

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIOGO JOSÉ KOHUT

**PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZANDO A
GEOMETRIA DO NÚCLEO**

PATO BRANCO

2022

DIOGO JOSÉ KOHUT

**PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZANDO A
GEOMETRIA DO NÚCLEO**

Three – phase Transformer Design Using Core Geometry

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Filomena B. R. Mendes.

PATO BRANCO

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DIOGO JOSÉ KOHUT

**PROJETO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO UTILIZANDO A
GEOMETRIA DO NÚCLEO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentada como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/06/2022

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes
Doutora em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Cesar Rafael Claure Torrico
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Artur Tsuguiyoshi Hara
Doutor em andamento em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

José Paulo De Barros Neto
Mestre em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

Dedico esse trabalho à minha família, amigos, assim como todos aqueles que me apoiaram em todas as ocasiões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, aos meus pais Lino e Julia por sempre me apoiarem e darem todo o suporte necessário, ao meu irmão Tiago que sempre me aconselhou e esteve comigo nos momentos mais difíceis, aos meus tios Wilfried e Maria por todo o suporte e acolhimento em toda minha jornada acadêmica, sem eles nada disso seria possível.

Agradeço também a minha orientadora Filomena Barbosa Rodrigues Mendes pelas oportunidades concedidas, apoio, sabedoria e por toda dedicação investida em minha formação acadêmica.

Agradeço a empresa Patoeste Transformadores por todo o apoio na construção do protótipo.

Por último agradeço a todos meus amigos e pessoas que contribuíram de forma direta ou indiretamente em minha formação.

O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia. (COLLIER, Robert).

RESUMO

KOHUT, Diogo José. **Projeto de Transformador Trifásico Utilizando a Geometria do Núcleo**. 2022. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

O transformador trifásico é uma máquina elétrica essencial nos dias atuais, pois é um equipamento versátil utilizado em várias aplicações como no transporte de energia elétrica a longas distâncias nas redes de transmissão e distribuição, em equipamentos eletrônicos e de medição. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um algoritmo para projetar e construir um protótipo de um transformador trifásico de núcleo E I elevador de tensão, sendo capaz de elevar um nível de tensão de entrada de 220 volts (V) para uma tensão de saída de 440 V e corrente de saída de 1,23 ampères (A). Foram realizados ensaios laboratoriais comprovando o funcionamento do transformador.

Palavras-chave: Transformador trifásico; Projeto; Montagem; Ensaio; Algoritmo; Núcleo; Enrolamentos.

ABSTRACT

KOHUT, Diogo José. **Three – phase Transformer Design Using Core Geometry.** 2022. 56 f. Graduation Conclusion Work – Electrical Engineering Course, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

The three-phase transformer is an essential electrical machine nowadays, as it is a versatile equipment used in various applications such as transporting electrical energy over long distances in transmission and distribution networks, in electronic and measurement equipment. This work aimed to develop an algorithm to design and build a prototype of a three-phase E I core voltage step-up transformer, capable of raising an input voltage level of 220 V to an output voltage of 440 V and current output of 1.23 A. Laboratory tests were carried out to prove the performance of the transformer.

Keywords: Three – phase Transformer; Project; Mounting; Test; Algorithm; Core; Windings.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Transformador ideal | 16 |
| Figura 2 - Representação de um transformador trifásico de três colunas | 16 |
| Figura 3 - Transformador trifásico de núcleo envolvido..... | 18 |
| Figura 4 - Transformador monofásico de núcleo envolvente | 18 |
| Figura 5 - Lâminas EI de aço silício | 19 |
| Figura 6 - Ligação delta – delta | 20 |
| Figura 7 - Enrolamento concêntrico | 21 |
| Figura 8 - Ensaio de circuito aberto..... | 22 |
| Figura 9 - Ensaio de curto-circuito..... | 23 |
| Figura 10 - Dimensões do núcleo EI | 24 |
| Figura 11 - Dimensões dos carretéis..... | 28 |
| Figura 12 - Impressora 3D | 28 |
| Figura 13 - Carretéis | 29 |
| Figura 14 - Bobinadeira | 30 |
| Figura 15 - Fios de cobre esmaltados | 30 |
| Figura 16 - Enrolamento primário: a) Começo do enrolamento e b) Primeira camada | 31 |
| Figura 17 - Papel isolante entre camadas | 32 |
| Figura 18 - Enrolamento primário..... | 32 |
| Figura 19 - Isolação entre fases | 33 |
| Figura 20 - Papéis isolantes | 33 |
| Figura 21 - Enrolamento secundário: a) Começo do enrolamento e b) Primeira camada | 34 |
| Figura 22 - Enrolamento secundário: a) Bobina secundária e b) Isolamento da bobina secundária. | 35 |
| Figura 23 - Carretel finalizado | 35 |
| Figura 24 - Carretéis das três fases do transformador | 36 |
| Figura 25 - Banho de verniz | 36 |
| Figura 26 - Verniz..... | 37 |
| Figura 27 - Carretéis finalizados..... | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 28 - Dimensões das chapas EI de aço silício | 38 |
| Figura 29 - Fechamento do núcleo com chapas E | 39 |
| Figura 30 - Fechamento do núcleo com chapas I | 39 |
| Figura 31 - Núcleo: a) Medição do empilhamento e b) Finalização do fechamento .. | 40 |
| Figura 32 - Isolação da perfuração..... | 41 |
| Figura 33 - Parafusos isolados..... | 41 |
| Figura 34 - Papel para isolar as barras galvanizadas | 42 |
| Figura 35 - Estrutura finalizada | 42 |
| Figura 36 - Ligação delta finalizada..... | 43 |
| Figura 37 - Medição da relação de transformação | 43 |
| Figura 38 - Protótipo do transformador | 44 |
| Figura 39 - Ensaio de circuito aberto do protótipo..... | 47 |
| Figura 40 - Dados de placa do motor trifásico de indução | 48 |
| Figura 41 - Ensaio com carga indutiva | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Resultados do dimensionamento do transformador trifásico..... | 27 |
| Tabela 2 – Materiais utilizados no transformador trifásico. | 45 |
| Tabela 3 – Teste de continuidade do transformador trifásico..... | 46 |
| Tabela 4 – Resultados do ensaio de circuito aberto..... | 48 |
| Tabela 5 – Resultados do ensaio com carga indutiva..... | 49 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 13 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 3. METODOLOGIA | 14 |
| 4. TRANSFORMADOR | 15 |
| 4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO..... | 15 |
| 4.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS | 17 |
| 4.2.1. Núcleo..... | 17 |
| 4.2.2. Enrolamentos | 19 |
| 4.3. ENSAIOS EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO..... | 21 |
| 4.3.1. Ensaio a Vazio | 21 |
| 4.3.2. Ensaio de Curto-Circuito | 22 |
| 4.4. PRINCIPAIS ETAPAS DO ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO..... | 23 |
| 4.5. MONTAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO..... | 27 |
| 4.5.1. Confeção dos carretéis..... | 27 |
| 4.5.2. Enrolamentos | 29 |
| 4.5.3. Núcleo..... | 38 |
| 4.5.4. Materiais utilizados..... | 45 |
| 5. RESULTADOS DOS ENSAIOS | 45 |
| 5.1. ENSAIO DE CONTINUIDADE DO TRANSFORMADOR..... | 46 |
| 5.2. ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO | 47 |
| 5.3. ENSAIO COM CARGA | 48 |
| 6. CONCLUSÕES | 50 |
| REFERÊNCIAS | 52 |
| APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR | 53 |
| ANEXO A – TABELA DE CONDUTORES | 56 |

1. INTRODUÇÃO

Em 1882, Thomas A. Edison colocou em funcionamento o primeiro sistema de geração, transmissão e distribuição CC (corrente contínua). O sistema supria pequenas quantidades de consumidores e as demandas de potências eram baixas, visto que somente lâmpadas incandescentes eram conectadas a rede. Mesmo nessas condições as linhas de transmissão apresentavam perdas, como a queda de tensão, sendo assim, não era possível que o sistema suprisse cargas a longas distâncias (CHAPMAN, 2013).

No ano de 1885 outras tecnologias e pesquisas estavam em andamento, dentre elas, o transformador monofásico CA (corrente alternada) foi um dos principais projetos desenvolvidos, possibilitando que George Westinghouse colocasse em funcionamento o sistema CA (LABEGALINI *et al.*, 1992).

O transformador é um dispositivo essencial em um sistema CA de potência, permitindo a geração de energia elétrica em diferentes níveis de tensão, minimizando as perdas e viabilizando, tecnicamente e economicamente, o transporte de energia elétrica a grandes distâncias. Os transformadores também são utilizados em outras aplicações como nas amostragens de tensão e corrente, circuitos de baixa potência e casamento de impedância (FITZGERALD, 2006).

Um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos de fios enrolados em torno de núcleo ferromagnético e acoplados por um fluxo magnético mútuo. O enrolamento primário (entrada de energia do transformador) é conectado a uma fonte de tensão CA, assim produzindo um fluxo alternado, que depende da amplitude da tensão, da frequência da fonte e do número de espiras dos enrolamentos. O fluxo mútuo gerado induz uma tensão no enrolamento secundário (saída do transformador, normalmente conectado a uma carga), que depende do número de espiras. Com as inúmeras proporções adequadas de espiras no primário e secundário, é possível obter vários níveis de tensão de saída no transformador (CHAPMAN, 2013).

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo projetar e construir um protótipo de transformador trifásico elevador de tensão de núcleo EI para realização de ensaios laboratoriais e base de testes para trabalhos futuros, com os seguintes parâmetros: tensão de entrada V_1 de 220 V; tensão de saída V_o de 440 V e corrente de saída I_o de 1,23 A.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Estudar a teoria em livros, artigos referentes ao transformador trifásico;
- ii. Realizar o equacionamento do algoritmo com os parâmetros previamente estabelecidos, para o cálculo do transformador trifásico;
- iii. Realizar simulações para definir as melhores dimensões do transformador;
- iv. Adquirir o material necessário para a confecção do transformador;
- v. Realizar a montagem do transformador;
- vi. Realizar ensaios e medições.

3. METODOLOGIA

Inicialmente serão realizadas pesquisas em bibliografias sobre o funcionamento, equacionamento e aspectos construtivos do transformador trifásico. Posteriormente, será realizado um equacionamento e inserido em um *software* de cálculo computacional, em forma de algoritmo sequencial, a fim de calcular os parâmetros relevantes para o projeto do transformador. O algoritmo será inicializado com os parâmetros ideais de projeto já estabelecidos no objetivo geral, buscando calcular as dimensões do núcleo ferromagnético, números de espiras dos enrolamentos primário e secundário, bitolas dos fios, regulação de tensão, aumento de temperatura, fator de utilização da janela, rendimento e potência de saída, todos esses parâmetros serão vistos como variáveis a serem encontradas. Com os dados encontrados será possível calcular as perdas no cobre. Após a estruturação do algoritmo serão efetuadas simulações para obter resultados e compara-los com as metas do projeto. Em seguida será construído o protótipo. Por fim será ensaiado o transformador e comparados os dados obtidos.

Este trabalho delimita-se a realizar alguns testes para comprovar o bom funcionamento do protótipo do transformador. A existência de instrumentos de medição com escala apropriada, no laboratório I001, também estabelecem os limites dos testes. O ensaio para levantamento do circuito equivalente do transformador e medições de resistência de isolamento não serão realizados.

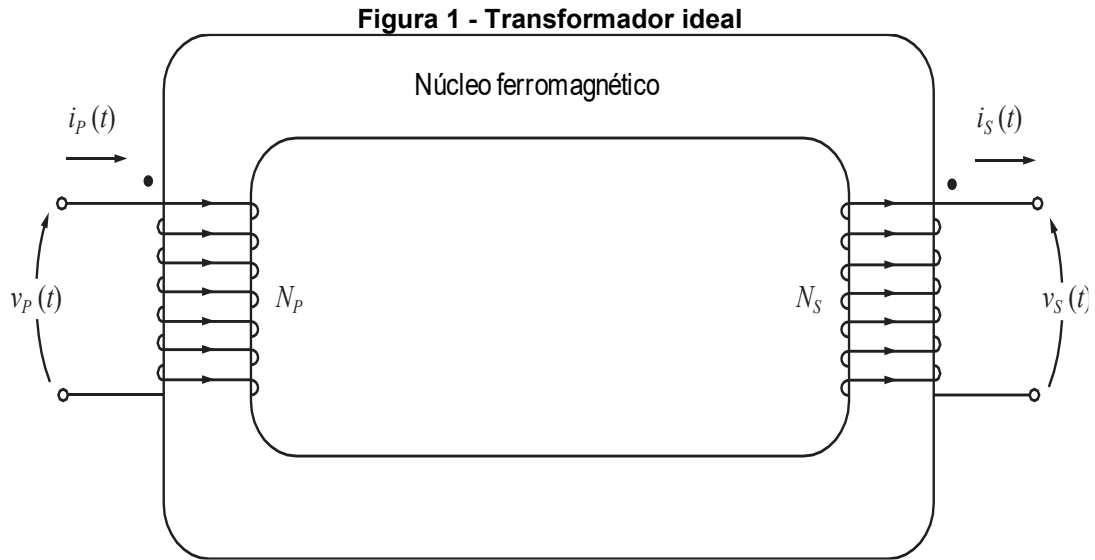
4. TRANSFORMADOR

Nesse capítulo será apresentado o princípio de funcionamento do transformador trifásico, aspectos construtivos, materiais e componentes de construção, ensaios, equacionamento do algoritmo, dimensionamento e montagem do transformador de núcleo EI.

