo o mesmo processo descrito nas seções 3.2 e 3.3 respectivamente.

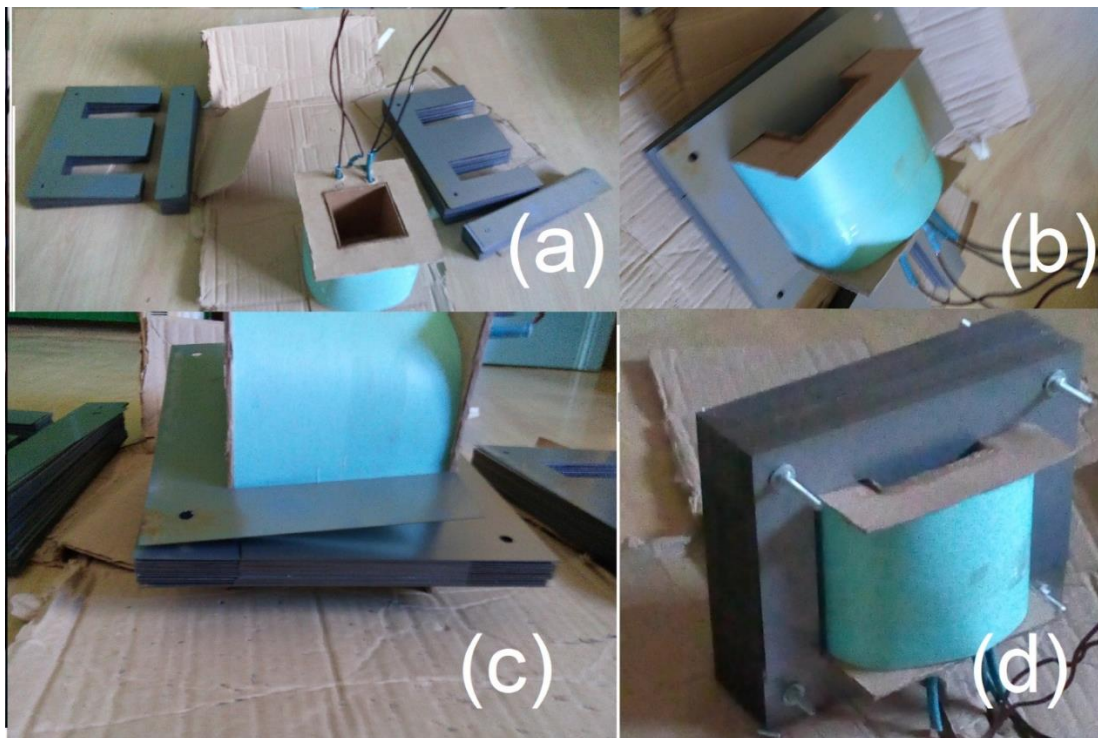


Figura 21 – Montagem do núcleo.

Na Figura 21 é possível observar: (a) contagem e separação das chapas destinadas para cada lado; (b) iniciado o processo de montagem do núcleo colocando uma chapa de cada lado; (c) visão lateral das chapas sendo postas uma de cada lado; (d) núcleo concluído.

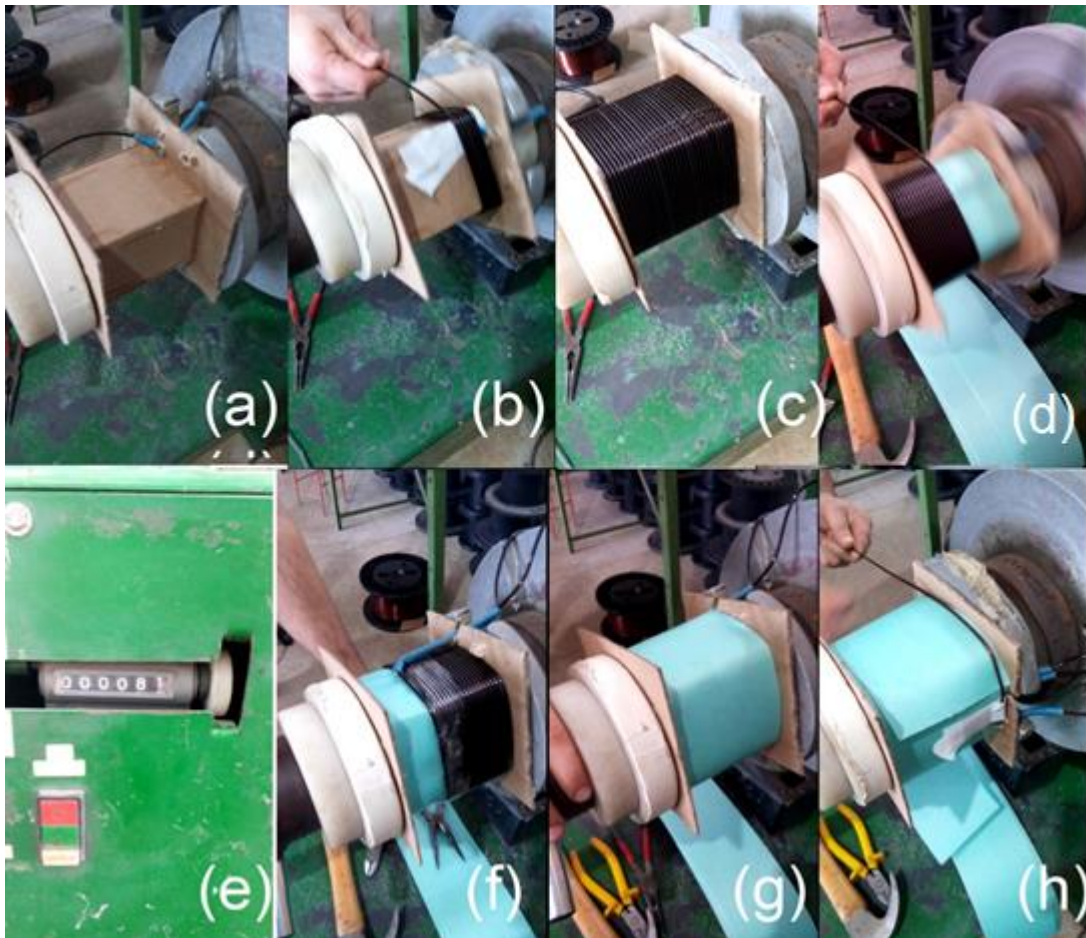


Figura 22 – Bobinagem.

