

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

IHAGO FELIPPE GASPARIN

PROJETO E TESTE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO TOROIDAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2021

IHAGO FELIPPE GASPARIN

PROJETO E TESTE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO TOROIDAL

Design and test of single-phase toroidal transformer

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.

Orientador: Prof^a. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes.

PATO BRANCO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROJETO E TESTE DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO TOROIDAL**, do aluno **IHAGO FELIPPE GASPARIN** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **267** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof^a. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Prof. Me. Artur Tsuguiyoshi Hara

Prof. Me. Santo Tiveroli Filho

Prof. Me. Jose Paulo De Barros Neto

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus familiares pelo apoio em todos os momentos.

A todos os meus colegas e amigos que de alguma forma participaram de minha caminhada acadêmica.

Agradeço a minha orientadora, Prof^a Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes por sua confiança, disponibilidade, apoio e contribuições essenciais durante o desenvolvimento deste trabalho.

A equipe da sala de apoio do curso de Engenharia elétrica da UTFPR – Campus Pato Branco, em especial ao laboratorista Célio Degaraes pelo auxílio e sugestões, não só durante a realização deste trabalho, mas desde o início da graduação.

A LTC Transformadores que realizou a implementação do transformador de forma excelente.

EPÍGRAFE

“A persistência é o menor caminho do êxito”

Charles Chaplin

RESUMO

GASPARIN, Ihago Felipe. **Projeto e teste de transformador monofásico toroidal**. 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto, implementação e teste de um transformador monofásico toroidal. Primeiramente foi realizado um estudo sobre os conceitos do eletromagnetismo que regem o princípio de funcionamento dos transformadores, em específico do transformador de núcleo toroidal, bem como seus aspectos construtivos e métodos de projeto, analisando as vantagens e desvantagens desse formato em relação a outros mais usualmente utilizados como o transformador de núcleo "EI". Posteriormente foi realizada a implementação de um algoritmo em linguagem C, responsável por fornecer os parâmetros construtivos do transformador como dimensões do núcleo e seção dos fios, baseados nas especificações já previamente estabelecidas. Definidos tais parâmetros o transformador foi implementado e testado de modo que fosse possível comparar os resultados práticos obtidos com os valores definidos de projeto, a fim de validar o trabalho.

Palavras-chave: Eletromagnetismo. Transformador monofásico. Transformador Toroidal. Eficiência.

ABSTRACT

GASPARIN, Ihago Felipe. "**Design and test of single-phase toroidal transformer**". 2021. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

This final course work presents the design, implementation and testing of a single-phase toroidal transformer. First, a study was carried out on the concepts of electromagnetism that govern the working principle of transformers, specifically the toroidal core transformer, as well as its constructive aspects and design methods, analyzing the advantages and disadvantages of this format in relation to others more usually used as the "EI" core transformer. Subsequently, the implementation of an algorithm in C language was performed, responsible for providing the constructive parameters of the transformer such as core dimensions and wire section, based on the specifications previously established. Once these parameters were defined, the transformer was implemented and tested so that it was possible to compare the practical results obtained with the defined design values, in order to validate the work.

Keywords: Electromagnetism. Single-phase transformer. Toroidal transformer. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelos construtivos de transformadores de núcleo envolvido (a) e núcleo envolvente (b).	14
Figura 2: Modelo de transformadores com: a) enrolamento concêntrico e b) enrolamento alternado.	15
Figura 3 - Representação de transformador monofásico toroidal.....	16
Figura 4: Dimensões necessários para o projeto do núcleo toroidal.....	22
Figura 5: Matéria prima para a confecção do núcleo de aço silício.....	29
Figura 6: Matéria prima já posicionada na máquina responsável pela fabricação do núcleo.....	30
Figura 7: Processo de fabricação do toróide.....	31
Figura 8: Dimensão Ht (altura) do núcleo após finalizada a construção.....	31
Figura 9: Dimensão Od (diâmetro externo) do núcleo após finalizada a construção.....	32
Figura 10: Dimensão Id (diâmetro interno) do núcleo após finalizada a construção.....	32
Figura 11: Forno utilizado para o aquecimento do núcleo.....	33
Figura 12: Processo de aplicação de verniz no núcleo (imagem ilustrativa).....	34
Figura 13: Núcleo finalizado já com a aplicação do acabamento em pu (poliuretano).....	35
Figura 14: Bobinadeira automática (imagem ilustrativa).....	36
Figura 15: Transformador finalizado.....	37
Figura 16: Transformador finalizado.....	37
Figura 17: Resultados obtidos a partir do teste de indução.....	40
Figura 18: Resultados obtidos a partir do ensaio sem carga.....	41
Figura 19: Esquema de ligação utilizado no ensaio sem carga.....	41
Figura 20: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em $187\ \Omega$	43
Figura 21: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em $108\ \Omega$	43
Figura 22: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em $108\ \Omega$	43
Figura 23: Resultados do ensaio utilizando lâmpada incandescente como carga.....	44
Figura 24: Esquema de ligação do ensaio utilizando a lâmpada incandescente.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações de projeto do transformador.	27
Tabela 2: Parâmetros construtivos do transformador fornecidos pelo algoritmo.	28
Tabela 3: Dimensões reais de construção do transformador.	33
Tabela 4: Resultados fornecidos pelo algoritmo referentes a alguns parâmetros do transformador.	38
Tabela 5: Resultados do teste de continuidade.	39
Tabela 6: Resultados do teste de indução.	40
Tabela 7: Resultados do teste com o transformador sem carga	42
Tabela 8: Resultados do teste para diferentes cargas.	45

LISTA DE SÍMBOLOS

e_{ind}	Tensão induzida na espira.
λ	Fluxo concatenado na bobina.
ϕ	Fluxo individual de cada espira.
N	Número de espiras.
Φ	Fluxo médio por espira.
Φ_p	Fluxo total do enrolamento primário.
Φ_s	Fluxo total do enrolamento secundário.
Φ_M	Fluxo mútuo.
Φ_{DP}	Fluxo de dispersão primário.
Φ_{DS}	Fluxo de dispersão secundário.
$v_p(t)$	Tensão de corrente alternada no enrolamento primário.
$v_s(t)$	Tensão de corrente alternada no enrolamento secundário.
V_{in}	Tensão do enrolamento primário.
V_o	Tensão do enrolamento secundário.
N_p	Número de espiras do enrolamento primário.
N_s	Número de espiras do enrolamento secundário.
a	Relação de transformação do transformador.
P_{cu}	Perdas totais no cobre.
P_{fe}	Perdas totais no núcleo.
P_p	Perdas no cobre no enrolamento primário.
P_s	Perdas no cobre no enrolamento secundário.
P_{in}	Potência de entrada.
P_o	Potência de saída.
P_t	Potência total.
P_{soma}	Perdas totais do transformador.
I_{in}	Corrente no enrolamento primário.