4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Basicamente um transformador é constituído por dois ou mais circuitos elétricos acoplados por um circuito magnético comum. Se um desses circuitos elétricos (enrolamento primário) for conectado a uma fonte de tensão variável no tempo, à uma frequência e amplitude de tensão, produzirá assim um fluxo alternado que dependerá do número de espiras do primário. O fluxo mútuo induzirá assim tensão no circuito elétrico secundário. A amplitude da tensão no secundário dependerá do número de espiras do enrolamento secundário, assim como da magnitude do fluxo mútuo e da frequência. Dessa maneira é possível estabelecer vários níveis de tensão através das configurações dos números de espiras do secundário e primário (FITZGERALD, 2006).

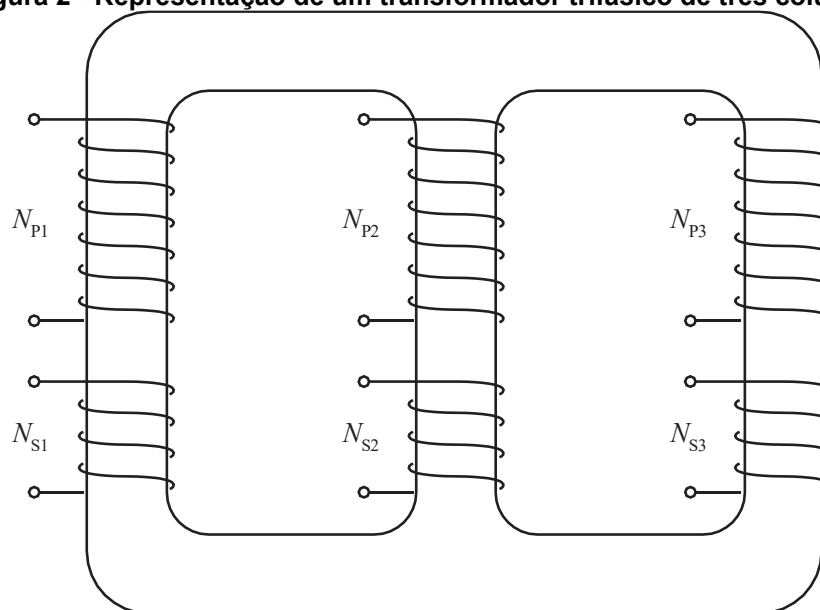
Além dos enrolamentos primário e secundário é necessário existir o acoplamento magnético entre eles. Para obter melhor eficiência geralmente é utilizado núcleo ferromagnético para o acoplamento. Na Figura 1 está representado um transformador monofásico ideal de dois enrolamentos, primário (N_p) e secundário (N_s), suas tensões V_p e V_s respectivamente, enrolados em um núcleo ferromagnético.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013)

O princípio de funcionamento do transformador trifásico é semelhante ao monofásico, pois com um conjunto de três enrolamentos primários e três enrolamentos secundários, ambos enrolados em um mesmo núcleo ferromagnético, pode ser constituído um transformador trifásico, contendo assim, seis enrolamentos em um único núcleo, mostrados na Figura 2. Essa configuração possibilita maior eficiência, menor custo de fabricação, e requer menos espaço.

Figura 2 - Representação de um transformador trifásico de três colunas



Fonte: Chapman (2013)

4.2. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Existem vários métodos construtivos de transformadores trifásicos e várias configurações utilizadas em suas confecções, porém todos eles possuem componentes em comum, como um núcleo ferromagnético e enrolamentos, tais itens estão descritos a seguir.

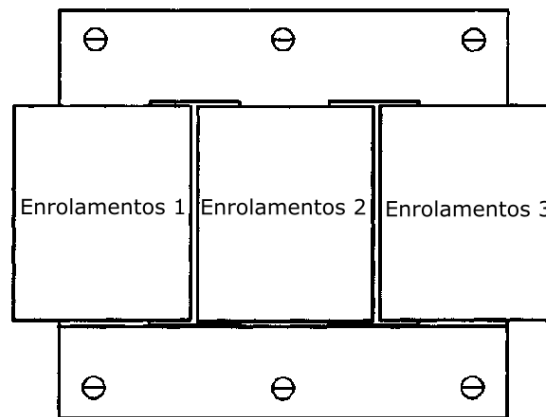
4.2.1. Núcleo

O núcleo é o circuito magnético do transformador por onde o fluxo magnético se estabelece, geralmente o núcleo do transformador é fabricado com chapas de aço silício, pois têm as propriedades desejáveis de baixo custo e baixas perdas no ferro. Para reduzir as perdas por correntes parasitas, o núcleo é fabricado com chapas de aço sílico laminadas, geralmente a espessura dessas lâminas é de 0,3556 mm (FITZGERALD, 2006).

Quando as chapas são submetidas a um tratamento químico, é aplicada sobre elas uma fina camada isolante de 0,01 mm, garantindo que as chapas quando empilhadas não permaneçam em curto, reduzindo consideravelmente as perdas no ferro (MORA, 2003). Isto ocorre porque estas chapas além de possuírem alta permeabilidade magnética também são condutoras.

Existem várias formas geométricas de núcleos, porém todos eles possuem colunas onde os enrolamentos estão dispostos. Os núcleos podem ser do tipo núcleo envolvido, onde os enrolamentos envolvem todas as colunas do núcleo, ou do tipo núcleo envolvente onde os enrolamentos envolvem a coluna central do núcleo. Na Figura 3 está representado um transformador trifásico de núcleo envolvido e na Figura 4 um transformador monofásico de núcleo envolvente.

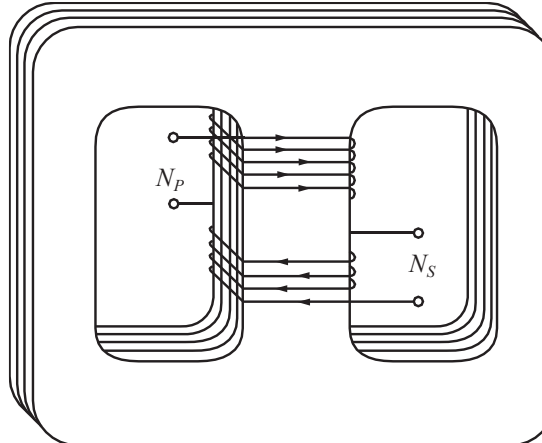
Figura 3 - Transformador trifásico de núcleo envolvido



Fonte: Adaptado de Colonel (2004)

Os transformadores trifásicos são fabricados de núcleo envolvido e todas suas colunas tem as mesmas dimensões, assim visto na Figura 3 anteriormente.

Figura 4 - Transformador monofásico de núcleo envolvente



Fonte: Chapman (2013)

Transformadores monofásicos são construídos geralmente de núcleo envolvente e sua coluna central tem dimensões maiores comparado com as outras duas.

Na construção de transformador trifásico são utilizadas várias geometrias distintas de núcleo, para esse projeto e estudo em questão, será utilizada a geometria do núcleo E I de três colunas simétricas, ilustrado na Figura 5, aplicando o método de construção de núcleo envolvido.

Figura 5 - Lâminas EI de aço silício

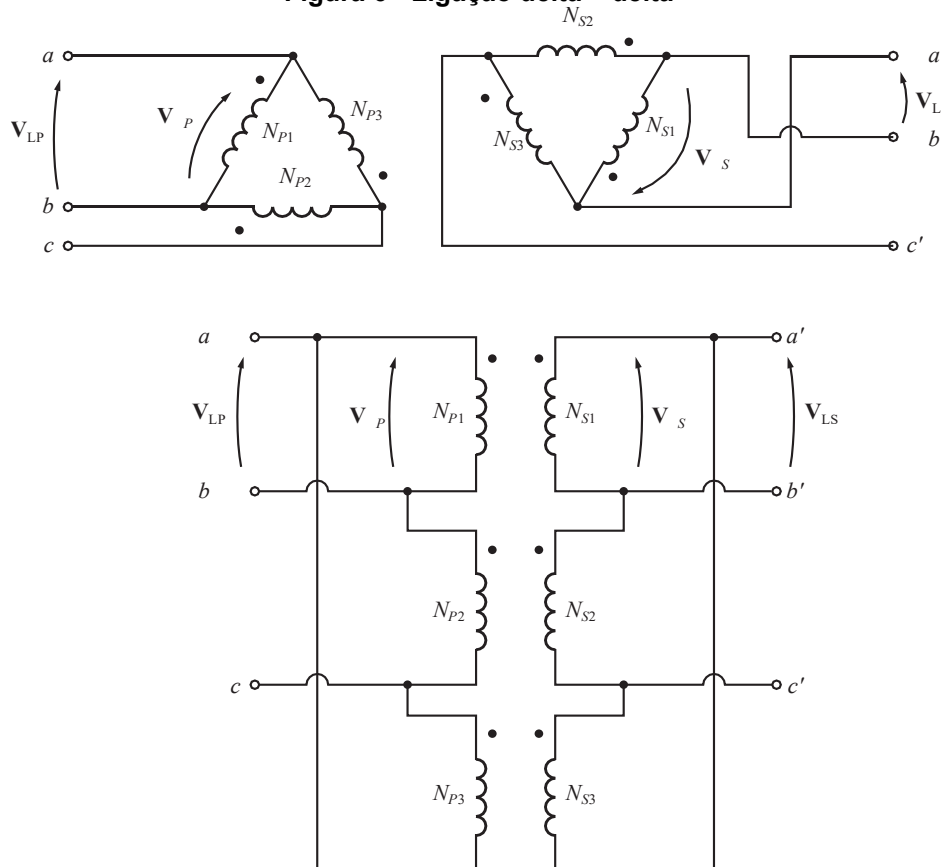
Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.2. Enrolamentos

Os enrolamentos são os circuitos elétricos do transformador, formados por fios de cobre ou alumínio isolados eletricamente com uma camada de verniz. Para confeccionar um transformador trifásico são necessários seis enrolamentos, três para o primário e três para o secundário. Cada coluna do núcleo possui enrolamento primário e secundário, formando assim duas bobinas, logo um transformador trifásico é formado por três bobinas primárias e três secundárias. Em cada bobina existem dois terminais, logo as seis bobinas tem seis terminais primários e seis secundários totalizando doze terminais. Para simplificar a nomenclatura, o enrolamento primário é chamado de enrolamento de baixa tensão (BT) e o enrolamento secundário de alta tensão (AT).

Os doze acessos aos terminais do transformador possibilitam que o primário e secundário sejam ligados independentemente nas configurações estrela (Y) ou delta (Δ) formando assim, quatro combinações possíveis. Para esse estudo em questão serão consideradas as ligações delta no primário e delta no secundário, representado na Figura 6 (CHAPMAN, 2013).

Figura 6 - Ligação delta – delta



Fonte: Chapman (2013)

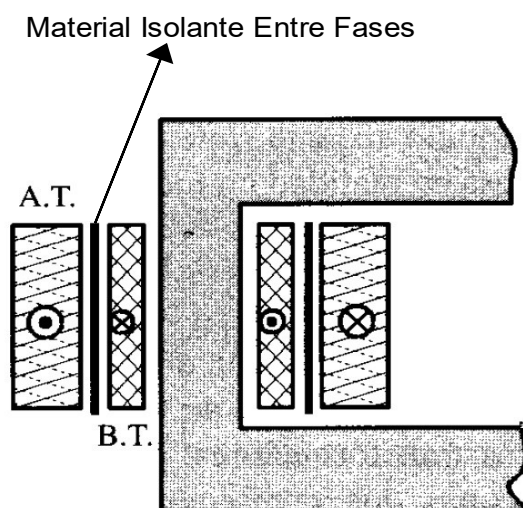
Na ligação $\Delta - \Delta$, a tensão de fase do primário (V_p) é igual a tensão de linha (V_{LP}), o mesmo vale para o secundário. Nessa configuração o transformador não apresenta deslocamento de fase e não tem problemas de cargas desequilibradas ou harmônicos. A corrente de linha é raiz de 3 vezes a corrente de fase.