Estão apresentados na Figura 22 os seguintes passos: (a) iniciou-se atravessando o princípio do fio do primário (baixa tensão) na cabeça do carretel; (b) fixou-se o fio no corpo do carretel com pano envolvendo este e se iniciou a bobinagem da primeira camada; (c) finalizada a primeira camada; (d) iniciou-se a segunda camada permitindo a visualização do papel isolante que foi posto entre camadas; (e) display da bobinadeira que apresenta quantas voltas já foram dadas. Visto o número de voltas desejadas para o primário se encerrou este enrolamento; (f) fixou-se com fita adesiva o fio e atravessado a ponta na cabeça do carretel; (g) colocou-se outra camada de isolante; (h) iniciou-se a bobinagem do secundário (alta tensão), seguindo os mesmos passos do primário.

4 RESULTADOS APRESENTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em ensaios e testes realizados nos transformadores produzidos neste trabalho. Primeiramente serão apresentados os resultados do transformador com enrolamentos de cobre e na sequência os resultados do transformador com enrolamentos de alumínio.

4.1 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE COBRE

4.1.1 Ensaio de Continuidade

O ensaio de continuidade permite verificar a existência de curto-circuito entre os enrolamentos e o núcleo (contato com a massa), entre o enrolamento primário e o secundário. Com um multímetro na escala de continuidade colocou-se uma ponteira no início do enrolamento primário e a outra no final deste enrolamento. Observamos que o fio não estava interrompido. O mesmo teste foi feito para o enrolamento secundário acusando continuidade. Com uma ponteira no início do enrolamento primário e a outra na massa (núcleo) observou-se que não existe contato. Este teste foi repetido para o enrolamento secundário e a massa acusando descontinuidade. Com uma ponteira no enrolamento primário e a outra no enrolamento secundário observou-se que não existe contato. Na Tabela 3 foi marcado “sim” onde existe continuidade. As linhas indicam uma das ponteiros de prova e as colunas a outra.

Tabela 3 – Ensaio de continuidade do transformador com enrolamentos de cobre.

| | Entrada Primário | Saída Primário | Entrada Secundário | Saída Secundário |
|--------------------|------------------|----------------|--------------------|------------------|
| Entrada Primário | | sim | | |
| Saída Primário | | | | |
| Entrada Secundário | | | | sim |

4.1.2 Ensaio de Indução

Neste ensaio foi alimentado o enrolamento primário com 126,5V utilizando um *Varivolt* monofásico. A tensão de saída apresentada no enrolamento secundário foi 228V. O resultado foi satisfatório. Este ensaio tem finalidade de verificar se o transformador apresentava indução do primário ao secundário.



Figura 23 – Ensaio de indução transformador com enrolamentos de cobre.

4.1.3 Ensaio a Vazio

Este ensaio foi realizado e obtiveram-se os seguintes resultados:
 $V_{VZ}=126,5V$; $I_{VZ}=4,93A$; $P_{VZ}=22W$ (perdas no ferro).

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}} = \frac{22W}{126,5V * 4,93A} = 0,0355$$

$$\cos^{-1} FP = \cos^{-1} 0,0355 = 87,978^\circ$$

$$Y_E = \frac{I_{VZ}}{V_{VZ}} \angle -\cos^{-1} \left(\frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}} \right) = \frac{4,93A}{126,5V} \angle -\cos^{-1} \left(\frac{22W}{126,5V * 4,93A} \right)$$

$$Y_E = 0,0014 - j0,0389 = \frac{1}{R_C} + j \frac{1}{X_M}$$

Visto que Y_E está referenciado ao primário sendo que no ensaio as medições foram realizadas no primário. Estes valores serão referenciados ao secundário a fim de se obter o circuito equivalente referenciado ao lado de alta tensão ou secundário.

$$Y_2 = a^2 Y_E = (0,58)(0,0014 - j0,0389) = \frac{1}{2127,7} + j \frac{1}{76,92}$$