I_o	Corrente no enrolamento secundário.
R_p	Resistência do enrolamento primário.
R_s	Resistência do enrolamento secundário.
α	Regulação de tensão.
α_{calc}	Regulação de tensão calculada.
$WattsporKg$	Perdas por unidade de massa.
$Wtfe$	Peso total do núcleo.
K, M, N	Coefficientes de perdas do material.
f	Frequência de operação da rede.
B_m	Indução magnética máxima.
n	Rendimento.
n_{calc}	Rendimento calculado.
K_g	Constante geométrica do núcleo.
K_e	Constante das condições elétricas.
K_u	Constante escolhida de utilização da janela.
K_{up}	Constante calculada de utilização da janela referente ao enrolamento primário.
K_{us}	Constante calculada de utilização da janela referente ao enrolamento secundário.
K_{uNovo}	Constante calculada de utilização da janela.
A_c	Área da seção transversal do núcleo.
A_p	Produto das áreas do núcleo.
W_a	Área total da janela.
K_f	Constante da onda senoidal.
J	Densidade de corrente.
A_{wpb}	Área calculada da seção do condutor nu do enrolamento primário.
A_{wsb}	Área calculada da seção do condutor nu do enrolamento secundário.
$A_{wpb_{novo}}$	Área comercial da seção do condutor nu do enrolamento primário.

$A_{wsb_{novo}}$	Área comercial da seção do condutor nu do enrolamento secundário.
Q_{voltas}	Quantidade de voltas de aço silício que formam o núcleo.
$E_{sp_{lam}}$	Espessura da lâmina de aço silício utilizada no núcleo.
O_d	Diâmetro externo do toróide.
I_D	Diâmetro interno do toróide.
H_t	Altura do toróide.
P_{ext}	Comprimento médio da espira.
C_p	Comprimento do condutor do enrolamento primário.
C_s	Comprimento do condutor do enrolamento secundário.
V_{2carga}	Tensão do secundário sob carga.
V_{2vazio}	Tensão no secundário sem carga.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	10
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	11
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3.	ESTRUTURA GERAL.....	11
2.	O TRANSFORMADOR.....	13
2.1.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	13
2.1.1.	NÚCLEO.....	13
2.1.2.	ENROLAMENTOS.....	14
2.1.3.	TRANSFORMADOR TOROIDAL	15
2.2.	FUNCIONAMENTO	16
2.3.	PERDAS.....	19
2.3.1.	PERDAS NO COBRE.....	19
2.3.2.	PERDAS NO NÚCLEO.....	20
2.4.	DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR.....	21
2.4.1.	NÚCLEO.....	21
2.4.2.	DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES E NÚMERO DE ESPIRAS	23
2.4.3.	JANELA DO NÚCLEO	24
2.4.4.	QUANTIDADE DE MATERIAL	25
3.	DESENVOLVIMENTO	27
3.1.	PROJETO DO TRANSFORMADOR	27
3.2.	MONTAGEM DO TRANSFORMADOR	28
3.2.1.	NÚCLEO.....	29
3.2.2.	ENROLAMENTOS.....	35
3.2.3.	RESULTADO FINAL.....	36
4.	RESULTADOS	38
4.1.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	38

4.2.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR	38
4.2.1.	TESTE DE CONTINUIDADE	39
4.2.2.	TESTE DE INDUÇÃO.....	39
4.2.3.	ENSAIO SEM CARGA.....	41
4.2.4.	ENSAIO COM CARGA	42
4.3.	RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO	45
4.3.1.	CUSTOS.....	46
5.	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A – ALGORITMO COMPUTACIONAL	49

1. INTRODUÇÃO

O uso de transformadores tornou-se indispensável a partir do aumento da demanda energética ao passar do tempo, implicando na construção de usinas geradoras cada vez mais distantes dos grandes centros. Surge então a necessidade do transporte dessa energia elétrica por meio de linhas de transmissão de comprimento elevado (MARTIGNONI, 1991).

O primeiro sistema de geração de energia elétrica foi desenvolvido por volta de 1880, era um sistema de corrente contínua (CC) de 120V desenvolvido por Thomas Edison. Devido à baixa tensão demandava elevadas correntes, acarretando em grandes perdas energéticas e baixa eficiência, impossibilitando assim a transmissão a longas distâncias. Nessa mesma época Nikola Tesla apresentou o projeto de geração e transmissão em corrente alternada, que paralelamente com o aperfeiçoamento dos transformadores se mostrou mais eficiente que o sistema em corrente contínua (MARTIGNONI, 1991).

Nas grandes usinas, a geração de energia é feita por meio de geradores síncronos, que geralmente estão limitados a tensões relativamente baixas para transmissões em longas distâncias, aumentando as perdas devido ao Efeito Joule e necessitando de um alto nível de corrente (MARTIGNONI, 1991). Sendo assim, utilizando transformadores, é possível elevar a tensão de transmissão, reduzindo as correntes e conseqüentemente a seção dos cabos, bem como diminuir as perdas, já que estas são proporcionais ao quadrado da corrente transmitida na linha (BIM, 2012).

Os transformadores funcionam basicamente de duas formas, como elevadores de tensão quando alimenta-se o dispositivo no lado de baixa tensão e a carga é conectada no enrolamento de alta tensão, ou então como redutor de tensão, em que o enrolamento de alta tensão é conectado a fonte e a carga é alimentada pelo enrolamento de baixa tensão (MARTIGNONI, 1991).

Nos sistemas de potência, além das aplicações usuais, os transformadores são utilizados como dispositivos auxiliares nos sistemas de medição, recebendo o nome de transformadores de potencial e transformadores de corrente, responsáveis por baixar o nível de tensão e corrente respectivamente, a níveis compatíveis com os instrumentos de medidas (CHAPMAN, 2013). Outra aplicação se dá em circuitos de

baixa potência para casamento de impedâncias, sistemas de comunicação, etc. (TORO,1994).

1.1.OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo o cálculo, simulação e implementação de um transformador monofásico toroidal, bem como a realização de testes e medições.

1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a teoria dos transformadores monofásicos;
- Escrever um algoritmo de projeto e cálculo de transformador monofásico toroidal;
- Adquirir material para a confecção do núcleo e enrolamentos;
- Montar o transformador;
- Realizar testes;
- Realizar medições elétricas;

1.3. ESTRUTURA GERAL

No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre a história dos transformadores, as motivações que influenciaram seu desenvolvimento e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado primeiramente um resumo sobre os aspectos construtivos como núcleo e enrolamentos e uma breve explicação sobre o transformador toroidal em específico. Num segundo momento é realizado um estudo sobre a teoria de funcionamento dos transformadores abordando temas como a relação de transformação, rendimento, regulação de tensão e perdas e por fim o projeto do transformador monofásico toroidal.

No capítulo 3 são apresentados os parâmetros construtivos do transformador obtidos através do algoritmo, bem como detalhes sobre seu processo de implementação, desde a fabricação do núcleo até o acabamento final.

O capítulo 4 expõe os resultados obtidos, tanto através das simulações feitas pelo algoritmo computacional quanto nos testes e ensaios realizados e ainda apresenta algumas comparações de parâmetros a fim de confirmar o bom funcionamento do transformador.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão sobre o trabalho.

No apêndice A é exposto o algoritmo computacional desenvolvido para simulação e projeto do transformador.

2. O TRANSFORMADOR

“O transformador é, em sua essência, um dispositivo que converte por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica de corrente alternada (CA) com determinada frequência e nível de tensão, em energia elétrica de corrente alternada (CA) de mesma frequência, porém com outro nível de tensão” (CHAPMAN, 2013). Este capítulo apresenta inicialmente os principais elementos construtivos de um transformador e suas características, seguido de uma base teórica sobre o princípio de funcionamento do dispositivo e por fim será apresentado o método de projeto do transformador monofásico toroidal.