Os enrolamentos também possuem fluxos dispersos. Para reduzir esse fenômeno os enrolamentos são subdivididos em seções colocadas o mais próximo possível entre si. No transformador de núcleo envolvido os enrolamentos do primário e secundário são bobinas concêntricas. Na prática a bobina de AT é sobreposta à bobina de BT, representado na Figura 7, separadas entre si por um material isolante como por exemplo: papel *Kraft*; papel *Presspahn*; óleo; papel *Thermomid*; *Polivolterm*; entres outros.

Geralmente para o isolamento entre camadas é utilizado o papel *Kraft* e para isolamento entre fases o papel *Polivolterm*, pois possui classe *F* de isolação

(isolação térmica de 155 °C). Já o papel *Kraft*, possui classe A de isolação (isolação térmica de 105 °C).

Figura 7 - Enrolamento concêntrico



Fonte: Adaptado de Mora (2003)

4.3. ENSAIOS EM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

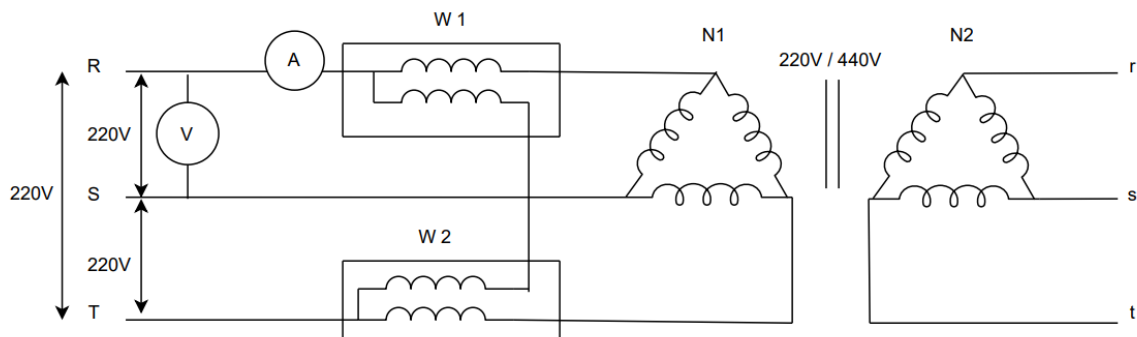
Para determinar os parâmetros do circuito equivalente de um transformador trifásico é necessário realizar dois ensaios: ensaio de circuito aberto e ensaio de curto-circuito. O procedimento é análogo ao aplicado em transformadores monofásicos. Trabalhos de Conclusão de Curso como (MARCHESE, 2018) abordam em profundidade estes ensaios e medições.

4.3.1. Ensaio a Vazio

O ensaio de circuito aberto ou ensaio a vazio, mostrado na Figura 8, é realizado com o circuito secundário em aberto, normalmente é utilizado o enrolamento de AT como circuito aberto, e conectado uma fonte de tensão nominal no circuito primário (BT). O lado de AT é aberto para fazer leituras no lado de BT por questões de segurança. No primário é conectado um voltímetro (V), amperímetro (A)

e dois wattímetros, com esses equipamentos é possível medir a tensão a vazio de linha V_{ca} , a corrente a vazio de linha I_{ca} , e potência a vazio P_{ca} que representa a perda no ferro trifásica, vale ressaltar que nesse caso as perdas no cobre são desprezíveis comparado as perdas no ferro. A leitura do voltímetro fornece a tensão de fase, a leitura do amperímetro dividida por raiz de 3 fornece a corrente de fase e a soma das leituras dos dois wattímetros fornece a perda no ferro trifásica. A perda no ferro por fase é a perda no ferro trifásica dividida por 3.

Figura 8 - Ensaio de circuito aberto



Fonte: Autoria própria (2022)

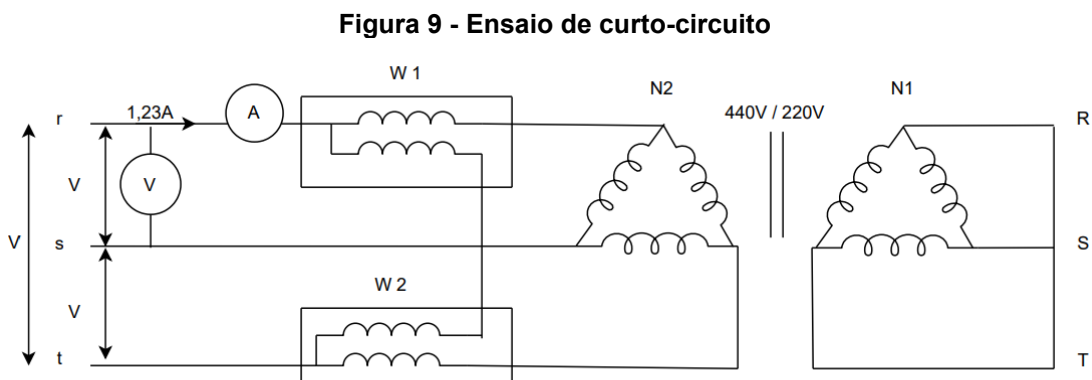
Com as leituras de tensão, corrente e perdas no ferro convertidas em grandezas de fase se obtém os parâmetros do circuito equivalente do transformador por fase. O procedimento é idêntico àquele aplicado para o transformador monofásico.

4.3.2. Ensaio de Curto-Circuito

No ensaio de curto – circuito, mostrado na Figura 9, normalmente é colocado em curto o lado de baixa tensão e aplicada uma tensão de 10 a 15% da nominal no lado de alta tensão, resultando assim na corrente nominal do transformador (FITZGERALD, 2006). O lado de BT é curto-circuitado por questões de segurança.

Para o ensaio de curto-circuito são utilizados um voltímetro, um amperímetro e dois wattímetro, para a medição da tensão de curto-circuito de linha V_{cc} , corrente

de curto-circuito de linha I_{cc} e potência de curto-circuito de linha P_{cc} , que é a perda total no cobre trifásica. A leitura do voltímetro fornece a tensão de fase, a leitura do amperímetro dividida por raiz de 3 fornece a corrente de fase e a soma das leituras dos dois wattímetros fornece a perda no cobre trifásica. A perda no cobre por fase é a perda no cobre trifásica dividida por 3, vale ressaltar que nesse caso as perdas no ferro são desprezíveis comparado as perdas no cobre.



Fonte: Autoria própria (2022)

Com as leituras de tensão, corrente e perdas no cobre convertidas em grandezas de fase se obtém os parâmetros do circuito equivalente do transformador por fase. O procedimento é idêntico àquele aplicado para o transformador monofásico.

4.4. PRINCIPAIS ETAPAS DO ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo será dimensionado um transformador trifásico elevador de tensão de núcleo EI. O dimensionamento e equacionamento utilizado nesse trabalho teve como base o Trabalho de Conclusão de Curso de (MARCHESE, 2018) e na literatura de (COLONEL, 2004).

O dimensionamento terá como objetivo projetar um transformador trifásico elevador de tensão, delta – delta, com os seguintes parâmetros: tensão de entrada V_1 de 220 V; tensão de saída V_o de 440 V; corrente de saída I_o de 1,23 A;

frequência f de 60 Hz; indução máxima B_m de 1,18 T, rendimento $rend$ de 95%; regulação de tensão $alfa$ de 5%; elevação de temperatura máxima Tr de 55 °C e fator de ocupação da janela do núcleo Ku de 0,4.

Inicialmente a potência de saída do transformador P_o é obtida pela seguinte expressão:

$$P_o = V_o * I_o [W] \quad (1)$$

Da expressão (1) é obtida a equação da potência total do transformador:

$$P_t = P_o * ((1 / Rend) + 1) [W] \quad (2)$$

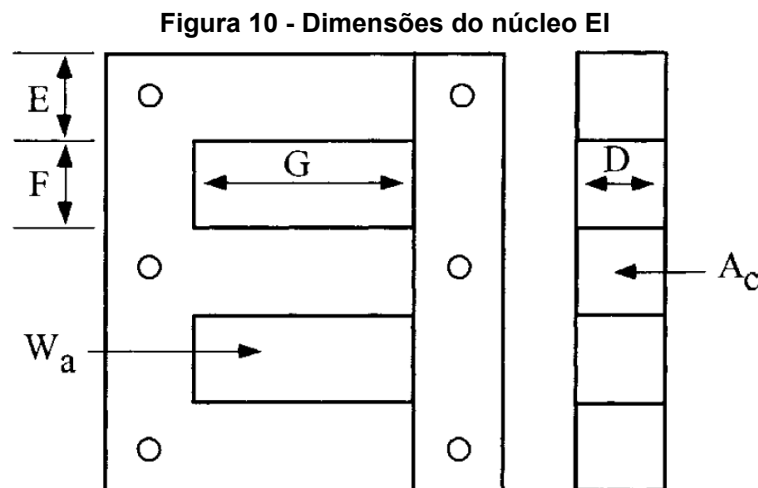
Para uma onda senoidal é considerada a constante K_f de 4,44. As condições elétricas são dadas por:

$$K_e = 0,145 * K_f^2 * f^2 * B_m^2 * 10^{-4} \quad (3)$$

Através de (3) é encontrada a constante da geometria do núcleo K_g , utilizada para a escolha das dimensões do núcleo EI, dada pela equação:

$$K_g = P_t / (2 * K_e * alfa * 100) [cm^5] \quad (4)$$

Com o valor calculado de K_g são encontradas as dimensões do núcleo EI. A Figura 10 mostra estas dimensões.



Fonte: Colonel (2004)

O número de espiras do enrolamento primário N_p , onde V_{pLinha} é igual a tensão de entrada, é calculado pela equação:

$$N_p = V_{pLinha} * 10^4 / (K_f * B_m * f * A_c) [Espiras] \quad (5)$$

Em que A_c é a área do núcleo em cm^2 .

A corrente de linha do primário é calculada por:

$$I_{pLinha} = P_o / (3 * V_{pLinha} * Rend) [A] \quad (6)$$

A corrente de fase primária é dada pela equação:

$$I_{pFase} = I_{pLinha} / \sqrt{3} [A] \quad (7)$$

Para calcular a área do fio desencapado do primário A_{wpb} , é utilizada a constante de ocupação da janela do primário K_{up} de 0,2, onde seu valor é a metade de K_u , pois o enrolamento primário ocupará metade da janela. A área do condutor é calculada por:

$$A_{wpb} = K_{up} * W_a / (4 * N_p) [cm^2] \quad (8)$$

Em que W_a é a área da janela do núcleo em cm^2 .

Com o valor de A_{wpb} é utilizada a tabela do Anexo A para escolher qual condutor será aplicado. Caso o valor calculado de A_{wpb} não seja exatamente igual ao da tabela, o próximo maior valor da área do fio desencapado é adotado.

Para calcular a resistência do enrolamento primário é utilizado a equação:

$$R_p = MLT * N_p * microOhmsporcmp * 10^{-6} [\Omega] \quad (9)$$

Em que MLT é o comprimento médio da espira em cm e $microOhmsporcmp$ é micro Ohms por cm do fio primário.

As perdas no cobre dos enrolamentos primários são calculadas por:

$$P_p = 3 * I_{pFase}^2 * R_p [W] \quad (10)$$

Para calcular o número de espiras no secundário é utilizada a equação:

$$N_s = (N_p * V_s / V_{pLinha}) * (1 + \alpha) [Espiras] \quad (11)$$

Em que V_s é igual a V_o .

Para calcular a área do fio nu do secundário A_{wsb} , é utilizado a constante de ocupação da janela do secundário K_{us} de 0,2, onde seu valor é a metade de K_u , pois o enrolamento secundário ocupará metade da janela. A área do condutor é calculada por:

$$A_{wsb} = K_{us} * W_a / (4 * N_s) [cm^2] \quad (12)$$

Com o valor obtido pela equação (12) e utilizando a tabela do Anexo A é encontrado o condutor de cobre para os enrolamentos secundários.