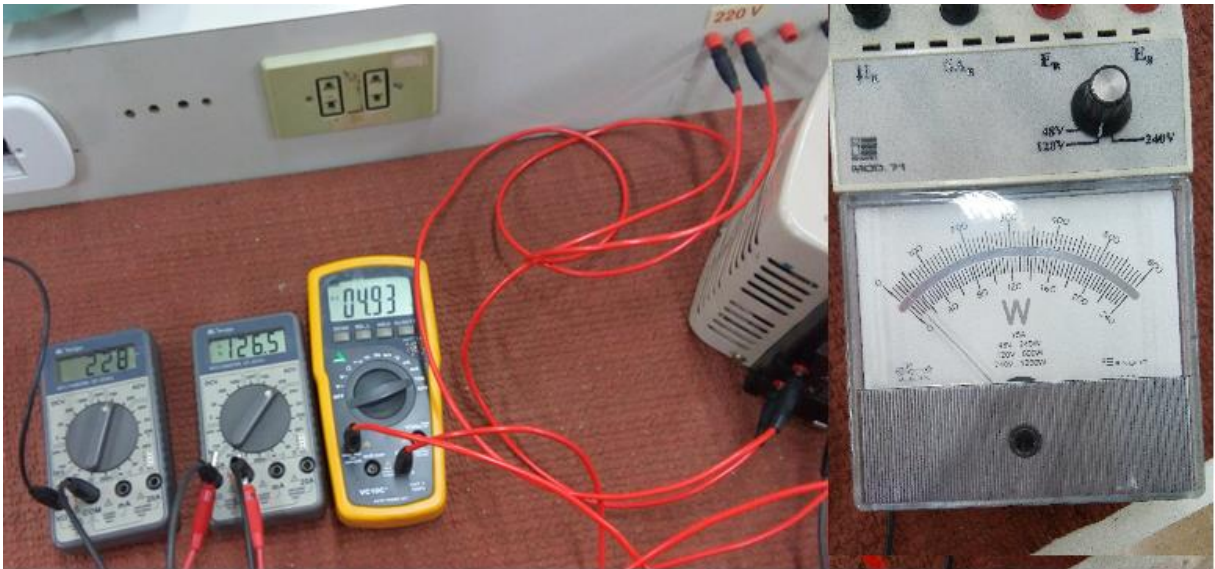


Figura 24 – Ensaio a vazio para o transformador com enrolamentos de cobre.

4.1.4 Ensaio de Curto-Circuito

Foi alimentado o enrolamento secundário elevando a tensão lentamente até que se encontrasse a corrente nominal do secundário. O enrolamento primário foi curto-circuitado. Os instrumentos foram ligados no enrolamento de alta tensão ou secundário. Foram obtidos: $V_{cc}=4,596V$; $I_{cc}=3,329A$; $P_{cc}=14W$ (perdas no cobre).

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} \left(\frac{P_{CC}}{V_{CC} * I_{CC}} \right) = \frac{4,596V}{3,329A} \angle \cos^{-1} \left(\frac{14W}{4,596V * 3,329A} \right)$$

$$Z_{SE,S} = R_{eqs} + jX_{eqs} = 1,2633 + j0,5569 \Omega$$

Os valores da equação acima estão referenciados ao secundário (alta tensão), pelo fato dos equipamentos de medição estar no lado de alta tensão.



Figura 25 – Ensaio de curto-circuito no transformador com enrolamentos de cobre.

Para calcular as resistências e reatâncias de cada enrolamento tem-se:

$$Z_{eq2} = Z_{SE,S} = 1,2633 + j0,5569 = R_{eq2} + jX_{eq2}$$

$$R_{eq2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2; R_2 = \frac{R_1}{a^2}; R_{eq2} = R_2 + R_2; R_2 = \frac{1,2633}{2} = 0,63\Omega$$

$$R_1 = a^2 R_2 = (0,58^2)(0,63) = 0,21\Omega$$

$$X_{eq2} = \frac{X_1}{a^2} + X_2; X_2 = \frac{X_1}{a^2}; X_{eq2} = X_2 + X_2; X_2 = \frac{0,5569}{2} = 0,28\Omega$$

$$X_1 = a^2 X_2 = (0,58^2)(0,28) = 0,094\Omega$$

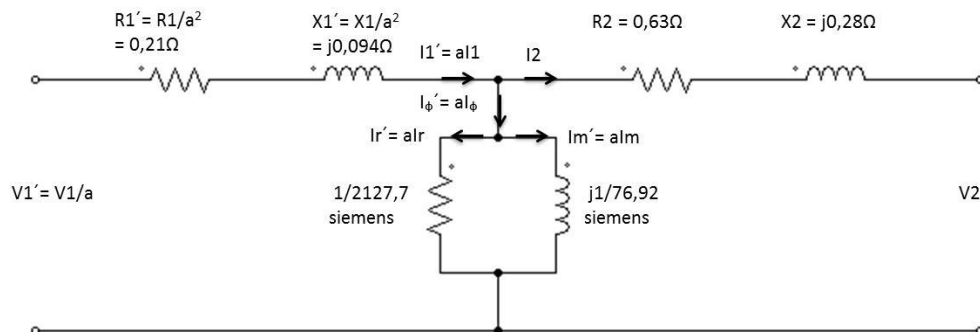


Figura 26 – Circuito equivalente transformador com enrolamentos de cobre.

4.1.5 Ensaio da Resistência dos Enrolamentos

Com o auxílio de um miliohmímetro foram medidas as resistências dos enrolamentos primário e secundário. Foram utilizados os 2 miliohmímetros que o laboratório de Máquinas Elétricas da UTFPR-PB possui. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência dos enrolamentos do transformador com enrolamentos de cobre.

| | Ensaio | | Calculado |
|------------|--------|-------|-----------|
| | (mΩ) | (mΩ) | (mΩ) |
| Primário | 134,5 | 134,1 | 173,3 |
| Secundário | 484 | 482 | 499,6 |

4.1.6 Teste de Aquecimento

O transformador foi exposto à seguinte situação: alimentado com 127V no seu enrolamento primário, colocada uma carga puramente resistiva de 750W no enrolamento secundário. As tensões, as correntes e a temperatura superficial do núcleo (medido com termômetro a laser) foram monitoradas. Em nenhum momento foi extrapolada a corrente nominal de saída ou do secundário. Durante este teste o transformador apresentou temperatura superficial do núcleo de 20,5°C inicial. Após cerca de 30 minutos exposto à situação descrita, este apresentou maior temperatura superficial medida de 33,2°C. Desta forma a elevação de temperatura foi de 12,7°C. No cálculo do transformador foi estabelecido 30°C como meta de elevação de temperatura máxima e a elevação de temperatura calculada foi de 17,45°C. A temperatura ambiente no dia do ensaio foi de aproximadamente 21°C. Conclui-se que em termos de elevação de temperatura o protótipo atendeu o projeto.