2.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Um transformador consiste basicamente “[...] em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum. Essas bobinas (usualmente) não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo” (CHAPMAN, 2013, p.66). Dito isso, a seguir serão apresentados os elementos que compõem o transformador bem como suas principais características.

2.1.1. NÚCLEO

A essência de funcionamento do transformador requer apenas a existência de um fluxo mútuo, variável no tempo, enlaçando dois enrolamentos” (FITZGERALD, 2014, p.64). Para que o acoplamento magnético entre os enrolamentos seja o mais eficiente possível, o núcleo deve ser constituído de uma pilha de chapas delgadas de material ferromagnético com elevada permeabilidade e entreferro mínimo, de modo a diminuir as perdas por correntes parasitas (FITZGERALD, 2014). Segundo Bim (2012), os arranjos de transformadores podem ser construídos de duas formas:

1. Núcleo envolvido, que em diferentes colunas do núcleo são colocadas as bobinas de cada enrolamento, apresentado na figura 1a;

2. Núcleo envolvente, em que o núcleo envolve as bobinas dos enrolamentos, que estão enroladas em torno da mesma coluna central, como é mostrado na figura 1b;

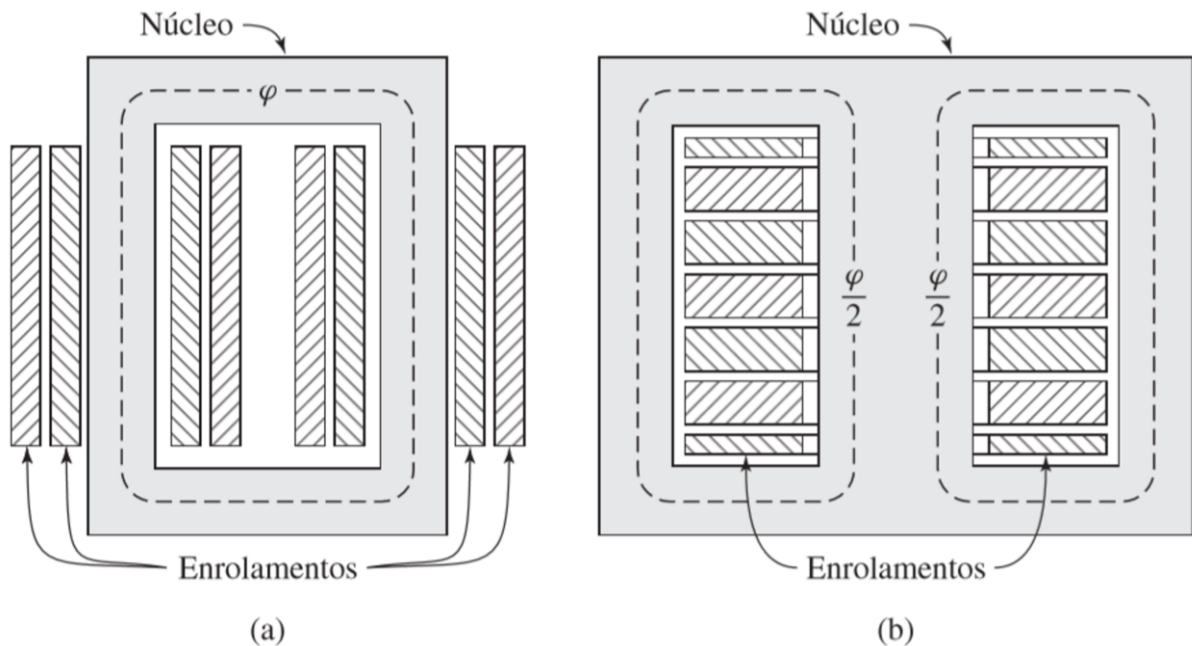


Figura 1: Modelos construtivos de transformadores de núcleo envolvido (a) e núcleo envolvente (b). Fonte: FITZGERALD, 2014

2.1.2. ENROLAMENTOS

Os enrolamentos ou bobinas do transformador são formados por inúmeras voltas de condutores, de seção cilíndrica ou retangular, sendo constituídos de cobre ou alumínio e protegidos por uma camada de isolamento de verniz ou papel isolante.

São os elementos que mais necessitam de cuidados durante o projeto, uma vez que a vida útil do dispositivo está diretamente relacionada a vida útil de suas bobinas, portanto, os condutores que compõem esses elementos devem ser capazes de suportar a temperatura de operação do transformador, transitórios da rede, esforços de curto circuito e nível de tensão e corrente aplicados (SALUSTIANO, Rogério. et al. “Análise técnica de transformadores para redes de média tensão”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2017).

Segundo Martignoni (1991), os dois tipos mais comumente utilizados de enrolamentos são:

Enrolamentos concêntricos ou tubulares: em que as bobinas do primário e secundário são sobrepostas de modo que a camada mais externa cubra a mais interna, formando assim cilindros em torno do núcleo e separadas entre si por algum material isolante, como mostrado na figura 2a.

Enrolamento com bobinas alternadas ou discos: em que as bobinas do enrolamento primário e secundário são subdivididas e dispostas alternadamente em torno do núcleo formando camadas, como mostra a figura 2b.

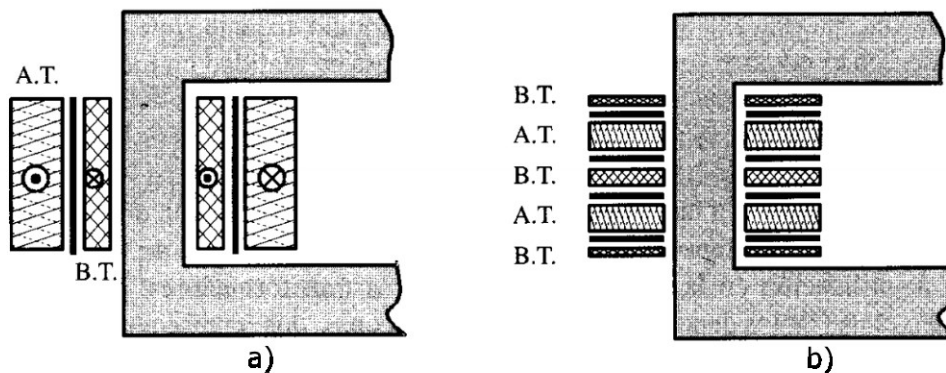


Figura 2: Modelo de transformadores com: a) enrolamento concêntrico e b) enrolamento alternado. Fonte: adaptado de (MORA, 2013)

2.1.3. TRANSFORMADOR TOROIDAL

Um transformador é dito toroidal quando possui o núcleo em formato circular, como mostrado na figura 3, e possui algumas vantagens sobre os núcleos “E” convencionais como por exemplo menores perdas, menor variação na tensão, fluxo magnético disperso insignificante etc., pois devido a sua característica construtiva, com a ausência de arestas, a relutância magnética do núcleo (análoga a resistência elétrica) é muito menor, facilitando assim a fluidez do fluxo magnético pelo núcleo, além de não necessitar da interposição de chapas em sua construção, possuindo assim uma baixa taxa de fluxo de dispersão, bem como uma maior facilidade para definição do caminho médio magnético. Outro ponto que deve ser citado é que o fluxo magnético no transformador toroidal fica contido mais facilmente

dentro do núcleo, já que os enrolamentos cobrem o núcleo ao longo de todo o percurso do caminho magnético (TERSARIOL, F. G. R. et al. “*Estudo do caminho magnético médio em estrutura eletromagnética monofásica*”. Dissertação de Mestrado - UFSC. Florianópolis, 2017).