Dos valores encontrados na tabela do Anexo A e do resultado da equação (11) é calculada a resistência do enrolamento secundário:

$$R_s = MLT * N_s * \text{microOhmsporcms} * 10^{-6} [\Omega] \quad (13)$$

A corrente de linha no secundário I_{sLinha} é igual a I_o e a corrente de fase é dada por:

$$I_{sFase} = I_{sLinha} / \sqrt{3} [A] \quad (14)$$

O cálculo das perdas totais no cobre para os três enrolamentos secundários é dado por:

$$P_s = 3 * I_{sFase}^2 * R_s [W] \quad (15)$$

Com os valores obtidos pelas expressões (10) e (15), são calculadas as perdas totais no cobre:

$$P_{cu} = P_p + P_s [W] \quad (16)$$

Da equação (16) e com o valor de P_o é calculada a regulação de tensão:

$$\text{alfacalculado} = P_{cu} / P_o [W] \quad (17)$$

Com os valores tabelados dos coeficientes k , m e n , calculam-se as perdas no ferro P_{fe} , através das equações:

$$\text{wattsporKg} = K * f^M * B_m^N [W/Kg] \quad (18)$$

$$P_{fe} = \text{wattsporKg} * W_{tfe} [W] \quad (19)$$

Em que W_{tfe} é o peso do núcleo em Kg.

A perda total do transformador é dada por:

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe} [W] \quad (20)$$

O rendimento do transformador é calculado por:

$$\text{rendCalc} = P_o / (P_o + P_{soma}) \quad (21)$$

As perdas por unidade de área são calculadas pela expressão:

$$P_{porArea} = P_{soma} / A_t [W / \text{cm}^2] \quad (22)$$

Em que A_t é área requerida para dissipar calor em cm^2 .

Com a equação (22) é calculado o aumento de temperatura:

$$T_{\text{calculado}} = 450 * P_{\text{porArea}}^{0,826} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (23)$$

Após a realização de todos os cálculos de dimensionamento, os parâmetros e valores obtidos do transformador trifásico estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados do dimensionamento do transformador trifásico

| DESCRIÇÃO | SIMBOLOGIA | VALOR | UNIDADE DE MEDIDA |
|-----------------------------------|------------------------|--------|-------------------|
| Número de espiras no primário | N_p | 512 | Espiras |
| Número de espiras no secundário | N_s | 1075 | Espiras |
| Área do fio no primário | A_{wpbno} | 0,0032 | cm^2 |
| Área do fio no secundário | A_{wsbno} | 0,0016 | cm^2 |
| Bitola do condutor primário | AWGP | 22 | AWG |
| Bitola do condutor secundário | AWGS | 25 | AWG |
| Regulação de tensão calculado | alfacalculado | 7,85 | % |
| Rendimento calculado | rendCalc | 91,92 | % |
| Elevação de temperatura calculado | $T_{\text{calculado}}$ | 32,84 | $^\circ\text{C}$ |
| Potência de saída | P_o | 541,2 | W |
| | F | 3,81 | cm |
| | E | 3,81 | cm |
| Dimensões do Núcleo EI | G | 9,525 | cm |
| | D | 3,81 | cm |

Fonte: Autoria própria (2022)

4.5. MONTAGEM DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

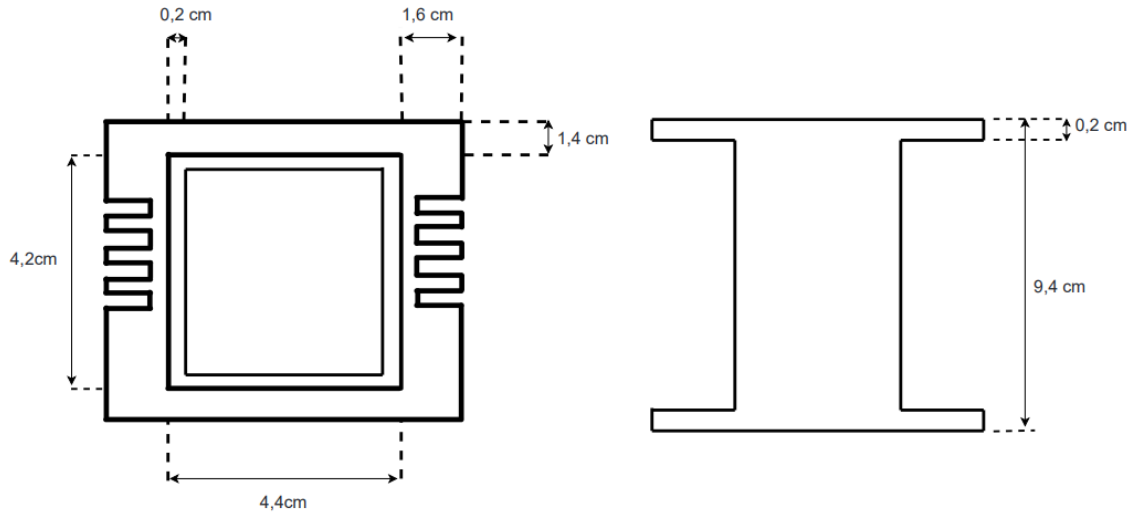
Neste capítulo serão apresentados os métodos e processos de montagem do transformador trifásico.

4.5.1. Confeção dos carretéis

Com as dimensões calculadas do núcleo de ferro silício é possível projetar e fabricar os carretéis que servirão de suporte para os enrolamentos primário e secundário. O material utilizado para a fabricação será de plástico modelável com espessura de 2 mm com classe F de temperatura, atendendo os parâmetros de projeto de elevação de temperatura T_r . Serão necessários fabricar três carretéis utilizando uma impressora 3D.

Através de uma ferramenta de desenho gratuita *Draw.io* foram projetados os carretéis com as dimensões mostradas na Figura 11.

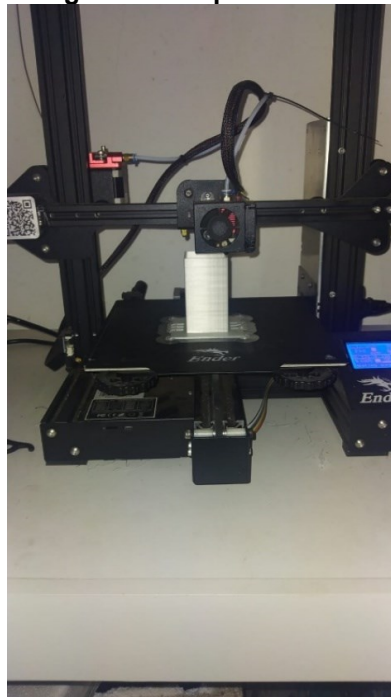
Figura 11 - Dimensões dos carretéis



Fonte: Autoria própria (2022)

Com as medidas estabelecidas foram passadas as dimensões para a impressora 3D fabricar os carretéis. A Figura 12 mostra a impressora modelando um carretel. A impressora 3D foi emprestada por um amigo.

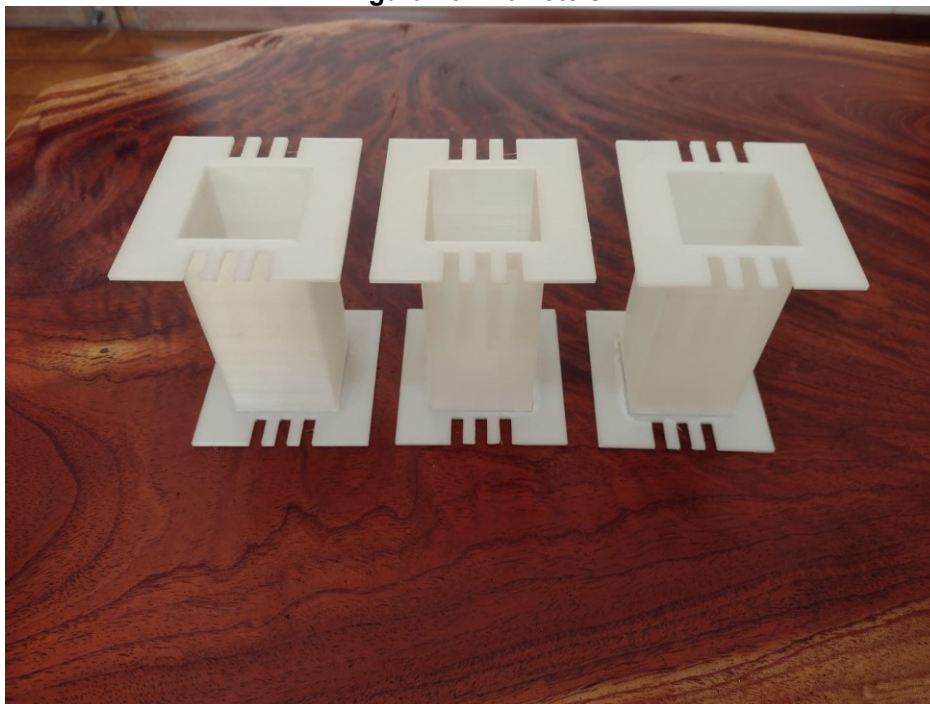
Figura 12 - Impressora 3D



Fonte: Autoria própria (2022)

Após o tempo de dez horas para a fabricação de cada carretel o resultado desse processo está mostrado na Figura 13. As ranhuras nos carretéis servem para conduzir o começo e o fim das bobinas para fora dos carretéis, possibilitando o acesso posteriormente.

Figura 13 - Carretéis



Fonte: Autoria própria (2022)

4.5.2. Enrolamentos

Com o auxílio de uma bobinadeira automática com controle de velocidade mostrada na Figura 14, foram enroladas nos três carretéis as bobinas primárias e secundárias do transformador. Serão 512 voltas para os primários e 1075 voltas para os secundários.

Figura 14 - Bobinadeira

Fonte: Aatoria própria (2022)

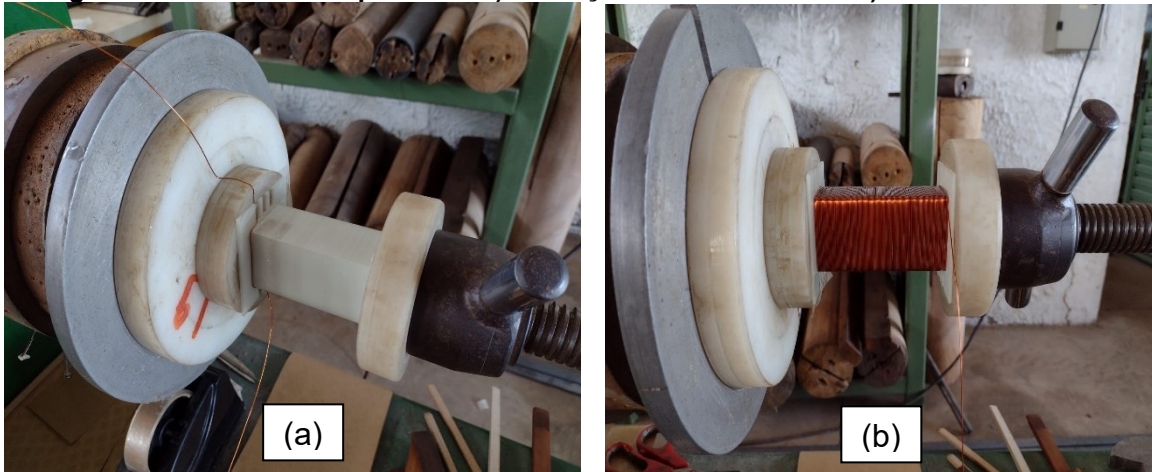
Levando em consideração o número de espiras dos enrolamentos primários e secundários e o perímetro dos carretéis, será utilizado aproximadamente 1,0 Kg de fio AWG22 para os primários e 1,24 Kg de fio AWG25 para os secundários, já considerando uma margem de segurança para que não falte material. Os condutores de cobre esmaltados, mostrados na Figura 15, foram adquiridos na empresa Valdecir Boeno Eletromotores rebobinagem de motores elétricos.

Figura 15 - Fios de cobre esmaltados

Fonte: Aatoria própria (2022)

Foi iniciado o processo de bobinagem pelo enrolamento primário, onde o condutor esmaltado AWG22 foi fixado na extremidade esquerda do carretel como mostra a Figura 16a, enrolando o fio da esquerda para direita até chegar ao final do carretel formando a primeira camada do primário, como mostra a Figura 16b.