4.1.7 Outros Testes

Na Tabela 5 são apresentados outros resultados de medição. No primeiro teste o enrolamento secundário do transformador foi mantido aberto (sem carga). O

enrolamento primário foi alimentado diretamente na bancada. No segundo teste no enrolamento secundário foi conectada uma resistência de valores nominais 320 Ω e 1,5 A. No terceiro teste, no enrolamento secundário foi conectado um motor monofásico de ½ CV; 220V; 3,5 A; 60 Hz. No quarto teste foram medidas as indutâncias próprias de cada enrolamento. Os enrolamentos primário e secundário foram conectados aditivamente ou subtrativamente para permitir a medição da indutância aditiva ou subtrativa.

Na Tabela 5 é possível observar que quando conectamos carga a corrente primária aumenta (comparando com a situação a vazio). A tensão secundária em todos os casos satisfaz os dados de projeto. O coeficiente de acoplamento unitário significa que o fluxo disperso é nulo. O fluxo magnético total produzido pela corrente primária concatena o enrolamento secundário e vice-versa.

Tabela 5 – Outros ensaios realizados.

| | | Transformador com enrolamentos de cobre | Transformador com enrolamentos de alumínio |
|--|----------------------------------|---|--|
| Secundário aberto | I_1 (A) | 4,51 | 13,70 |
| | I_2 (A) | 0 | 0 |
| | V_1 (V) | 122 | 120 |
| | V_2 (V) | 224 | 223 |
| Carga resistiva no secundário: $R_{non}=320\Omega$, 1,5A | I_1 (A) | 5,44 | 13,81 |
| | I_2 (A) | 1,14 | 1,09 |
| | V_1 (V) | 121 | 120 |
| | V_2 (V) | 226 | 225,3 |
| Motor no secundário ½ cv, monofásico, 220V, 3,50A, 60HZ | I_1 (A) | 9,63 | 17,78 |
| | I_2 (A) | 3,03 | 2,64 |
| | V_1 (V) | 127,7 | 124,2 |
| | V_2 (V) | 223 | 224 |
| Indutância própria | L_1 (H) | 0,0398 | 0,0163 |
| | L_2 (H) | 0,1315 | 0,0546 |
| | $L_{Aditiva}$ (H) | 0,319 | 0,01305 |
| | $L_{Subtrativa}$ (H) | 0,0271 | 0,0117 |
| Indutância Mutua | M (H) | $\frac{0,319 - 0,0271}{4} = 0,0730$ | $\frac{0,1305 - 0,0117}{4} = 0,0297$ |
| Coeficiente de acoplamento | $K = \frac{M}{\sqrt{L_1 * L_2}}$ | $\cong 1$ | $\cong 0,995$ |

4.2 TRANSFORMADOR COM ENROLAMENTOS DE ALUMÍNIO

4.2.1 Ensaio de Continuidade

O teste de continuidade realizado para o transformador com enrolamentos de cobre foi repetido para o transformador com enrolamentos de alumínio. Este último não apresenta: enrolamentos interrompidos, contato com a massa e curto circuito entre enrolamentos.

4.2.2 Ensaio de Indução

O ensaio de indução já descrito foi realizado também para o transformador com enrolamentos de alumínio. Alimentando o primário (enrolamento de baixa tensão) com 126,8V, a tensão do secundário (enrolamento de alta tensão) foi de 222V. Visto a tensão induzida tem-se o indicativo que o transformador está atendendo os requisitos de projeto.

4.2.3 Ensaio a Vazio

No ensaio a vazio foram obtidos os seguintes resultados: $V_{VZ}=127,0V$; $I_{VZ}=15,58A$; $P_{VZ}=100W$ (perdas no ferro).

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}} = \frac{100W}{127,0V * 15,58A} = 0,0505$$

$$\cos^{-1} FP = \cos^{-1} 0,0505 = 87,1031^\circ$$

$$Y_E = \frac{I_{VZ}}{V_{VZ}} \angle -\cos^{-1} \left(\frac{P_{VZ}}{V_{VZ} * I_{VZ}} \right) = \frac{15,58A}{127,0V} \angle -\cos^{-1} \left(\frac{100W}{127,0V * 15,58A} \right)$$

$$Y_E = 0,0062 - j0,1225 = \frac{1}{R_C} + j \frac{1}{X_M}$$

$$R_C = 161,3\Omega; X_M = j8,16\Omega.$$

Visto que Y_E está referenciado ao primário sendo que no ensaio as medições foram realizadas no primário, será referenciado ao secundário afim de se ter um circuito equivalente referenciado ao secundário.

$$Y_2 = a^2 Y_E = (0,58^2)(0,0062 - j0,1225) = \frac{1}{476,2} + j \frac{1}{24,39}$$

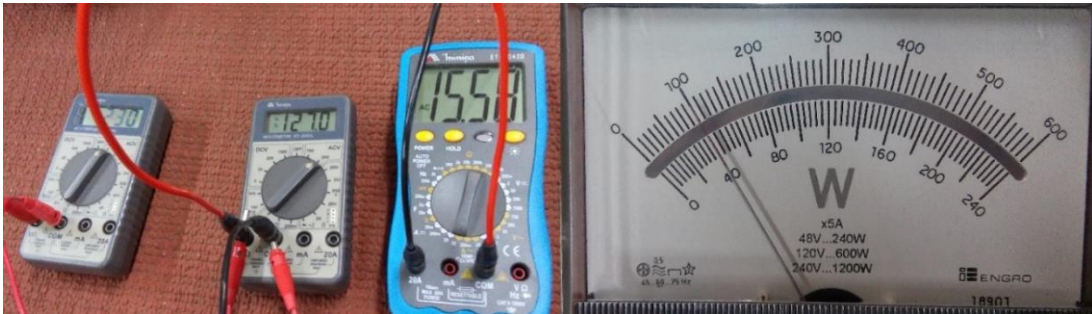


Figura 27 – Ensaio a vazio no transformador com enrolamentos de alumínio.