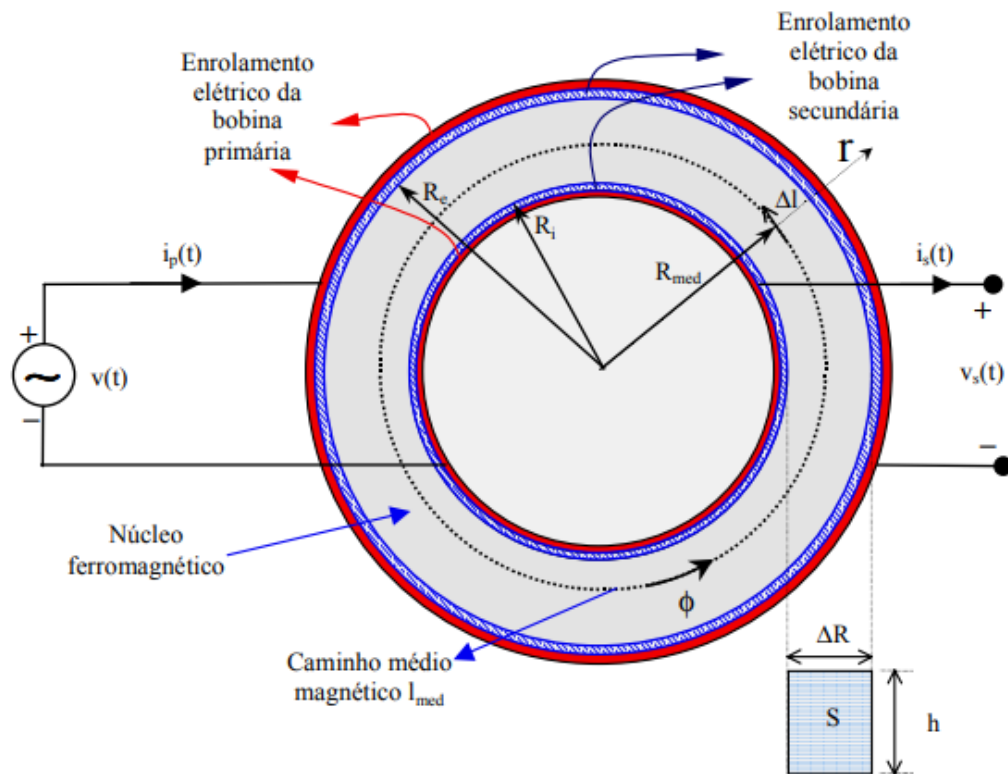


Figura 3 - Representação de transformador monofásico toroidal. Fonte: (BASTISTELA, N. J., “Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício”. Tese de doutorado – UFSC, Florianópolis - 2001)

2.2. FUNCIONAMENTO

Segundo Chapman (2013), a base de funcionamento de um transformador é explicada pela “lei de Faraday” que afirma que se houver um fluxo passando através de uma espira de fio condutor, uma certa tensão será induzida sendo diretamente proporcional a taxa de variação de fluxo no tempo. A equação 1 representa isso.

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

Em que e_{ind} representa a tensão induzida em uma espira da bobina e λ representa o fluxo concatenado na bobina em que a tensão está sendo induzida e é dado pela soma de todos os fluxos individuais de cada espira da bobina como mostra a equação 2, sendo ϕ_i o fluxo individual de cada espira.

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (2)$$

O fluxo que atravessa uma espira é ligeiramente diferente da outra devido a sua posição na bobina, portanto é necessário definir um fluxo médio por espira, apresentado na equação 3, onde Φ é o fluxo médio que passa através de cada espira e N o número de espiras que o fluxo Φ atravessa.

$$\Phi = \frac{\lambda}{N} \quad (3)$$

Sendo assim é possível reescrever a equação da lei de Faraday da seguinte forma.

$$e_{ind} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

Quando alimenta-se o primário do transformador com uma fonte de tensão alternada $v_p(t)$, aplicada a equação 4, é possível representar o fluxo médio do enrolamento primário através da equação 5 que depende diretamente da tensão $v_p(t)$ aplicada e é inversamente proporcional ao número de espiras do enrolamento primário N_p .

$$\Phi_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \quad (5)$$

Esse fluxo médio primário é subdividido em duas partes, o fluxo que percorre o caminho magnético do núcleo e engloba a bobina do secundário retornando ao primário é denominado *fluxo mútuo* (Φ_M) e a componente que concatena apenas uma

das bobinas é chamada *fluxo de dispersão primário* (Φ_{DP}) e *fluxo de dispersão secundário* (Φ_{DS}). As equações 6 e 7 representam como os fluxos médios são subdivididos para os enrolamentos primário e secundário respectivamente

$$\Phi_p = \Phi_M + \Phi_{DP} \quad (6)$$

$$\Phi_s = \Phi_M + \Phi_{DS} \quad (7)$$

Com essa divisão, a lei de Faraday para os enrolamentos primário e secundário respectivamente, ficam escritas da seguinte maneira.

$$v_p(t) = N_p \frac{d\Phi_M}{dt} + N_p \frac{d\Phi_{DP}}{dt} \quad (8)$$

$$v_s(t) = N_s \frac{d\Phi_M}{dt} + N_s \frac{d\Phi_{DS}}{dt} \quad (9)$$

Para um transformador bem projetado o fluxo mútuo é muito maior que o fluxo de dispersão, então este é desconsiderado e as equações 8 e 9 ficam escritas da seguinte maneira.

$$v_p(t) = N_p \frac{d\Phi_M}{dt} \quad (10)$$

$$v_s(t) = N_s \frac{d\Phi_M}{dt} \quad (11)$$

Dividindo (10) por (11), obtém-se a relação de transformação (a), apresentada pela equação 12.

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (12)$$

Conclui-se que “[...] a razão entre a tensão primária e a tensão secundária, ambas causadas pelo fluxo mútuo, é igual a relação de espiras do transformador” (CHAPMAN, 2013, p.80).

2.3. PERDAS

Em um transformador ideal não há perdas, ou seja, é um equipamento com 100% de eficiência, mas na prática ocorre que parte da energia transformada é dissipada nos enrolamentos, núcleo e outras estruturas. A essa energia dissipada dá-se o nome de perdas, mais especificamente perdas no cobre e perdas no ferro que serão equacionadas e explicadas nesse capítulo. (SALUSTIANO, Rogério. et al. “Análise técnica de transformadores para redes de média tensão”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2017).