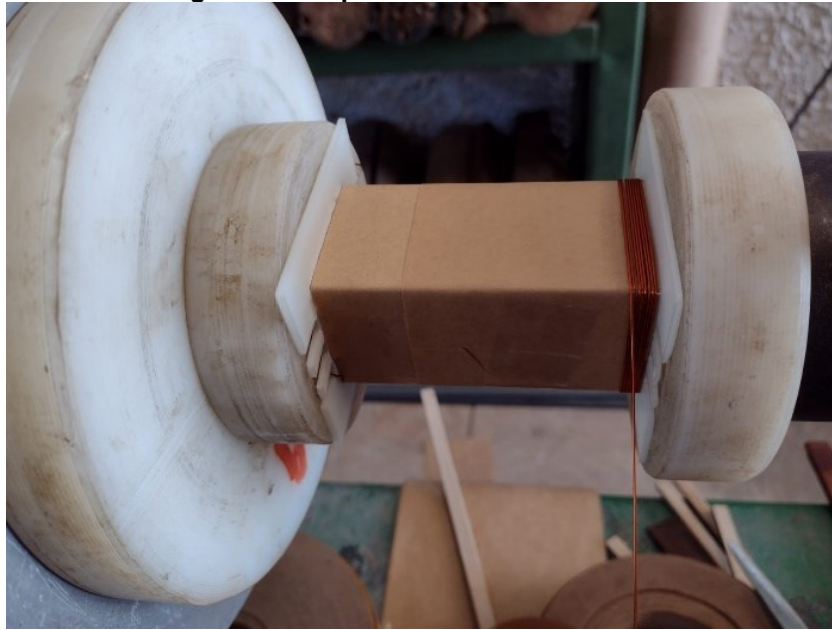
Figura 16 - Enrolamento primário: a) Começo do enrolamento e b) Primeira camada



Fonte: Autoria própria (2022)

Antes de começar a segunda camada foi colocado o papel isolante *Kraft* com 0,10 mm de espessura, classe A de isolamento de temperatura mostrado na Figura 17, para fazer a isolação entre camadas. Além da função de isolação, o papel acomoda melhor as linhas de fios enroladas no carretel, mantendo a bobinagem homogênea e as linhas mais próximas possível entre si, conseguindo assim, o maior número de voltas em cada camada. Dessa maneira ao chegar ao final do processo de bobinagem, o enrolamento primário não terá ocupado espaço excessivo no carretel.

Figura 17 - Papel isolante entre camadas



Fonte: Autoria própria (2022)

O processo e método de bobinagem do enrolamento segue até o fim das 512 voltas no primário. A Figura 18 mostra o final da bobinagem do enrolamento primário com os acabamentos de fixação do terminal do condutor com papel isolante *Polivolterm* classe *F* de temperatura.

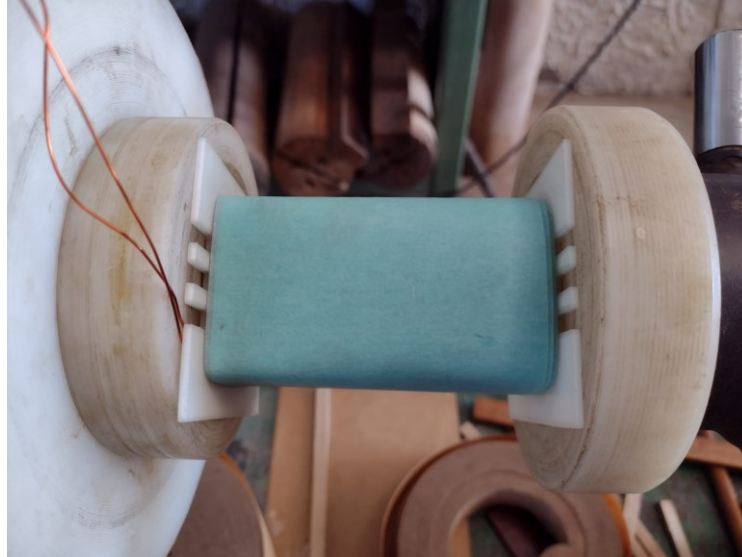
Figura 18 - Enrolamento primário



Fonte: Autoria própria (2022)

Para começar a bobinagem do enrolamento secundário foram enroladas três camadas de papel isolante *Polivolterm* de 0,23 mm de espessura na bobina primária, para fazer a isolação entre fases, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Isolação entre fases



Fonte: Aatoria própria (2022)

Os papéis isolantes são cortados e fixados de maneira com que a camada de baixo fique totalmente isolada da camada de cima, tanto para o isolamento entre camadas como entre fases. Como os materiais isolantes são adquiridos em rolos, mostrados na Figura 20, é possível obter as medidas exatas do corpo do carretel, que nesse caso é de 9,0 cm.

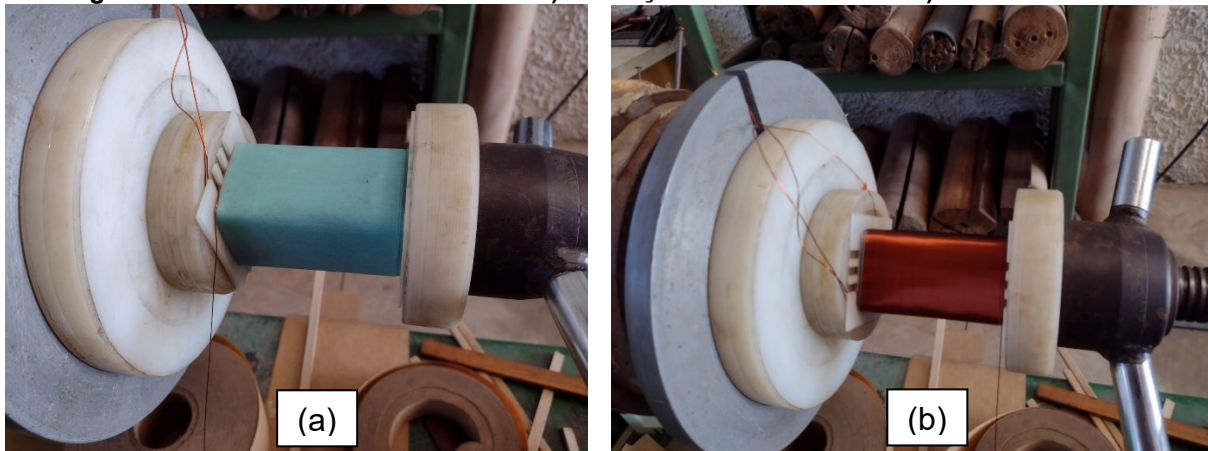
Figura 20 - Papéis isolantes



Fonte: Aatoria própria (2022)

Após a fixação do isolante é iniciado o processo de bobinagem do enrolamento secundário, ilustrado na Figura 21. O início da espira deve ser fixado do lado oposto das ranhuras do carretel, assim o primário entra de um lado e o secundário sairá do outro lado. O processo de bobinagem do secundário deve ser exatamente igual ao do primário, começando da esquerda para a direita e girando o eixo da bobinadeira para o mesmo sentido adotado anteriormente, que nesse caso foi o sentido horário, dessa maneira não terá fluxo magnético oposto.

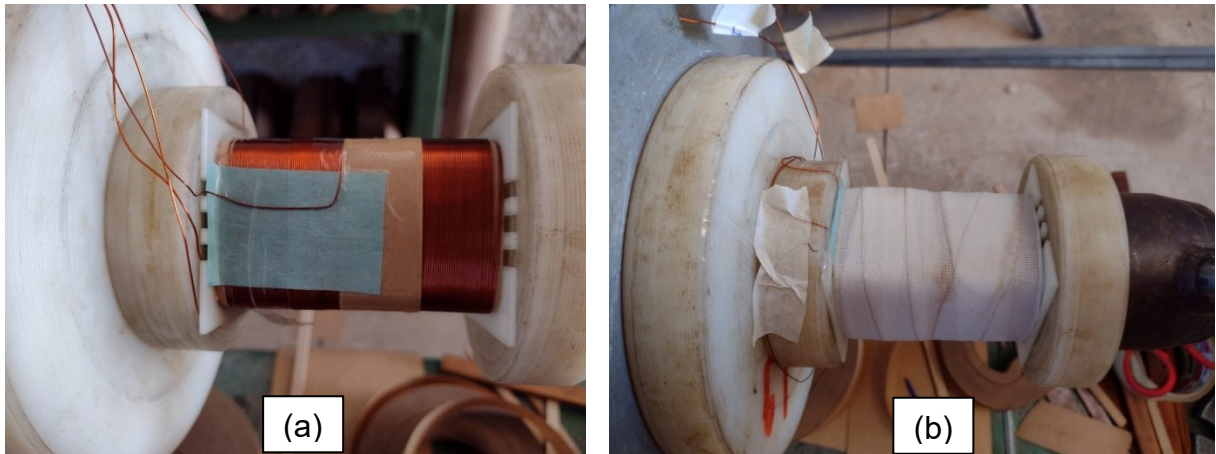
Figura 21 - Enrolamento secundário: a) Começo do enrolamento e b) Primeira camada



Fonte: Autoria própria (2022)

O processo de bobinagem do enrolamento secundário segue de maneira similar ao enrolamento primário, sempre colocando isolamento entre camadas e no final das 1075 voltas. A Figura 22a mostra os acabamentos de fixação do terminal do enrolamento secundário e a Figura 22b mostra o processo de finalização da isolamento da bobina secundária com cadarço para amarração, material composto de algodão com classe A de isolamento de temperatura.

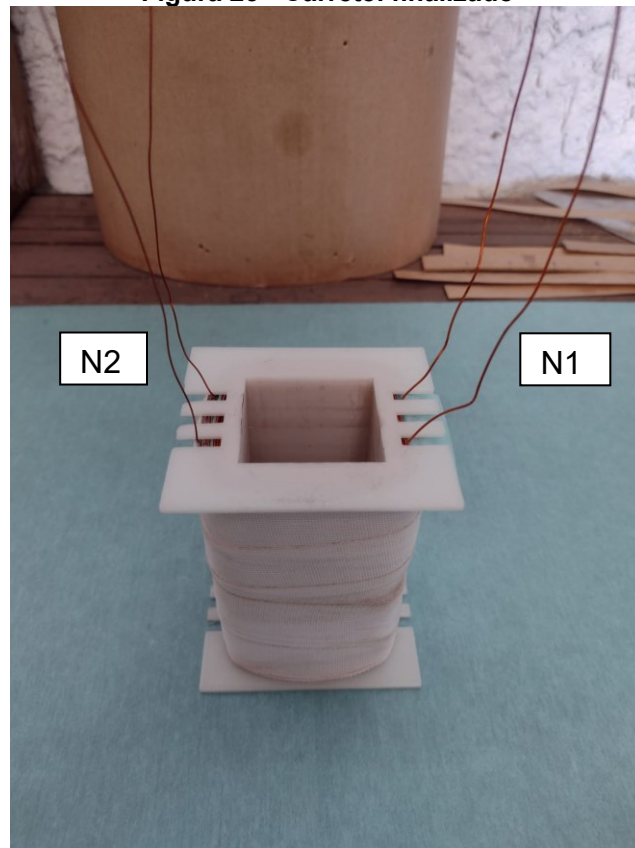
Figura 22 - Enrolamento secundário: a) Bobina secundária e b) Isolamento da bobina secundária



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 23 mostra o carretel finalizado com as bobinas primária $N1$ e secundária $N2$.

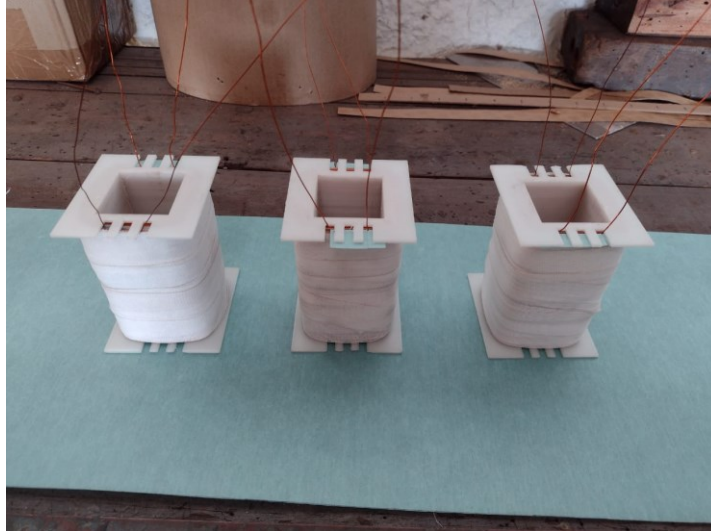
Figura 23 - Carretel finalizado



Fonte: Autoria própria (2022)

Como o transformador é trifásico foram confeccionados três carretéis, seguindo os mesmos processos de fabricação. A Figura 24 mostra os carretéis finalizados.