4.2.4 Ensaio de Curto-Circuito

Alimentando o secundário foram obtidas as seguintes leituras: $V_{cc}=3,5V$; $I_{cc}=3,41$; $P_{cc}=10W$ (perdas no alumínio).

$$Z_{SE} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \cos^{-1} \left(\frac{P_{CC}}{V_{CC} * I_{CC}} \right) = \frac{3,5V}{3,41A} \angle \cos^{-1} \left(\frac{10W}{3,5V * 3,41A} \right) \quad (54)$$

$$Z_{SE,S} = R_{eq2} + jX_{eqs} = 0,8600 + j0,5603 \Omega \quad (55)$$

Os valores da equação acima estão referenciados ao secundário (alta tensão).



Figura 28 – Ensaio de curto-circuito no transformador com enrolamentos de alumínio.

$$Z_{eq2} = Z_{SE,P} = 0,86 + j0,5603 = R_{eq2} + jX_{eq2}$$

$$R_{eq2} = \frac{R_1}{a^2} + R_2; R_2 = \frac{R_1}{a^2}; R_{eq2} = R_2 + R_2; R_2 = \frac{0,86}{2} = 0,43\Omega$$

$$R_1 = a^2 R_2 = (0,58^2)(0,43) = 0,145\Omega$$

$$X_{eq2} = \frac{X_1}{a^2} + X_2; \quad X_2 = \frac{X_1}{a^2}; \quad X_{eq2} = X_2 + X_2; \quad X_2 = \frac{0,5603}{2} = 0,28\Omega$$

$$X_1 = a^2 X_2 = (0,58^2)(0,28) = 0,094\Omega$$

O circuito equivalente completo do transformador, referenciado ao secundário, é calculado de forma análoga ao anterior.

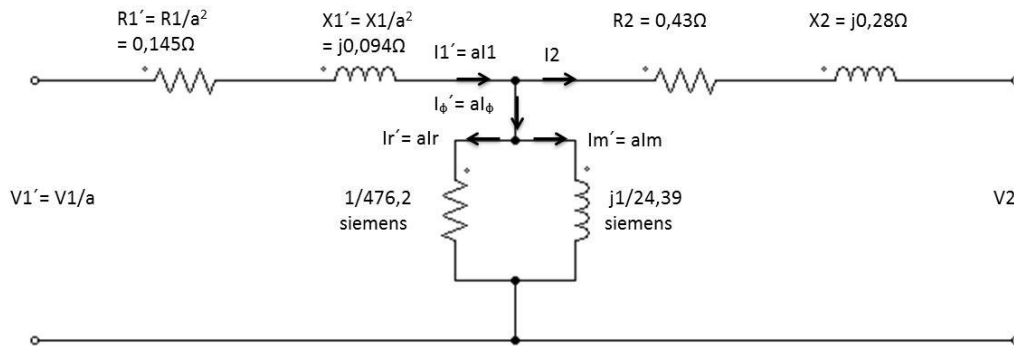


Figura 29 – Circuito equivalente transformador com enrolamentos de alumínio.

4.2.5 Ensaio da Resistência dos Enrolamentos

Os dados obtidos com a utilização de miliohmímetros são apresentados na Tabela 6, comparando estes resultados com o circuito equivalente na Figura 29, nota-se que os valores da resistência são próximos, tanto a resistência medida quanto a calculada e também a resistência elencada no circuito equivalente referente aos enrolamentos: primário e secundário.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de resistência dos enrolamentos do transformador com enrolamentos de alumínio.

| | Ensaio | | Calculado |
|------------|--------|-------|-----------|
| | 2(mΩ) | 3(mΩ) | (mΩ) |
| Primário | 111 | 111,7 | 141,1 |
| Secundário | 397 | 396 | 408,9 |

4.2.6 Outros Testes

Outros testes foram realizados no transformador com enrolamentos de alumínio e os resultados podem ser observados na Tabela 5.

4.3 PESO DOS TRANSFORMADORES

Na Tabela 7 são apresentados os pesos de cada peça dos transformadores, também seu peso total.

Tabela 7 – Peso das peças dos transformadores.

| Transformador com enrolamentos de | Carretel (g) | Enrolamentos (g) | Ferro (g) | Total (g) |
|-----------------------------------|--------------|------------------|-----------|-----------|
| Cobre | 120 | 2972 | 5648 | 8740 |
| Alumínio | 171 | 1345 | 10484 | 12000 |

4.4 CUSTOS FINANCEIROS

A seguir serão apresentados os custos financeiros para confecção dos protótipos, foi posto um grupo de custos diversos, pois este grupo abrange gastos dos dois protótipos, desta forma calcula-se a média aritmética simples.