2.3.1. PERDAS NO COBRE

Segundo Martignoni (1991), as perdas no cobre (P_{cu}) também chamadas de perdas por efeito Joule, se dão devido à resistência ôhmica nos condutores dos enrolamentos e são expressas pela equação 12.

$$P_{cu} = P_p + P_s \quad (12)$$

Em que P_p e P_s , são as perdas no cobre dos enrolamentos primário e secundário respectivamente, expressas pelas equações 13 e 14.

$$P_p = I_{in}^2 * R_p \quad (13)$$

$$P_s = I_o^2 * R_s \quad (14)$$

Sendo I_{in} , I_o , R_p e R_s as correntes e resistências de cada enrolamento.

A equação 12 possibilita o cálculo da regulação de tensão percentual do transformador através da equação 15, sendo P_o a potência de saída do transformador.

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_o} \quad (15)$$

2.3.2. PERDAS NO NÚCLEO

As perdas no núcleo ou perdas no ferro, em $W (P_{fe})$, são calculadas a partir da equação 16.

$$P_{fe} = WattsporKg * Wtfe \quad (16)$$

Em que $Wtfe$ é o peso do núcleo em Kg , e $WattsporKg$ em W/Kg são as perdas por unidade de massa, definidas a partir da equação 17

$$WattsporKg = (K) * (f^M) * (B_m^N) \quad (17)$$

Sendo K, M, N coeficientes de perdas que depende do material de fabricação do núcleo.

Outro parâmetro importante que deve ser calculado é o rendimento do transformador dado pela equação 18.

$$n = \frac{P_o}{P_o + P_{soma}} \quad (18)$$

Em que a variável P_{soma} é definida como a perda total do transformador através da equação 19 como a soma das perdas no núcleo e perdas no cobre.

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe} \quad (19)$$

2.4. DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

O projeto de um transformador pode ser feito de diferentes maneiras, neste tópico serão apresentados os cálculos do método de projeto escolhido para a definição das dimensões do núcleo, quantidade de espiras dos enrolamentos primário e secundário, bem como as respectivas seções dos condutores utilizados.

Inicialmente, para dar início aos cálculos através do algoritmo, foram definidas as variáveis de entrada (tensões, correntes e metas de rendimento, temperatura e regulação de tensão). Calculou-se então a potência total do transformador e constante das condições elétricas e geométricas do núcleo para definir suas dimensões. Definido isso, foram calculadas a corrente de entrada, densidade de corrente e número de espiras dos enrolamentos primário e secundário e as áreas dos respectivos condutores a serem utilizados, para então defini-los a partir da tabela comercial dos fios esmaltados. Foram calculadas também as perdas no núcleo e enrolamentos, bem como os valores teóricos de rendimento, regulação de tensão e meta de elevação de temperatura. Os valores obtidos foram comparados com as metas desejadas. Caso necessário, um condutor com maior bitola e uma chapa com maior dimensão podem ser selecionados, de modo a melhorar a precisão no projeto.

Para tal dimensionamento iremos considerar um transformador com núcleo toroidal constituído de aço silício do tipo núcleo envolvido e com enrolamentos concêntricos.

2.4.1. NÚCLEO

Inicialmente é preciso definir as especificações do transformador como tensão do enrolamento primário em volts (V_{in}), tensão no enrolamento secundário em volts (V_o), corrente no enrolamento secundário em Ampére (I_o), frequência da rede em Hertz (f), meta de rendimento (n) e meta de regulação de tensão (α), K_f que é a constante da onda senoidal e possui o valor de 4,44 e por fim B_m dada em Tesla, que representa a indução magnética máxima para não alcançar a região de saturação.

Com estes valores definidos, inicialmente calcula-se a potência em Watts (P_o), a potência total que o transformador fornece em Watts (P_t) além da constante das condições elétricas (K_e), respectivamente através das equações 20, 21 e 22:

$$P_o = V_o * I_o \quad (20)$$

$$P_t = P_o * \left[\left(\frac{1}{n} \right) + 1 \right] \quad (21)$$

$$K_e = 0.145 * K_f^2 * f^2 * B_m^2 * 10^{-4} \quad (22)$$

A partir das equações 21 e 22 é possível calcular a constante geométrica do núcleo K_g (cm^5), exemplificada na equação 23:

$$K_g = \frac{P_t}{2 * K_e * \alpha * 100} \quad (23)$$

Com K_g calculado são obtidas as dimensões do diâmetro externo em cm (O_D), diâmetro interno em cm (I_D), altura em cm (H_T), área da seção transversal do núcleo em cm^2 (A_c), área total da janela do núcleo em cm^2 (W_a) mostradas na figura 4, bem como os valores do produto das áreas em cm^4 (A_p) e o peso total do núcleo em Kg (W_{tfe}) que serão utilizados posteriormente.

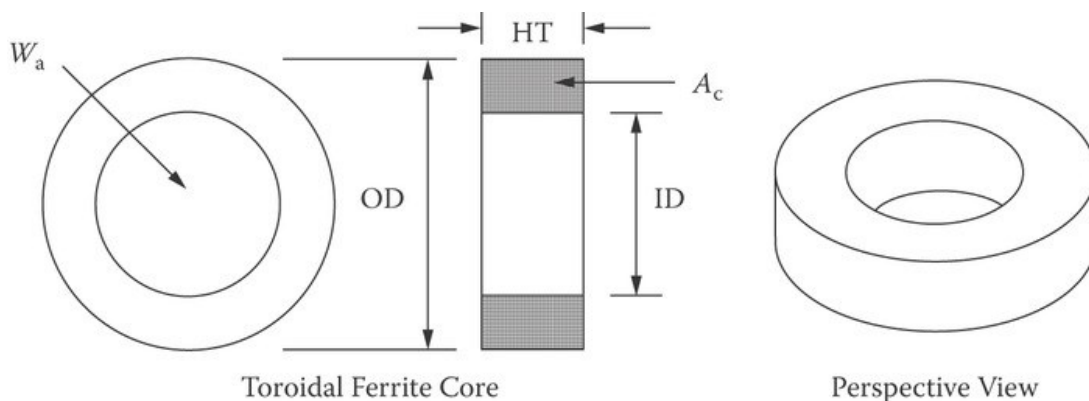


Figura 4: Dimensões necessárias para o projeto do núcleo toroidal. Fonte: Colonel Wm. T. McLyman, 2011, "Magnetic Cores from: Transformer and Inductor Design Handbook CRC Press".

2.4.2. DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES E NÚMERO DE ESPIRAS

Para esta etapa foi necessário definir a constante de utilização de janela do núcleo (K_u), para então realizar o cálculo da densidade de corrente J em $\left(\frac{A}{cm^2}\right)$, apresentado na equação 24.

$$J = \frac{(P_t * 10^4)}{(K_f * K_u * B_m * f * A_p)} \quad (24)$$

Sendo que P_t , K_f , K_u , B_m , f e A_p foram definidos na seção 2.2.1.

Com o valor da densidade de corrente J , é possível determinar a área da seção dos condutores nus da bobina dos enrolamentos primário e secundário, a partir das equações 25 e 26 respectivamente.

$$A_{wpb} = \frac{I_{in}}{J} \quad (25)$$

$$A_{wsb} = \frac{I_o}{J} \quad (26)$$

Em que I_o é a corrente no enrolamento secundário e foi previamente definida na seção 2.2.1 e I_{in} é a corrente no enrolamento primário e é dada pela equação 27.

$$I_{in} = \frac{P_o}{(V_{in} * n)} \quad (27)$$

A partir do resultado das equações 25 e 26, seleciona-se o fio com a área mais próxima possível.