Figura 24 - Carretéis das três fases do transformador



Fonte: Autoria própria (2022)

Após a etapa de fabricação, os carretéis foram colocados em um banho de verniz, mostrado na Figura 25, para aumentar a isolação do cadarço para amarração. Como o material é fabricado de fibras de algodão, o verniz penetra, sela e enrijece o material, subindo a classe de isolação de temperatura para *F*. O verniz também penetra entre os espaços das bobinas, e dos materiais como um todo, enrijecendo e selando todas as isolações.

Figura 25 - Banho de verniz



Fonte: Autoria própria (2022)

A marca e o verniz utilizado pode ser visto na Figura 26. Todo o processo de montagem, alguns materiais usados nesse projeto, como o verniz, assim como a estrutura do espaço utilizado e bobinadeira, foram cedidos pela empresa Patoeste Transformadores.

Figura 26 - Verniz



Fonte: Autoria própria (2022)

Os carretéis foram deixados submersos em verniz por aproximadamente 30 minutos e retirados para secar em temperatura ambiente por 12 horas. A Figura 27 mostra o processo finalizado de fabricação dos carretéis do transformador trifásico.

Figura 27 - Carretéis finalizados

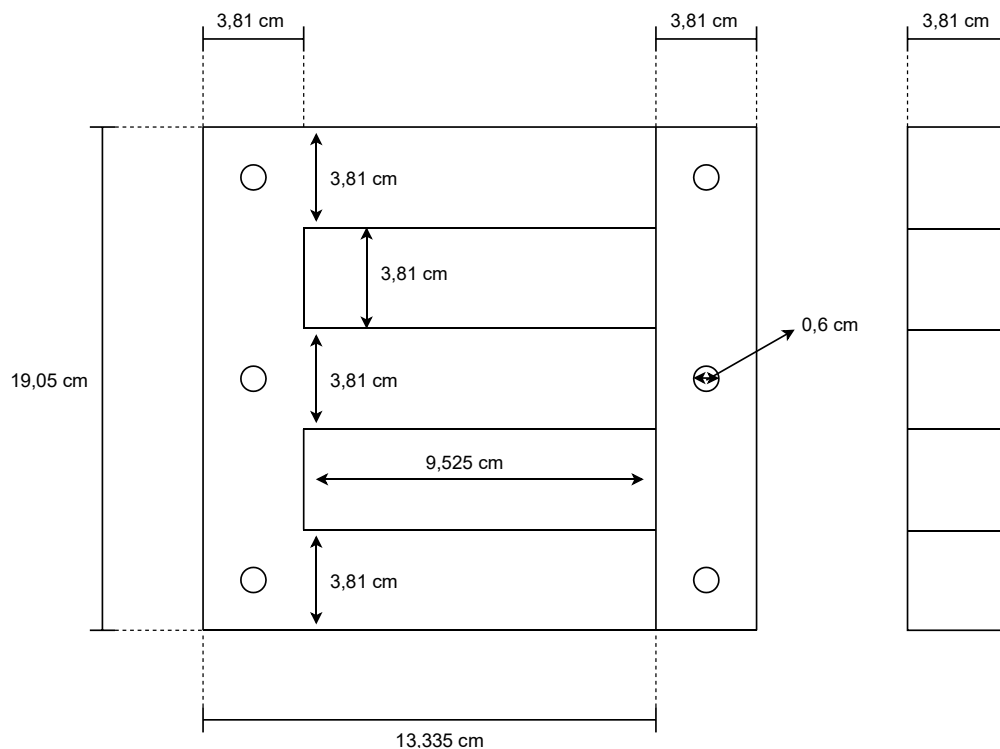


Fonte: Autoria própria (2022)

4.5.3. Núcleo

Com as dimensões do núcleo já calculadas e através de uma ferramenta de desenho gratuita *Draw.io*, foi desenhado o núcleo, visto na Figura 28, e enviado o desenho para a empresa Flessak realizar os cortes das chapas. Conforme as dimensões projetadas e considerando um fator de segurança, foi solicitada a fabricação de 105 chapas de aço silício E e 105 chapas I com espessura de 0,5 mm.

Figura 28 - Dimensões das chapas EI de aço silício

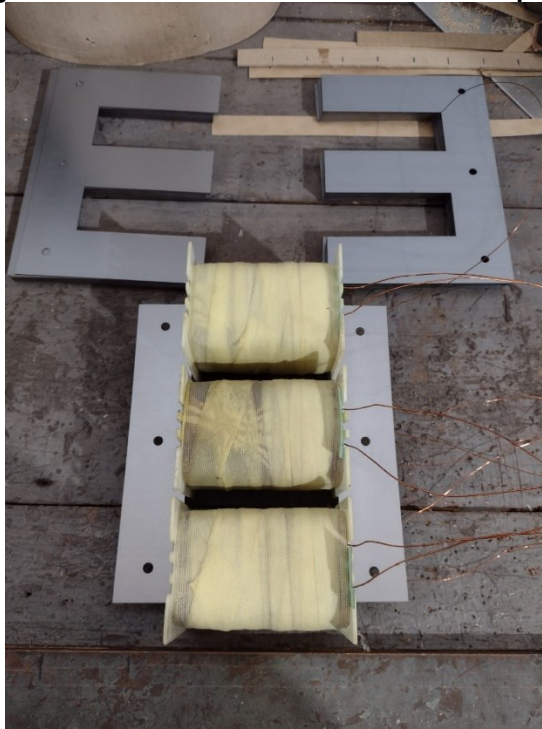


Fonte: Autoria própria (2022)

Considerando que a espessura do material é de 0,5 mm será necessário o empilhamento de aproximadamente 76 chapas de aço silício para fechar os 3,81 cm de espessura do transformador.

Para realizar o fechamento do núcleo foi empilhada uma chapa E de cada lado por vez, começando da esquerda depois pela direita e assim sucessivamente até atingir a espessura desejada, exemplificado na Figura 29.

Figura 29 - Fechamento do núcleo com chapas E



Fonte: Aatoria própria (2022)

Após empilhar todas as chapas é necessário preencher todos os espaços vazios entre as chapas E com chapas I. Foram preenchidos os dois lados do núcleo conforme exemplificado na Figura 30.

Figura 30 - Fechamento do núcleo com chapas I



Fonte: Aatoria própria (2022)

Ao finalizar o processo de fechamento do núcleo foi averiguado através de um paquímetro digital, mostrado na Figura 31a, se o empilhamento das chapas corresponde com o dimensionado em projeto. A medição mostra que ao finalizar o fechamento o núcleo ficou com 3,814 cm de espessura, correspondendo assim, ao projetado de 3,81 cm. A Figura 31b mostra o fechamento completo das chapas do transformador.

Figura 31 - Núcleo: a) Medição do empilhamento e b) Finalização do fechamento



Fonte: Autoria própria (2022)

Finalizado a medição e o fechamento do núcleo, o transformador passou pelo processo de extração de umidade em uma estufa com temperatura constante de 100 °C por aproximadamente duas horas. Em seguida foi retirado da estufa e deixado esfriar.

Para que o núcleo do transformador não fique exposto e as chapas soltas, foi construída uma estrutura de fixação com barras de aço galvanizado e nelas foram parafusados pezinhos de apoio na parte inferior e parafusos de suporte na parte superior, onde foi fixada uma chapa de madeira que serviu de suporte para os bornes de ligação. Toda a estrutura é segurada por parafusos que transpassam o núcleo e para evitar que os parafusos não fiquem em curto com o núcleo foi colocado um material isolante nas perfurações, visto na Figura 32.

Figura 32 - Isolação da perfuração

Fonte: Autoria própria (2022)

Nos parafusos de rosca com 4 mm para a fixação da estrutura, foi inserido junto com as arruelas, papelão cortado em formato circular, mostrado na Figura 33, para que fique totalmente isolado das partes condutoras, não entrando com contato com as barras galvanizadas.

Figura 33 - Parafusos isolados

Fonte: Autoria própria (2022)

Para que as barras de aço galvanizado não entrem em contato com as chapas do núcleo, foi colocado o papel isolante *Polivolterm*, mostrado na Figura 34, isolando totalmente as partes condutoras da estrutura de fixação.

Figura 34 - Papel para isolar as barras galvanizadas



Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim foram fixados os bornes na placa de madeira e o processo finalizado da estrutura do transformador está mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Estrutura finalizada



Fonte: Autoria própria (2022)

O transformador trifásico possui doze terminais de acesso, seis primários e seis secundários, possibilitando algumas configurações de ligação, para esse projeto em questão, será utilizada a ligação delta – delta. Com a estrutura pronta a ligação delta no primário e delta no secundário foi realizada. Para esse processo foram utilizados os materiais: Espaguete Isolante; Tubo Termo Retrátil; condutor de cobre de 1,5 mm² e terminal Olhal para ligar os condutores nos bornes. A Figura 36 mostra as ligações finalizadas.

Figura 36 - Ligação delta finalizada



Fonte: Autoria própria (2022)

Para verificar se as ligações foram executadas da maneira correta, foi instalado o equipamento de medição de relação de transformação *TTR*, cedido pela empresa Patoeste Transformadores. Foram verificadas as medidas de todos os conjuntos de bobinas e todas deram o mesmo resultado de medição, mostrado na Figura 37, aprovando assim, as ligações realizadas.

Figura 37 - Medição da relação de transformação



Fonte: Autoria própria (2022)

Com o número que aparece no medidor de 2,108, é possível verificar se os níveis de tensão estão de acordo com o projetado, basta multiplicá-lo pela tensão correspondente ao primário ($220 * 2,108 = 463,73V$). O valor obtido está dentro do esperado levando em consideração a regulação de tensão de 5% ($440 + 22 = 462V$).

Após as ligações delta – delta e medições da relação de transformação, o protótipo foi finalizado e seu resultado está mostrado na Figura 38.

Figura 38 - Protótipo do transformador



Fonte: Autoria própria (2022)

4.5.4. Materiais utilizados

Os materiais utilizados na montagem do transformador trifásico foram adquiridos com recursos próprios, onde os itens de maior valor são os condutores de cobre esmaltados e as chapas de aço silício. Alguns materiais usados foram doados pela empresa Patoeste Transformadores, assim como o espaço e a estrutura para a fabricação do protótipo, reduzindo os custos do projeto. Na Tabela 2 estão descritos os materiais usados no transformador que tiveram custos. Os itens que não estão descritos e foram utilizados no projeto são os doados pela empresa.

Tabela 2 – Materiais utilizados no transformador trifásico

| DESCRIÇÃO | QUANTIDADE | VALOR (R\$) |
|---------------------------------------|--------------|---------------|
| Chapas EI | 105 unidades | 548,00 |
| Fio AWG 25 | 1,240 Kg | 160,00 |
| Fio AWG 22 | 1,039 Kg | 145,00 |
| Bornes p/ Plug Banana | 6 unidades | 10,32 |
| Terminal Olhal 1,5 mm ² | 6 unidades | 4,02 |
| Fio flexível 1,5 mm ² | 2 m | 3,00 |
| Tubo Termo Retrátil 4 mm ² | 2 m | 4,00 |
| Carretéis de Plástico | 3 unidades | 60,00 |
| Parafuso 4 mm | 6 unidades | 3,30 |
| Arruelas e Porcas | 12 unidades | 3,93 |
| TOTAL | | 941,57 |

Fonte: Autoria própria (2022)

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no protótipo do transformador trifásico.

O teste de relação de transformação já foi comprovado através das medições obtidas pelo equipamento *TTR*.

5.1. ENSAIO DE CONTINUIDADE DO TRANSFORMADOR

Com o ensaio de continuidade é possível verificar se existe curto-circuito entre fases, entre fios nas espiras dos enrolamentos primário e secundário ou entre enrolamentos e núcleo. Este teste também permite verificar se houve rompimento do fio durante a bobinagem.

A possibilidade de um curto-circuito é devido ao rompimento da isolação do cobre esmaltado, danos no carretel, fazendo com que as espiras entrem em contato com o núcleo, ou o rompimento do papel isolante entre fases.

Devido ao fato de existir isolação entre camadas, a possibilidade de um curto-circuito entre fios da bobina primária ou secundária diminui significativamente.

Para realizar os testes foi utilizado um multímetro no modo de continuidade e com as ponteiros foram verificadas as bobinas das três fases e o núcleo do transformador.

No transformador trifásico as bobinas das três fases estão interligadas, formando assim a ligação delta, assim como as bobinas das fases do secundário, logo é esperado que no teste de continuidade tanto a fase R com S, R com T e T com S, estejam interligadas, aprovando a continuidade entre as medições.