Tabela 8 – Valor total dos custos financeiros para confecção dos protótipos.

| | Item | Valor |
|----------|---|-------------------|
| Diversos | 2 Ripas de madeira para confecção dos carretéis | R\$ 26,00 |
| | Papel isolante DMD classe F 0,30mm x 0,50m | R\$ 10,00 |
| | Cola de madeira para colar os carretéis | R\$ 5,00 |
| | Barra roscada, arruelas, e parafusos | R\$ 7,90 |
| | Total Diversos | R\$ 48,90 |
| Cobre | Lâminas EI para o núcleo | R\$ 294,80 |
| | Fio de cobre para enrolamentos | R\$ 105,00 |
| | Metade dos gastos diversos | R\$ 24,45 |
| | Total Custos para o transformador com enrolamentos de cobre | R\$ 424,25 |
| Alumínio | Lâminas EI para o núcleo | R\$ 510,05 |
| | Fio de alumínio para enrolamentos | R\$ 30,00 |
| | Metade dos gastos diversos | R\$ 24,45 |
| | Total Custos para o transformador com enrolamentos de alumínio | R\$ 564,50 |
| | Total custo de ambos transformadores | R\$ 988,75 |

4.5 COMPARATIVO DE MATERIAIS PARA OS ENROLAMENTOS

Para um transformador monofásico 127/220V; corrente secundária 3,4 A; 60 Hz foram construídos dois protótipos (enrolamentos de cobre e enrolamentos de alumínio). Comparando os dois protótipos é possível observar que: para a mesma capacidade de condução de corrente, a bitola do fio de alumínio é maior que a bitola do fio de cobre. Consequentemente não é possível reutilizar o carretel e as lâminas do núcleo destinados ao transformador enrolamentos de cobre. A janela do núcleo necessária para acomodar os enrolamentos de alumínio é maior quando comparada com aquela necessária para os enrolamentos de cobre. Como resultado o volume do transformador com enrolamentos de alumínio é maior que o volume do transformador com enrolamentos de cobre.

O circuito elétrico equivalente dos transformadores também é diferente. Na Tabela 5 estão apresentados os dois transformadores sendo submetidos às mesmas condições de carga. As correntes primárias e secundárias são diferentes nos dois protótipos. A corrente primária contrabalança o efeito desmagnetizante da corrente secundária exigida pela carga e ainda deve gerar uma força magnetomotriz suficiente para criar o fluxo mútuo resultante. O fluxo magnético depende da área da seção transversal do núcleo. Esta área é diferente nos dois protótipos.

Dado um transformador com enrolamentos de cobre não é possível substituir apenas seus enrolamentos por enrolamentos de alumínio (para as mesmas especificações de tensão e corrente).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou transformador monofásico: comparativo de materiais para os enrolamentos. Para esta comparação foram montados dois protótipos de transformador com as mesmas especificações de tensão e corrente. O primeiro protótipo é um transformador com enrolamentos de cobre e o segundo um transformador com enrolamentos de alumínio. A partir deste estudo concluiu-se que os dois protótipos atenderam as especificações do projeto. A perda no ferro medida foi maior que a perda no ferro calculada. Esta diferença é devido à utilização de coeficientes de perdas teóricos no algoritmo de cálculo. Os coeficientes de perdas experimentais são levantados com equipamentos não disponíveis no laboratório utilizado.

Em linhas gerais o trabalho atendeu seus objetivos uma vez que foi possível comparar os materiais empregados na confecção dos protótipos. As exigências de projeto de ambos transformadores, como regulação de tensão, elevação de temperatura e rendimento foram atendidas.

Também se pode evidenciar que o método de cálculo de transformadores utilizado neste trabalho tem eficácia comprovada em dois protótipos de transformador. Estes quando utilizados para alimentar cargas tanto resistivas quanto indutivas, manteve seu nível de tensão do secundário em 220V como se desejava.

A primeira dificuldade encontrada foi no carretel. Recomenda-se que o carretel seja confeccionado, após possuir as lâminas do núcleo. Avaliar a qualidade do corte das lâminas, estas não podem possuir rebarbas excessivas.

Os condutores de cobre foram adquiridos com uma empresa local Patoeste. É recomendado adquirir condutores de marcas confiáveis. Existem fabricantes de condutores que não entregam o fio com a bitola prometida, também existem condutores produzidos com material reciclado prejudicando o projeto.

Para bobinagem em caso de condutores de bitolas maiores recomenda-se a utilização de uma bobinadeira ou torno mecânico para tracionar o fio, para que este seja acondicionado nas camadas de forma que as linhas de fio fiquem lado a lado, o mais próximo possível. Para bobinagem de fios de bitolas elevadas se recomenda carretéis que não possuam encontros de 90° (cantos).

Com a experiência deste trabalho se recomenda fortemente uma constante de utilização da janela do núcleo menor que 0,35. A literatura recomenda 0,4. As linhas de fio calculadas para cada camada são maiores, na prática cabem menos linhas de fio por camada. Se não existe uma folga suficiente para isto, o núcleo pode não se encaixar aos enrolamentos.

O processo completo de produção do transformador englobaria mergulhá-lo em verniz isolante. Devido à falta de acesso a estes materiais não foi realizado este procedimento. Recomenda-se que este processo seja realizado em trabalhos futuros, e na sequencia ensaio com megômetro afim de se identificar a resistência de isolamento.

Para a realização deste trabalho foram necessários os conhecimentos de diversas disciplinas cursadas no curso superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica, como Máquinas Elétricas, Eletromagnetismo para Engenharias, Instalações Elétricas, Variáveis Complexas, Análise de Circuitos Elétricos, Gestão de Projetos, Físicas, entre outras. Para a formação de um Engenheiro se faz necessário uma grande bagagem de conhecimentos, não somente os obtidos na academia mas, também, em experiências profissionais. Para a realização dos protótipos foi necessária à colaboração de várias pessoas, sendo fundamental a habilidade de lidar com as adversidades que podem acontecer na execução de projetos.

A realização deste trabalho oportunizou ao executor uma experiência que subsidiou conhecimentos que serão utilizados em sua vida profissional. Conclui-se que é fundamental a realização de trabalhos como este como requisito para diplomação de Engenheiros Eletricistas.