O cálculo do número de espiras necessário em cada enrolamento é feito através das equações 28 e 29;

$$N_p = \frac{(V_{in} * 10^4)}{(K_f * B_m * f * A_c)} \quad (28)$$

$$N_s = \left[\frac{(N_p * V_o)}{V_{in}} \right] * (1 + \alpha) \quad (29)$$

Em que N_p e N_s são o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário respectivamente.

2.4.3. JANELA DO NÚCLEO

Após realizados os cálculos e definidas as seções dos condutores bem como a quantidade de espiras necessárias em cada bobina, deve-se calcular uma nova constante de janela (K_{uNova}) que define o percentual da janela efetivamente ocupado pelo condutor de cobre e é apresentada na equação 30.

$$K_{uNova} = K_{up} + K_{us} \quad (30)$$

Em que K_{up} e K_{us} representam as constantes de janela individuais de cada enrolamento, primário e secundário respectivamente, e são calculadas de acordo com as equações 31 e 32.

$$K_{up} = \frac{(N_p * Awpb_{novo})}{W_a} \quad (31)$$

$$K_{us} = \frac{(N_s * Awsb_{novo})}{W_a} \quad (32)$$

Em que $A_{wpb_{novo}}$ e $A_{wsb_{novo}}$ são as áreas comerciais dos condutores de cobre nu em cm^2 escolhidos a partir dos cálculos da seção 2.2.2, e W_a é a área total da janela do núcleo definida na seção 2.2.1. Para que a construção do transformador seja viável, o resultado da equação 30 deve respeitar a seguinte condição

$$K_{uNova} \leq K_u \quad (33)$$

Dessa forma as bobinas poderão ser enroladas em torno do núcleo sem maiores problemas.

2.4.4. QUANTIDADE DE MATERIAL

2.4.4.1. NÚCLEO

Diferentemente dos transformadores convencionais, o transformador de núcleo toroidal não é montado por inúmeras lâminas de aço silício, e sim enrolado a partir de uma única chapa, fina e longa, em torno de um eixo central para obter a forma desejada. Dessa maneira é possível calcular aproximadamente o número de voltas necessárias de aço para formar o núcleo Q_{voltas} , mostrado pela equação 34.

$$Q_{voltas} = \frac{O_D - I_D}{Esp_{lam}} \quad (34)$$

Em que O_D e I_D são as dimensões do toróide calculadas na seção 2.2.1 e Esp_{lam} é a espessura da lâmina utilizada durante o processo de produção.

2.4.4.2. CONDUTORES

O comprimento dos condutores em cm , para o enrolamento primário e secundário são dados pelas equações 35 e 36, respectivamente.

$$C_p = P_{ext} * N_p \quad (35)$$

$$C_s = P_{ext} * N_s \quad (36)$$

Sendo que P_{ext} é o comprimento médio da espira, calculado através do perímetro da área da seção do núcleo e N_p, N_s são os números de espiras de cada enrolamento, calculados na seção 2.2.2.

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentados, primeiramente as especificações de projeto necessárias para realização dos cálculos, bem como os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido em linguagem C, que pode ser encontrado no apêndice. Posteriormente serão mostrados os passos seguidos durante a montagem do núcleo e enrolamentos e por fim o resultado final da implementação.

3.1. PROJETO DO TRANSFORMADOR

O ponto de partida para o projeto do transformador foi definir suas especificações de projeto, que são mostradas na tabela 1.

Tabela 1: especificações de projeto do transformador. Fonte: Autoria própria

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão no primário	V_{in}	220	V
Tensão de secundário	V_{out}	110	V
Corrente no secundário	I_o	1	A
Frequência	f	60	H_z
Regulação de tensão	α	5%	-
Rendimento	n	95%	-
Indução máxima	B_m	1,2	T
Fator de utilização da janela	K_u	0,4	-
Meta de elevação de temperatura	T_r	55	$^{\circ}C$
Constante da onda senoidal	K_f	4,44	-

O algoritmo foi desenvolvido a partir do equacionamento apresentado no capítulo 2, e juntamente com os dados apresentados na tabela 1 forneceu os seguintes resultados apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros construtivos do transformador fornecidos pelo algoritmo.
Fonte: autoria própria.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Constante das condições elétricas	K_e	1,4818	-
Constante geométrica do núcleo	K_g	15,2372	cm^5
Dimensão O_d do núcleo	O_d	12,732	cm
Dimensão I_d do núcleo	I_d	5,080	cm
Dimensão H_t do núcleo	H_t	4,445	cm
Número de espiras do enrolamento primário	N_p	1497	<i>Espiras</i>
Número de espiras do enrolamento secundário	N_s	786	<i>Espiras</i>
Condutor do enrolamento primário	Awg_p	24	<i>Awg</i>
Condutor do enrolamento secundário	Awg_s	20	<i>Awg</i>
Comprimento do condutor primário	C_p	456,36	m
Comprimento do condutor secundário	C_s	239,59	m
Perímetro externo	P_{ext}	24,19	cm

3.2. MONTAGEM DO TRANSFORMADOR

É importante ressaltar que o transformador toroidal foco deste trabalho, foi construído pela empresa LTC transformadores toroidais, da cidade de Bragança Paulista – SP, uma vez que devido à pouca utilização deste modelo de núcleo em nossa região não foi possível encontrar nenhum fornecedor próximo.

Alguns motivos foram cruciais para a decisão de adquirir o transformador já montado e não apenas comprar o núcleo e enrolar manualmente, entre eles:

- Melhorar a precisão dos resultados obtidos, já que o trabalho é feito por profissionais da área e com equipamentos específicos, como por exemplo a utilização de bobinadeira específica para transformadores toroidais, eliminando assim possíveis falhas decorrentes da implementação manual por parte do

acadêmico, como rompimento dos condutores ou falta de espaço na janela do núcleo devido à grande quantidade de espiras necessárias;

- Menor custo de aquisição, levando em conta a compra e transporte do núcleo, compra dos condutores de cobre, papel isolante, entre outros materiais necessários;

3.2.1. NÚCLEO

O núcleo toroidal, como comentado anteriormente, geralmente não é construído a partir de múltiplas lâminas de aço silício empilhadas como nos transformadores convencionais e o principal motivo é o alto o custo de fabricação, já que devido a seu formato circular a quantidade de material perdida durante o corte das chapas é extremamente grande. Para contornar este problema utiliza-se uma única lâmina de aço silício de comprimento elevado armazenado em um carretel (figura 5), este é posicionado em uma máquina responsável por enrolar a matéria prima, dando formato ao toróide (figuras 6 e 7).