O protótipo foi aprovado nos testes de continuidade. Na Tabela 3 o “X” representa onde houve continuidade nas medições.

Tabela 3 – Teste de continuidade do transformador trifásico

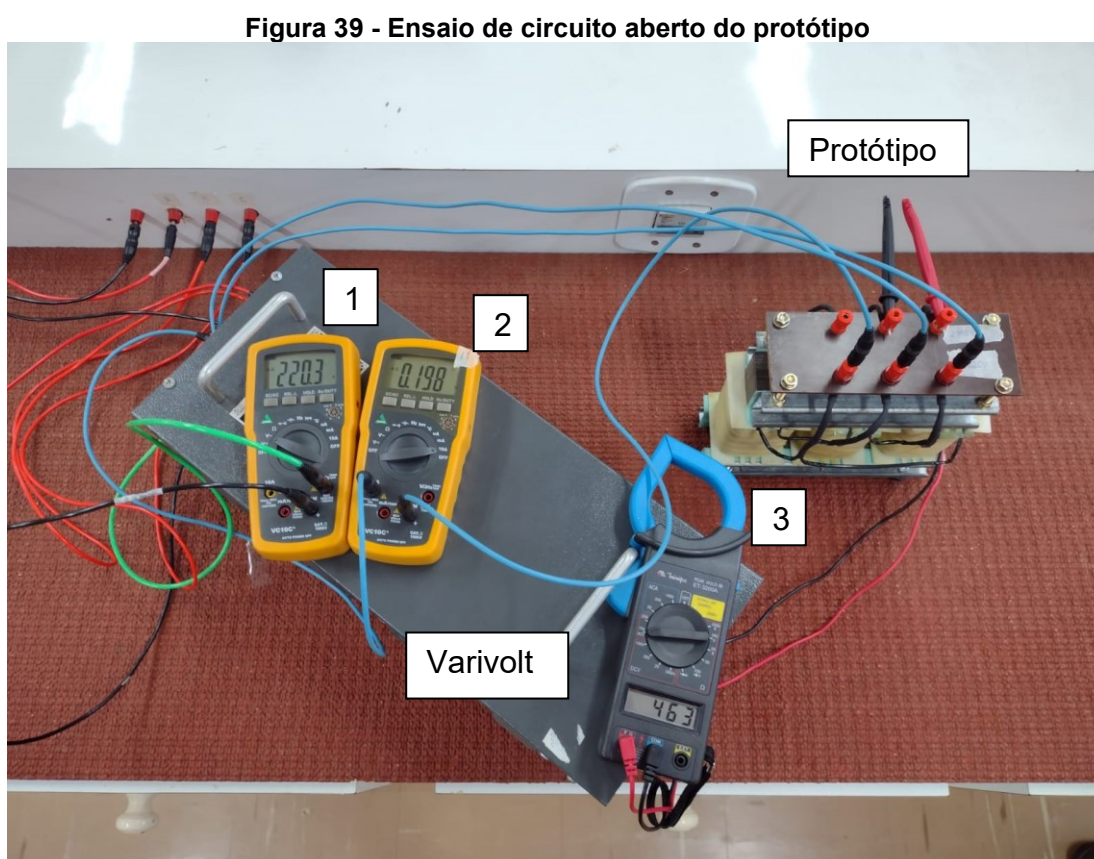
| ENROLAMENTOS | FASES | PRIMÁRIO | | | SECUNDÁRIO | | | CARÇAÇA |
|--------------|-------|----------|---|---|------------|---|---|---------|
| | | R | S | T | r | s | t | |
| Primário | R | | X | X | | | | |
| | S | X | | X | | | | |
| | T | X | X | | | | | |
| Secundário | r | | | | | X | X | |
| | s | | | | X | | X | |
| | t | | | | X | X | | |

Fonte: Autoria própria (2022)

5.2. ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

No ensaio de circuito aberto do transformador trifásico, foi conectado o primário a uma fonte de tensão variável até atingir a tensão nominal de entrada de 220 V e medida a tensão de saída secundária. Para a realização do ensaio foram utilizados três multímetros e um *varivolt*.

Como pode ser visto na Figura 39, o multímetro 1 mostra a tensão primária, o multímetro 2 mostra a corrente primária e o multímetro 3 informa a tensão secundária.



Fonte: Autoria própria (2022)

Na Tabela 4 estão descritas as medidas realizadas no ensaio de circuito aberto.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de circuito aberto

| ENROLAMENTOS | VRS (V) | VST (V) | VRT (V) | IR (A) | IS (A) | IT (A) |
|--------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Primário | 220,2 | 220,2 | 220,2 | 0,198 | 0,158 | 0,164 |
| Secundário | 463 | 469 | 467 | | | |

Fonte: Autoria própria (2022)

Após as medidas realizadas, nota-se que o maior valor averiguado de tensão de linha no secundário, foi a VST, o motivo desse valor é devido a oscilação da rede de alimentação e também a possibilidade que um dos enrolamentos entenda com um número de espiras a mais.

Nenhuma das medidas de tensão foi de 440V, ou próximo disso, pois existe a regulação de tensão de aproximadamente 5% estipulado em projeto ($440 + 22 = 462$ V). Esta tensão secundária de circuito aberto superior a 440 V é algo benéfico pois em plena carga a tensão diminui, assim o transformador conseguiria entregar a tensão nominal mesmo em plena carga.

5.3. ENSAIO COM CARGA

Para realizar o ensaio com carga, foi ligado ao secundário do transformador um motor de indução trifásico com seus dados de placa mostrados na Figura 40. Para ligar o motor em 440V foi necessário ligar os doze terminais do motor em delta.

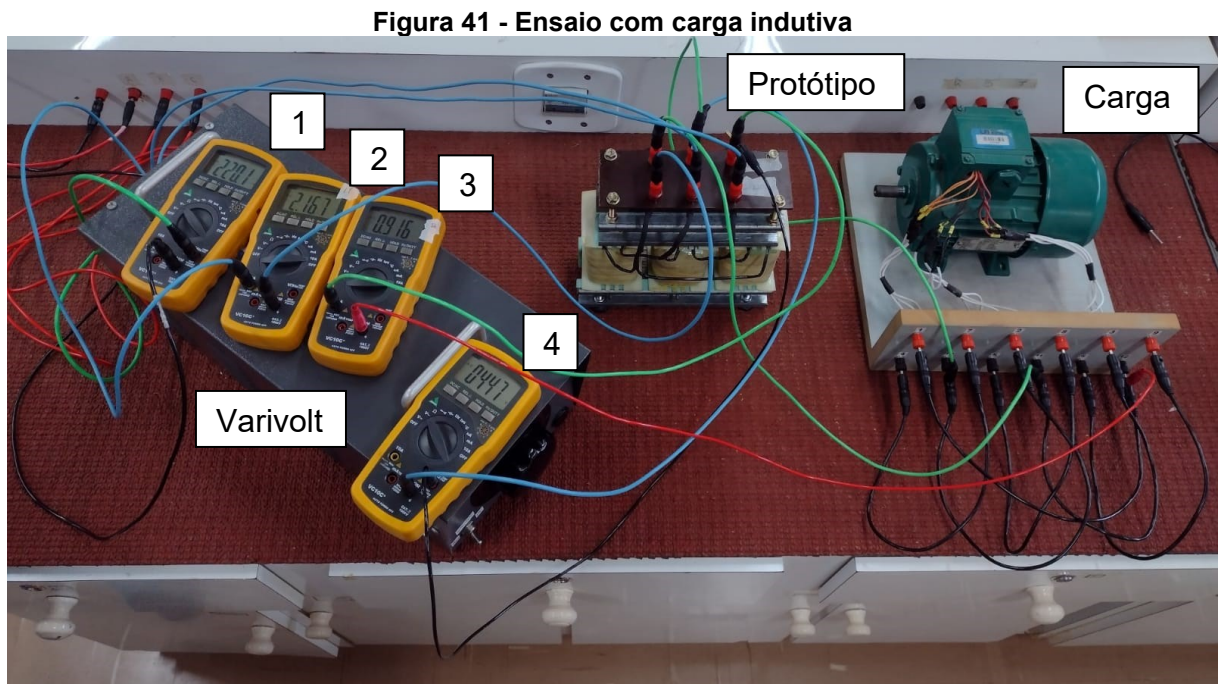
Figura 40 - Dados de placa do motor trifásico de indução



Fonte: Autoria própria (2022)

O primário do protótipo foi ligado a um *varivolt* onde a tensão foi aumentada gradualmente até atingir a tensão nominal do primário de 220V. No secundário do protótipo foi conectada a carga indutiva e realizada as medições.

Como pode ser visto na Figura 41, o multímetro 1 mostra a tensão na fase VRS referente ao primário, o multímetro 2 mostra a corrente na fase R referente ao primário, o multímetro 3 mostra a corrente da fase R na carga e o multímetro 4 mostra a tensão na fase VRS referente ao secundário.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados do ensaio com carga indutiva estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio com carga indutiva

| ENROLAMENTOS | VRS (V) | VST (V) | VRT (V) | IR (A) | IS (A) | IT (A) | Motor (rpm) |
|--------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
| Primário | 220 | 220,1 | 220 | 2,16 | 2,03 | 2,13 | |
| Secundário | 447 | 453 | 462 | 0,913 | 0,886 | 0,93 | 3590 |

Fonte: Autoria própria (2022)

Observar que os níveis de tensão secundária com carga (Tabela 5) estão menores que os níveis de tensão secundária de circuito aberto (Tabela 4).

6. CONCLUSÕES

O projeto do transformador trifásico de núcleo EI obteve resultados satisfatórios desde seu projeto até a fase de finalização da montagem. Uma das maiores dificuldades do projeto foi a aquisição das chapas de aço silício, pois somente uma empresa na região se disponibilizou a cortar as chapas nas medidas exatas do projeto. Geralmente as chapas de aço para confecção dos núcleos de transformadores, têm tamanhos padronizados e quantidades mínimas de compra. Outro material de difícil acesso, são os condutores de cobre esmaltados, assim como as chapas de aço silício, existe uma quantidade mínima de compra. Os papéis isolantes são comprados em rolos, mas para esse projeto foi possível adquirir uma pequena quantidade, somente a necessária para a fabricação do protótipo.

Devido ao método de bobinagem utilizado para fabricar as espiras dos enrolamentos, o fator de utilização da janela obteve um resultado melhor que o estipulado em projeto, visto que o espaço entre fases na janela do transformador ficou de aproximadamente 1,5 cm. É possível fazer uma estimativa em porcentagem, levando em consideração as dimensões da janela do núcleo, que aproximadamente 39,37% da janela do núcleo ficou desocupada. Essa informação é muito importante, pois influenciará diretamente no fator de elevação máxima de temperatura, reduzindo assim, o aquecimento no transformador trifásico.

Não foi possível extrair medidas de desempenho do transformador à plena carga, pois o laboratório da UTFPR não possui cargas que possam ser conectadas ao protótipo sem danificá-lo. Porém, através do ensaio de carga indutiva foi possível extrair medidas comprovando o bom desempenho do protótipo. Devido à falta de equipamentos de medição com escala apropriada, não foi possível medir as perdas no cobre e no ferro do transformador trifásico.

De modo geral o projeto proporcionou aplicar os conhecimentos adquiridos em sala de aula através das disciplinas de eletromagnetismo, máquinas elétricas, instalações elétricas, análise de circuitos elétricos, entre outras. Uma das maiores contribuições e aprendizado deste trabalho, é o detalhamento dos processos construtivos de um transformador trifásico, apesar de um protótipo, os métodos utilizados se aplicam, de maneira similar, ao chão de fábrica de uma indústria de transformadores, principalmente na etapa de confecção das bobinas. Alguns

detalhes de montagem explanados nesse trabalho não estão detalhados em livros, manuais ou algo similar, pois esses processos estão presentes na prática, no chão de fábrica de uma indústria e nas mãos de seus colaboradores.

Para projetos futuros, é sugerido utilizar os mesmos parâmetros desse projeto, porém, utilizar o método de empilhamento de núcleo grão orientado (GO), com carretéis cilíndricos, que são processos e métodos construtivos utilizados nas montagens de transformadores de média a alta potência e fazer os comparativos entre os protótipos. Também é sugerido fazer ensaios com carga resistiva, fazer medições considerando blindagem, fazer ensaio de circuito aberto e curto – circuito usando analisador de energia, realizar a medição de elevação de temperatura do transformador, fazer ensaio com megohmetro mostrando os índices de polarização e absorção e realizar ensaio para mostrar que a ligação delta – delta não tem defasagem.