Para trabalhos futuros sugere-se analisar o circuito magnético dos transformadores e realizar o cálculo dos mesmos levando em consideração o curto circuito.

REFERÊNCIAS

- [1] A. E. FITZGERALD, Máquinas Elétricas, Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [2] S. J. CHAPMAN, Fundamentos de Máquinas Elétricas, Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [3] A. M. d. SANTOS, *Estimação Relativa de Tempo de Vida de Transformadores de Distribuição, Considerando Cargas Não Lineares*, Goiânia, Goiás, 2014.
- [4] R. SALUSTIANO, *Análise Técnica de transformadores para redes de média tensão*, Itajubá, Minas Gerais, 2012.
- [5] London Metal Exchange, 2018. [Online]. Available: <https://www.lme.com/>. [Acesso em 08 Abril 2018].
- [6] C. R. SULLIVAN, "Aluminum Windings and Other Strategies for High-Frequency Magnetics Design in an Era of High Copper and Energy Costs," em *IEEE Applied Power Electronics Conference*, 2007.
- [7] J. F. MORA, Máquinas Elétricas, 5 ed., Madri: Concepción Fernández Madrid, 2003.
- [8] I. L. KOSOW, Máquinas Elétricas e transformadores, São Paulo: Globo, 2005.
- [9] L. BLUME, *Transformer Engineering*, Nova York: John Wileu & Sons Inc, 1938.
- [10] M. B. MANSILHA, *Ciclo de vida das bobinas em transformadores de distribuição: estudo comparativo entre alumínio e cobre*, Santa Maria: UFSM, 2015.
- [11] F. B. R. MENDES, *Uma Contribuição para Identificação dos Parâmetros do Modelo Escalar de Histerese de Jiles-Atherton*, Florianópolis: UFSC, 2017.
- [12] J. V. LEITE, *Análise de Modelos Diferencias de Histerese Magnética Considerando Laços Menores de Indução*, Florianópolis: UFSC, 2002.
- [13] J. V. LEITE, *Contribuição à Modelagem Vetorial da Histerese Magnética*, Florianópolis: UFSC, 2006.
- [14] N. J. BATISTELA, *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de lâminas de Aço ao Silício*, Florianópolis: UFSC, 2001.
- [15] N. J. BATISTELA, *Inversor de Tensão com Saída Senoidal Controlado por Modo Deslizante com Frequência Fixa*, Florianópolis: UFSC, 1994.

[16] NOVACON, *Tabela de fios AWG com tabela de conversão para medidas métricas*, Porto Alegre: UFRGS, 2012.

APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO PARA TRANSFORMADORES

```

Vin = 127;
Vo = 220;
Io = 3.4;
Po = Vo*Io;
Freq = 60;
rend = 0.95;
alfa = 0.05;
Bm = 1.2;
Kv = 0.4;
Tr = 30;
Kf = 4.44;

Pt = Po*((1/rend)+1);

Ke=0.145*Kf*Kf*Freq*Freq*Bm*Bm*10^-4;

Kgcalc = Pt/(2*Ke*alfa*100)
Escolher a lâmina e anotar
D = ;
E = ;
F = ;
G = ;
Wa = F*G;
Ac = D*E;
Ap = Ac*Wa;
MLT = 2*(D+2*0.05)+2*(E+2*0.05)+3.14*F;

Kgnovo = (Ap/8.3)^(10/8);
At = 41.3*Ap^0.5;
WTFE = 68.2*Ap^(0.75);

Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*Freq*Ac)

J = (Pt*10^4)/(Kf*Kv*Bm*Freq*Ap)

lin = Po/(Vin*rend)

Awpb = lin/J

Selecionar fio na Tabela de fios e anotar
Awgp =
diamp = ;
Awpbnovo = ;
uohmsporcmp = ;
Ppkmp= ;

Rp = MLT*Np*uohmsporcmp*10^-6

Ip=lin;
Pp=Ip*Ip*Rp
Vs = Vo;
Ns = ((Np*Vs)/Vin)*(1+alfa)

```

$$A_{wsb} = I_0/J$$

Selecionar fio na tabela de fios e anotar:

$$A_{wgs} =$$

$$d_{iams} = ;$$

$$A_{wsbnovo} = ;$$

$$u_{ohmsporcms} = ;$$

$$P_{pkms} = ;$$

$$R_s = MLT * N_s * u_{ohmsporcms} * 10^{-6}$$

$$I_s = I_0;$$

$$P_s = I_s * I_s * R_s$$

$$P_{cu} = P_p + P_s$$

$$a_{lfacalc} = P_{cu}/P_o$$

$$K = 0.00357;$$

$$M = 1.32;$$

$$N = 1.71;$$

$$wattsporkg = (K) * (Freq^M) * (Bm^N)$$

$$P_{fe} = wattsporkg * W_{TFE} * 10^{-3}$$

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe}$$

$$R_{endcalc} = P_o / (P_o + P_{soma})$$

$$P_{porarea} = P_{soma} / A_t$$

$$T_{ecalc} = 450 * (P_{porarea}^{0.826})$$

$$K_{us} = (N_s * A_{wsbnovo}) / W_a$$

$$K_{up} = (N_p * A_{wpsbnovo}) / W_a$$

$$K_{unovo} = K_{up} + K_{us}$$

$$\text{Profundidade} = A_c / E$$

$$L_{FCP} = G / d_{iamp}$$

$$C_{FCP} = N_p / L_{FCP}$$

$$O_{CUPP} = C_{FCP} * d_{iamp}$$

$$L_{FCS} = G / d_{iams}$$

$$C_{FCS} = N_s / L_{FCS}$$

$$O_{CUPS} = C_{FCS} * d_{iams}$$

$$O_{CUPTE} = O_{CUPP} + O_{CUPS}$$

$$EspPI = 0.02;$$

$$O_{CUPPI} = EspPI * 3$$

$$O_{CUPTJ} = O_{CUPTE} + O_{CUPPI}$$

$$Folga = F - O_{CUPTJ}$$

$$ESPLAM = 0.095;$$

$$QUANTLAM = \text{Profundidade} / ESPLAM;$$

$$QUANTLAMSEG = QUANTLAM * 1.25$$

$$PERIMEXT = (2 * (E + 2 * F)) + (2 * \text{Profundidade} + 10^{-1});$$

$$UMAVOLTA = PERIMEXT * 1.26;$$

$$METRAGEM1 = N_p * UMAVOLTA * 10^{-2}$$

$$METRAGEM2 = N_s * UMAVOLTA * 10^{-2}$$

$$WTCU = ((N_p * P_{pkmp} + P_{pkms} * N_s) * UMAVOLTA) / 100$$

$$W_{TFE}$$

ANEXO A – TABELA DE FIOS AWG COBRE.

| Número AWG | Diâmetro (mm) | Secção (mm ²) | Número de espiras por cm | KG por Km | Resistencia (ohms/Km) |
|------------|---------------|---------------------------|--------------------------|-----------|-----------------------|
| 0000 | 11,8600 | 107,2000 | | 0,158 | 319 |
| 000 | 10,4000 | 85,3000 | | 0,197 | 240 |
| 00 | 9,2260 | 67,4300 | | 0,252 | 190 |
| 0 | 8,2520 | 53,4800 | | 0,317 | 150 |
| 1 | 7,3480 | 42,4100 | | 375,000 | 1,40 |
| 2 | 6,5440 | 33,6300 | | 295,000 | 1,50 |
| 3 | 5,8270 | 26,6700 | | 237,000 | 1,63 |
| 4 | 5,1890 | 21,1500 | | 188,000 | 0,80 |
| 5 | 4,6210 | 16,7700 | | 149,000 | 1,01 |
| 6 | 4,1150 | 13,3000 | | 118,000 | 1,27 |
| 7 | 3,6650 | 10,5500 | | 94,000 | 1,70 |
| 8 | 3,2640 | 8,3600 | | 74,000 | 2,03 |
| 9 | 2,9060 | 6,6000 | | 58,900 | 2,573 |
| 10 | 2,5880 | 5,2600 | | 46,800 | 3,23 |
| 11 | 2,3800 | 4,1680 | | 32,100 | 4,14 |
| 12 | 2,0530 | 3,3100 | | 29,400 | 5,13 |
| 13 | 1,9000 | 2,6260 | | 23,300 | 6,56 |
| 14 | 1,6280 | 2,0800 | 5,6 | 18,500 | 8,17 |
| 15 | 1,4500 | 1,6500 | 6,4 | 14,700 | 10,3 |
| 16 | 1,2910 | 1,3100 | 7,2 | 11,600 | 12,9 |
| 17 | 1,1500 | 1,0400 | 8,4 | 9,260 | 16,34 |
| 18 | 1,0240 | 0,8200 | 9,2 | 7,300 | 20,73 |
| 19 | 0,9116 | 0,6500 | 10,2 | 5,790 | 26,15 |
| 20 | 0,8118 | 0,5200 | 11,6 | 4,610 | 32,69 |
| 21 | 0,7230 | 0,4100 | 12,8 | 3,640 | 41,46 |
| 22 | 0,6438 | 0,3300 | 14,4 | 2,890 | 51,5 |
| 23 | 0,5733 | 0,2600 | 16 | 2,290 | 56,4 |
| 24 | 0,5106 | 0,2000 | 18 | 1,820 | 85,0 |
| 25 | 0,4547 | 0,1600 | 20 | 1,440 | 106,2 |
| 26 | 0,4049 | 0,1300 | 22,8 | 1,140 | 130,7 |
| 27 | 0,3606 | 0,1000 | 25,6 | 0,910 | 170,0 |
| 28 | 0,3211 | 0,0800 | 28,4 | 0,720 | 212,5 |
| 29 | 0,2859 | 0,0640 | 32,4 | 0,570 | 265,6 |
| 30 | 0,2546 | 0,0510 | 35,6 | 0,450 | 333,3 |
| 31 | 0,2268 | 0,0400 | 39,8 | 0,360 | 425,0 |
| 32 | 0,2019 | 0,0320 | 44,5 | 0,280 | 531,2 |
| 33 | 0,1798 | 0,0254 | 56 | 0,230 | 669,3 |
| 34 | 0,1601 | 0,0201 | 56 | 0,180 | 845,8 |
| 35 | 0,1426 | 0,0159 | 62,3 | 0,140 | 1069,0 |

| | | | | | |
|----|--------|--------|-------|-------|--------|
| 36 | 0,1270 | 0,0127 | 69 | 0,100 | 1338,0 |
| 37 | 0,1131 | 0,0100 | 78 | 0,089 | 1700,0 |
| 38 | 0,1007 | 0,0079 | 82,3 | 0,070 | 2152,0 |
| 39 | 0,0897 | 0,0063 | 97,5 | 0,056 | 2696,0 |
| 40 | 0,0799 | 0,0050 | 111 | 0,044 | 3400,0 |
| 41 | 0,0711 | 0,0040 | 126,8 | 0,035 | 4250,0 |
| 42 | 0,0633 | 0,0032 | 138,9 | 0,028 | 5312,0 |
| 43 | 0,0564 | 0,0025 | 156,4 | 0,022 | 6800,0 |
| 44 | 0,0503 | 0,0020 | 169,7 | 0,018 | 8500,0 |