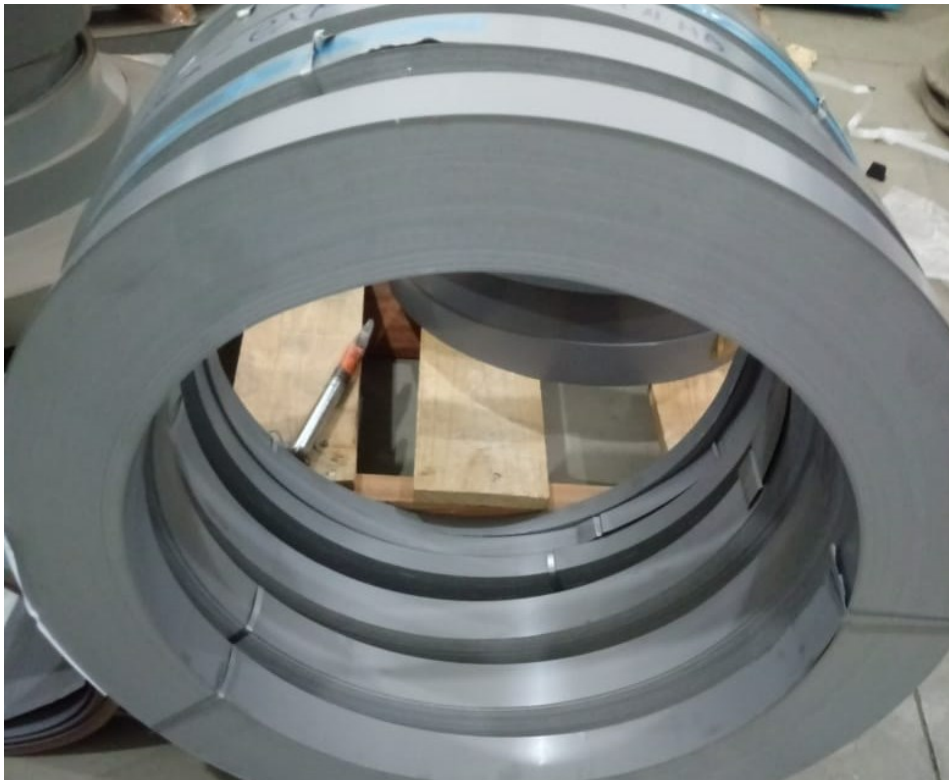


Figura 5: Matéria prima para a confecção do núcleo de aço silício. Fonte: LTC Transformadores.



Figura 6: Matéria prima já posicionada na máquina responsável pela fabricação do núcleo. Fonte: LTC Transformadores.

Através da figura 7, durante a montagem do núcleo é possível verificar que o diâmetro interno ID é definido por uma anilha de aço posicionada no eixo de rotação do motor (b), e portanto esta medida possui valores comerciais tabelados, o diâmetro externo OD pode ser escolhido e varia de acordo com a espessura da lâmina, e a altura HT é definida de acordo com a largura da chapa (a) e também possui valores tabelados. Portanto, devido aos motivos apresentados acima e erros causados pela não idealidade do material e do maquinário utilizado, não foi possível adquirir um núcleo com os valores exatos calculados. As dimensões reais são mostradas na tabela 3, e nas figuras 8, 9 e 10 são apresentadas as medidas de cada dimensão utilizando um paquímetro digital. O material utilizado na fabricação é o aço silício M125-27 da empresa Aperam que possui 0,27mm de espessura.

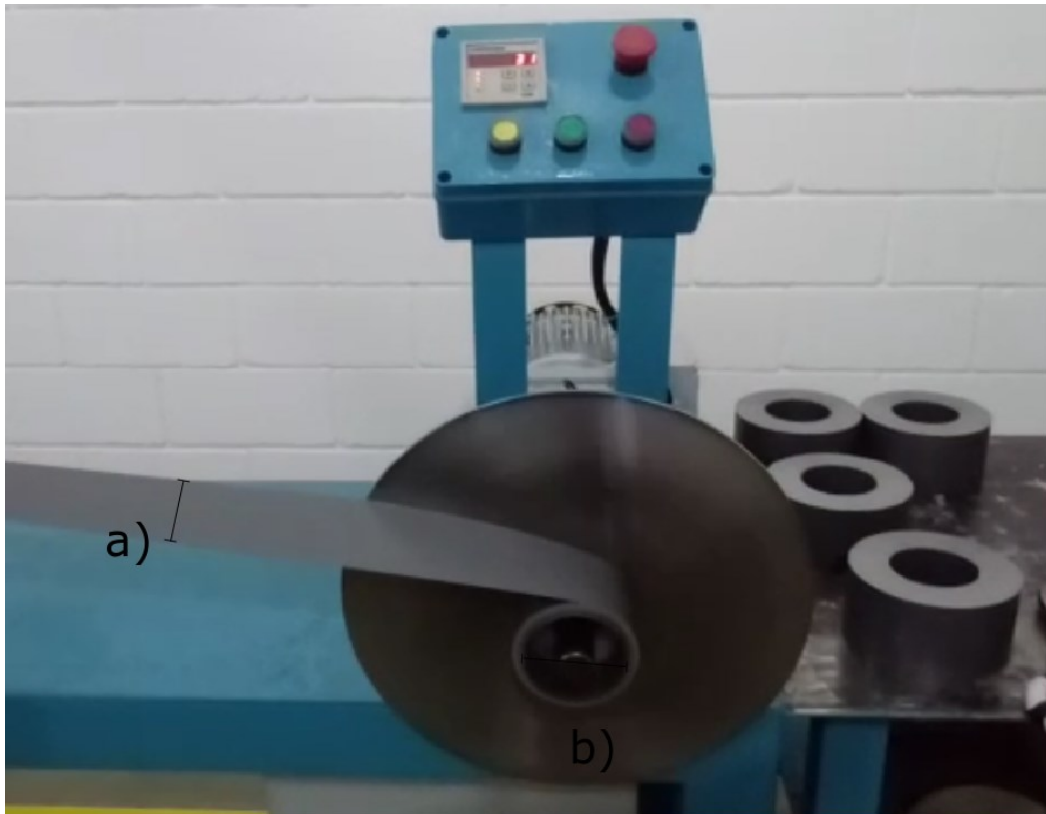


Figura 7: Processo de fabricação do toróide. Fonte: LTC Transformadores.



Figura 8: Dimensão H_t (altura) do núcleo após finalizada a construção. Fonte: LTC Transformadores.



Figura 10: Dimensão I_d (diâmetro interno) do núcleo após finalizada a construção. Fonte: LTC Transformadores.



Figura 9: Dimensão O_d (diâmetro externo) do núcleo após finalizada a construção. Fonte: LTC Transformadores.

Tabela 3: Dimensões reais de construção do transformador. Fonte: autoria própria.

Dimensão do núcleo	Símbolo	Valor	Unidade
Diâmetro externo	O_d	49,91	mm
Diâmetro interno	I_d	126,86	mm
Altura	H_t	45,10	mm

Finalizado o processo de construção a peça passa pelo tratamento térmico ou recozimento. O núcleo é colocado em um forno (figura 11) em que sua temperatura é elevada gradativamente durante 4 horas até 820°C e mantido nessa temperatura durante mais 2 horas, e então é deixado em resfriamento natural por 8 horas. Essa etapa é de extrema importância pois serve para aliviar os esforços mecânicos gerados durante a montagem, o aço aumenta razoavelmente sua resistência ao calor e a corrosão e ainda auxilia no aperfeiçoamento das propriedades magnéticas do material.



Figura 11: Forno utilizado para o aquecimento do núcleo. Fonte: LTC Transformadores.