REFERÊNCIAS

- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª Edição, Editora Bookman, Porto Alegre – RS, 2013.
- COLONEL Wm. T. McLyman. **Transformer and inductor design handbook**. California - USA, 2004.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6ª Edição, Editora Bookman, Porto Alegre – RS, 2006.
- FRAGOSO, C. M., Soares G. P., Soares M. B. **Transformadores: Teoria e Projeto**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus João Pessoa – PB, 2010.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre - RS, 1982.
- MALAGOLI, J. A.; LOBATO, F. S.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA da LUZ, M. V. **Projeto de Estator de Máquina de Indução Trifásica Usando o Algoritmo de Evolução Diferencial**. XI Simpósio de Mecânica Computacional e II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional, Juiz de Fora - MG, 2014.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8ª Edição, Editora Globo, São Paulo - SP, Brasil, 1991.
- PEREIRA, M. L. **Levantamento Prático das Perdas Magnéticas e Parâmetros Elétricos em Transformadores Monofásicos e Trifásicos, Utilizando a Plataforma Labview**. Minas Gerais, Universidade Federal de Itajubá, 2015. Disponível em <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/20150037.pdf>> Acesso em março 2020.
- BARBOSA, S. R. **Estudo dos Efeitos da Sobretensão em Transformadores de Potência Aliada a Carregamentos Acima da Potência Nominal**. Dissertação de Mestrado, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. Disponível em <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/439M.PDF> > Acesso em março 2020.
- KASPAREIT, K. **Cálculo de Transformadores**. WEG Indústrias S.A. Disponível em <https://www.academia.edu/10879946/APOSTILA_C%C3%81LCULO_DE_TRAFOS_-_CURSO_DE_BOBINAGEM_-_WEG> Acesso em março 2020.
- MARCHESE, Abramo Ribeiro. **Transformador Monofásico: comparativo de materiais para os enrolamentos**. Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR

Projeto do transformador trifásico de núcleo EI

Vin=220;
Vo=440;
Io=1,23;
Po=Vo*Io;
f=60;
Rend=0.95;
alfa=0.05;
Bm=1.18;
Ku=0.4;
Tr=55;
Kf=4.44;

Passo 1: Calcular a potência total em watts

$P_t = P_o * ((1/Rend) + 1);$

Passo 2: Calcular as condições elétricas

$K_e = 0.145 * (K_f^2) * (f^2) * (B_m^2) * (10^{-4});$

Passo 3: Calcular a geometria do Núcleo

$K_g = P_t / (2 * K_e * \alpha * 100);$

Passo 4: Com Kg escolher a lâmina EI

Passo 5: Calcular o número de espiras do enrolamento primário

$N_p = V_{pLinha} * (10^4) / (K_f * B_m * f * A_c);$

Passo 6: Calcular a corrente de linha primária

$I_{pLinha} = P_o / (3 * V_{pLinha} * rend);$

Passo 7: Cálculo da corrente de fase primária

$I_{pFase} = I_{pLinha} / (3^{(1/2)});$

Passo 8: Calcular a área do fio nú no primário onde $K_{up}=0.2$

$$A_{wpb} = K_{up} \cdot W_a / (4 \cdot N_p);$$

Passo 9: Selecionar o fio na tabela

Passo 10: Calcular a resistência primária

$$R_p = MLT \cdot N_p \cdot \text{microOhmsporcmp} \cdot (10^{-6});$$

Passo 11: Calcular as perdas no cobre do enrolamento primário

$$P_p = 3 \cdot (I_p \text{ Fase}^2) \cdot R_p;$$

Passo 12: Calcular o número de espiras do enrolamento secundário

$$V_s = V_o;$$

$$N_s = (N_p \cdot V_s / V_{p\text{Linha}}) \cdot (1 + \alpha);$$

Passo 13: Calcular a área do fio nú do secundário onde $K_{us}=0.2$

$$A_{wsb} = K_{us} \cdot W_a / (4 \cdot N_s);$$

Passo 14: Selecionar o fio na tabela

Passo 15: Calcular a resistência do enrolamento secundário

$$R_s = MLT \cdot N_s \cdot \text{microOhmsporcms} \cdot (10^{-6});$$

Passo 16: Calcular a corrente de linha secundária

$I_{\text{Linha}}=I_o;$

Passo 17: Calcular a corrente de fase secundária

$I_{\text{Fase}}=I_{\text{Linha}}/(3*(1/2));$

Passo 18: Calcular as perdas totais no cobre do secundário

Passo 19: Calcular as perdas totais no cobre e a regulação de tensão

Passo 20: Calcular os watts por kilograma

Passo 21: Calcular as perdas no ferro

$P_{\text{fe}}=\text{wattsporKg} * W_{\text{tfe}};;$

Passo 22: Calcular a perda total do transformador

$P_{\text{soma}}=P_{\text{cu}}+P_{\text{fe}};$

Passo 23: Calcular a eficiência do transformador

$R_{\text{endCalc}}=P_o/(P_o+P_{\text{soma}});$

Passo 24: Calcular as perdas por unidade de área

Passo 25: Calcular o aumento de temperatura

Passo 26: Calcular a utilização total da janela

ANEXO A – TABELA DE CONDUTORES

Table 4-9

| Wire Table | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------------------|----------|---|------------------|----------|----------|-------|-----------|---------------|-----------------|--------|-----------------|
| AWG | Bare Area | | Resistance $\mu\Omega/\text{cm}$ 20°C | Heavy Synthetics | | | | | | | | |
| | | | | Area | | Diameter | | Turns-Per | | Turns-Per | | Weight gm/cm |
| | $\text{cm}^2(10^{-3})$ | cir-mil | $\text{cm}^2(10^{-3})$ | cir-mil | cm | Inch | cm | Inch | cm^2 | Inch^2 | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 10 | 52.6100 | 10384.00 | 32.7 | 55.9000 | 11046.00 | 0.2670 | 0.105 | 3.9 | 10 | 11 | 69 | 0.46800 |
| 11 | 41.6800 | 8226.00 | 41.4 | 44.5000 | 8798.00 | 0.2380 | 0.094 | 4.4 | 11 | 13 | 90 | 0.37500 |
| 12 | 33.0800 | 6529.00 | 52.1 | 35.6400 | 7022.00 | 0.2130 | 0.084 | 4.9 | 12 | 17 | 108 | 0.29770 |
| 13 | 26.2600 | 5184.00 | 65.6 | 28.3600 | 5610.00 | 0.1900 | 0.075 | 5.5 | 13 | 21 | 136 | 0.23670 |
| 14 | 20.8200 | 4109.00 | 82.8 | 22.9500 | 4556.00 | 0.1710 | 0.068 | 6.0 | 15 | 26 | 169 | 0.18790 |
| 15 | 16.5100 | 3260.00 | 104.3 | 18.3700 | 3624.00 | 0.1530 | 0.060 | 6.8 | 17 | 33 | 211 | 0.14920 |
| 16 | 13.0700 | 2581.00 | 131.8 | 14.7300 | 2905.00 | 0.1370 | 0.054 | 7.3 | 19 | 41 | 263 | 0.11840 |
| 17 | 10.3900 | 2052.00 | 165.8 | 11.6800 | 2323.00 | 0.1220 | 0.048 | 8.2 | 21 | 51 | 331 | 0.09430 |
| 18 | 8.2280 | 1624.00 | 209.5 | 9.3260 | 1857.00 | 0.1090 | 0.043 | 9.1 | 23 | 64 | 415 | 0.07474 |
| 19 | 6.5310 | 1289.00 | 263.9 | 7.5390 | 1490.00 | 0.0980 | 0.039 | 10.2 | 26 | 80 | 515 | 0.05940 |
| 20 | 5.1880 | 1024.00 | 332.3 | 6.0650 | 1197.00 | 0.0879 | 0.035 | 11.4 | 29 | 99 | 638 | 0.04726 |
| 21 | 4.1160 | 812.30 | 418.9 | 4.8370 | 954.80 | 0.0785 | 0.031 | 12.8 | 32 | 124 | 800 | 0.03757 |
| 22 | 3.2430 | 640.10 | 531.4 | 3.8570 | 761.70 | 0.0701 | 0.028 | 14.3 | 36 | 156 | 1003 | 0.02965 |
| 23 | 2.5880 | 510.80 | 666.0 | 3.1350 | 620.00 | 0.0632 | 0.025 | 15.8 | 40 | 191 | 1234 | 0.02372 |
| 24 | 2.0470 | 404.00 | 842.1 | 2.5140 | 497.30 | 0.0566 | 0.022 | 17.6 | 45 | 239 | 1539 | 0.01884 |
| 25 | 1.6230 | 320.40 | 1062.0 | 2.0020 | 396.00 | 0.0505 | 0.020 | 19.8 | 50 | 300 | 1933 | 0.01498 |
| 26 | 1.2800 | 252.80 | 1345.0 | 1.6030 | 316.80 | 0.0452 | 0.018 | 22.1 | 56 | 374 | 2414 | 0.01185 |
| 27 | 1.0210 | 201.60 | 1687.0 | 1.3130 | 259.20 | 0.0409 | 0.016 | 24.4 | 62 | 457 | 2947 | 0.00945 |
| 28 | 0.8046 | 158.80 | 2142.0 | 1.0515 | 207.30 | 0.0366 | 0.014 | 27.3 | 69 | 571 | 3680 | 0.00747 |
| 29 | 0.6470 | 127.70 | 2664.0 | 0.8548 | 169.00 | 0.0330 | 0.013 | 30.3 | 77 | 702 | 4527 | 0.00602 |
| 30 | 0.5067 | 100.00 | 3402.0 | 0.6785 | 134.50 | 0.0294 | 0.012 | 33.9 | 86 | 884 | 5703 | 0.00472 |
| 31 | 0.4013 | 79.21 | 4294.0 | 0.5596 | 110.20 | 0.0267 | 0.011 | 37.5 | 95 | 1072 | 6914 | 0.00372 |
| 32 | 0.3242 | 64.00 | 5315.0 | 0.4559 | 90.25 | 0.0241 | 0.010 | 41.5 | 105 | 1316 | 8488 | 0.00305 |
| 33 | 0.2554 | 50.41 | 6748.0 | 0.3662 | 72.25 | 0.0216 | 0.009 | 46.3 | 118 | 1638 | 10565 | 0.00241 |
| 34 | 0.2011 | 39.69 | 8572.0 | 0.2863 | 56.25 | 0.0191 | 0.008 | 52.5 | 133 | 2095 | 13512 | 0.00189 |
| 35 | 0.1589 | 31.36 | 10849.0 | 0.2268 | 44.89 | 0.0170 | 0.007 | 58.8 | 149 | 2645 | 17060 | 0.00150 |
| 36 | 0.1266 | 25.00 | 13608.0 | 0.1813 | 36.00 | 0.0152 | 0.006 | 62.5 | 167 | 3309 | 21343 | 0.00119 |
| 37 | 0.1026 | 20.25 | 16801.0 | 0.1538 | 30.25 | 0.0140 | 0.006 | 71.6 | 182 | 3901 | 25161 | 0.00098 |
| 38 | 0.0811 | 16.00 | 21266.0 | 0.1207 | 24.01 | 0.0124 | 0.005 | 80.4 | 204 | 4971 | 32062 | 0.00077 |
| 39 | 0.0621 | 12.25 | 27775.0 | 0.0932 | 18.49 | 0.0109 | 0.004 | 91.6 | 233 | 6437 | 41518 | 0.00059 |
| 40 | 0.0487 | 9.61 | 35400.0 | 0.0723 | 14.44 | 0.0096 | 0.004 | 103.6 | 263 | 8298 | 53522 | 0.00046 |
| 41 | 0.0397 | 7.84 | 43405.0 | 0.0584 | 11.56 | 0.0086 | 0.003 | 115.7 | 294 | 10273 | 66260 | 0.00038 |
| 42 | 0.0317 | 6.25 | 54429.0 | 0.0456 | 9.00 | 0.0076 | 0.003 | 131.2 | 333 | 13163 | 84901 | 0.00030 |
| 43 | 0.0245 | 4.84 | 70308.0 | 0.0368 | 7.29 | 0.0069 | 0.003 | 145.8 | 370 | 16291 | 105076 | 0.00023 |
| 44 | 0.0202 | 4.00 | 85072.0 | 0.0316 | 6.25 | 0.0064 | 0.003 | 157.4 | 400 | 18957 | 122272 | 0.00020 |