Por fim o núcleo vai para o processo de acabamento em que recebe uma aplicação de verniz (figura 12) e revestimento com material isolante, geralmente pu (poliuretano), para suavizar as bordas do toróide, evitando assim problemas com rompimento dos condutores durante o enrolamento das bobinas (figura 13).



Figura 12: Processo de aplicação de verniz no núcleo (imagem ilustrativa). Fonte: LTC Transformadores.



Figura 13: Núcleo finalizado já com a aplicação do acabamento em pu (poliuretano). Fonte: LTC transformadores.

3.2.2. ENROLAMENTOS

Com o núcleo já finalizado, como explicado na seção 3.2.1, iniciou-se a fase de enrolar as bobinas e para isso utilizou-se de uma bobinadeira automática com contador de espiras mostrada na figura 14. O núcleo é estabelecido na máquina fixado entre três cilindros de borracha e um aro é posicionado passando pelo interior do toróide como pode ser observado na representação, posteriormente o condutor a ser utilizado é enrolado em torno desse aro. Finalizada essa etapa o equipamento é acionado e o aro inicia sua rotação dispondo as espiras em torno do núcleo ao passo que este é rotacionado pelos cilindros de borracha de modo que os condutores sejam igualmente distribuídos sobre o material ferromagnético, dando assim origem aos enrolamentos.



Figura 14: Bobinadeira automática (imagem ilustrativa). Fonte: Mega bobinadeiras. Disponível em: <http://catalogo.megacoil.com/product/bobinadeiras-serie-td-toroides/mgb-td600>.

Para o enrolamento primário o fio utilizado foi o AWG24 e foram necessárias 1497 voltas. Devido ao grande número de espiras o processo foi dividido em duas etapas, sendo enroladas 750 voltas na primeira e 747 na segunda.

Para o enrolamento secundário o fio utilizado foi o AWG20 e foram necessárias 786 voltas.

Ambas as bobinas foram enroladas no mesmo sentido e possuem material isolante entre si.

3.2.3. RESULTADO FINAL

Após finalizados os processos apresentados nos itens 3.2.1 e 3.2.2, o transformador foi envolto em material isolante e filme plástico para proteção contra agentes externos água e eventuais batidas durante o transporte. As sobras dos condutores foram demarcadas com cores para facilitar o entendimento e utilização,

sendo a cor preta para a bobina primária e cor vermelha indicando a bobina secundária. O produto final possui aproximadamente 3,7Kg e pode ser visto nas figuras 15 e 16



Figura 15: Transformador finalizado. Fonte: autoria própria.

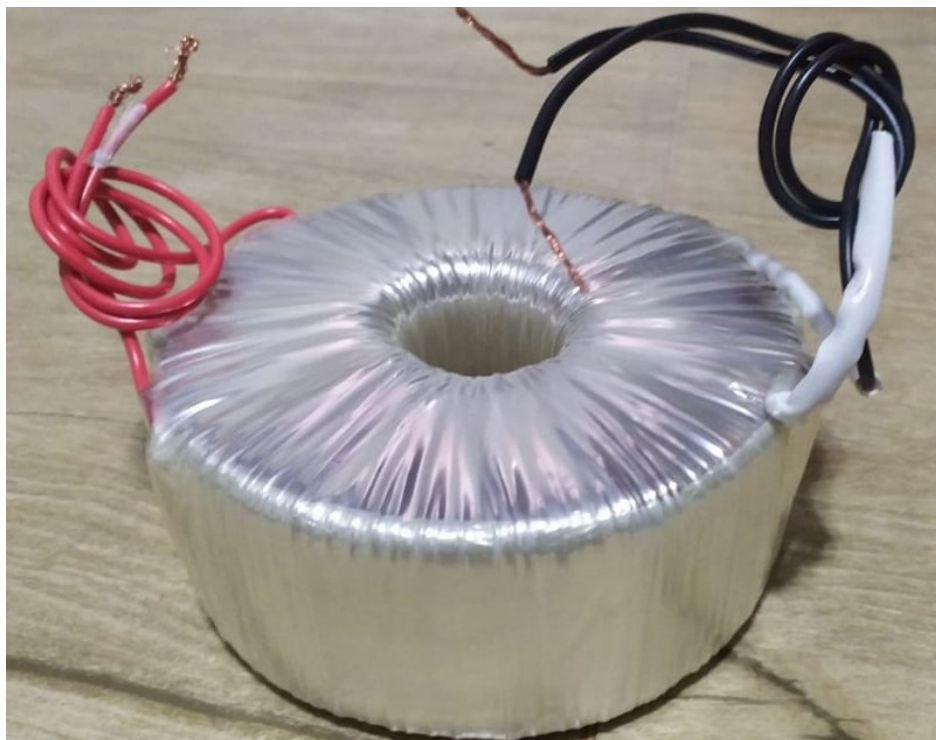


Figura 16: Transformador finalizado. Fonte: autoria própria.

4. RESULTADOS

Este capítulo irá apresentar os resultados provenientes da simulação realizada pelo algoritmo bem como os resultados obtidos através dos testes realizados com o transformador no laboratório de maquinas elétricas (1001) da UTFPR – campus Pato Branco.

4.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A partir do algoritmo criado para o projeto do transformador, foi desenvolvida uma rotina de cálculos para simular e analisar se alguns parâmetros como regulação de tensão, constante de utilização da janela e rendimento estavam dentro dos valores inicialmente definidos. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: resultados fornecidos pelo algoritmo referentes a alguns parâmetros do transformador. Fonte: autoria própria

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Regulação de tensão	α_{calc}	6,2%	-
Rendimento	n_{calc}	93,65%	-
Constante de utilização da janela	K_{uNovo}	0,3523	-

Analisando os resultados da simulação é possível afirmar que todos os parâmetros calculados estão muito próximos das metas definidas de projeto, ou seja, é viável a construção do transformador.

4.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DO TRANSFORMADOR

Foram realizados alguns testes e ensaios, descritos a seguir, após a construção do transformador, a fim de verificar seu bom funcionamento, bem como analisar se os resultados obtidos estão condizentes com as metas de projeto. Em

todos os testes o enrolamento primário do transformador foi alimentado a partir de um varivolt ligado à rede, a fim de garantir a tensão primária de 220V.

4.2.1. TESTE DE CONTINUIDADE

O teste de continuidade é feito para garantir que não houve nenhum imprevisto no momento de enrolar as bobinas como o rompimento do condutor ou algum curto circuito. Para a realização do teste foi utilizado um multímetro no modo “teste de continuidade”, os resultados são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Resultados do teste de continuidade. Fonte: autoria própria.

Teste de continuidade			
	1º	2º	Carcaça
1º	OK	-	-
2º	-	OK	-

Observa-se que houve continuidade apenas entre as extremidades do mesmo enrolamento, confirmando a não existência de curto-circuito ou rompimento de condutores. O teste entre enrolamentos e núcleo não pode ser realizado, pois o transformador foi recoberto com uma camada de material isolante, não fornecendo acesso a carcaça.

4.2.2. TESTE DE INDUÇÃO

O teste de indução serve para determinar se o transformador está de fato funcionando, ou seja, se existe de fato indução magnética entre os enrolamentos não sendo necessário realizar a medida da corrente de magnetização, como no teste a vazio. Para este ensaio foram utilizados 2 multímetros, 1 varivolt e os cabos de ligação necessários (figura 17).

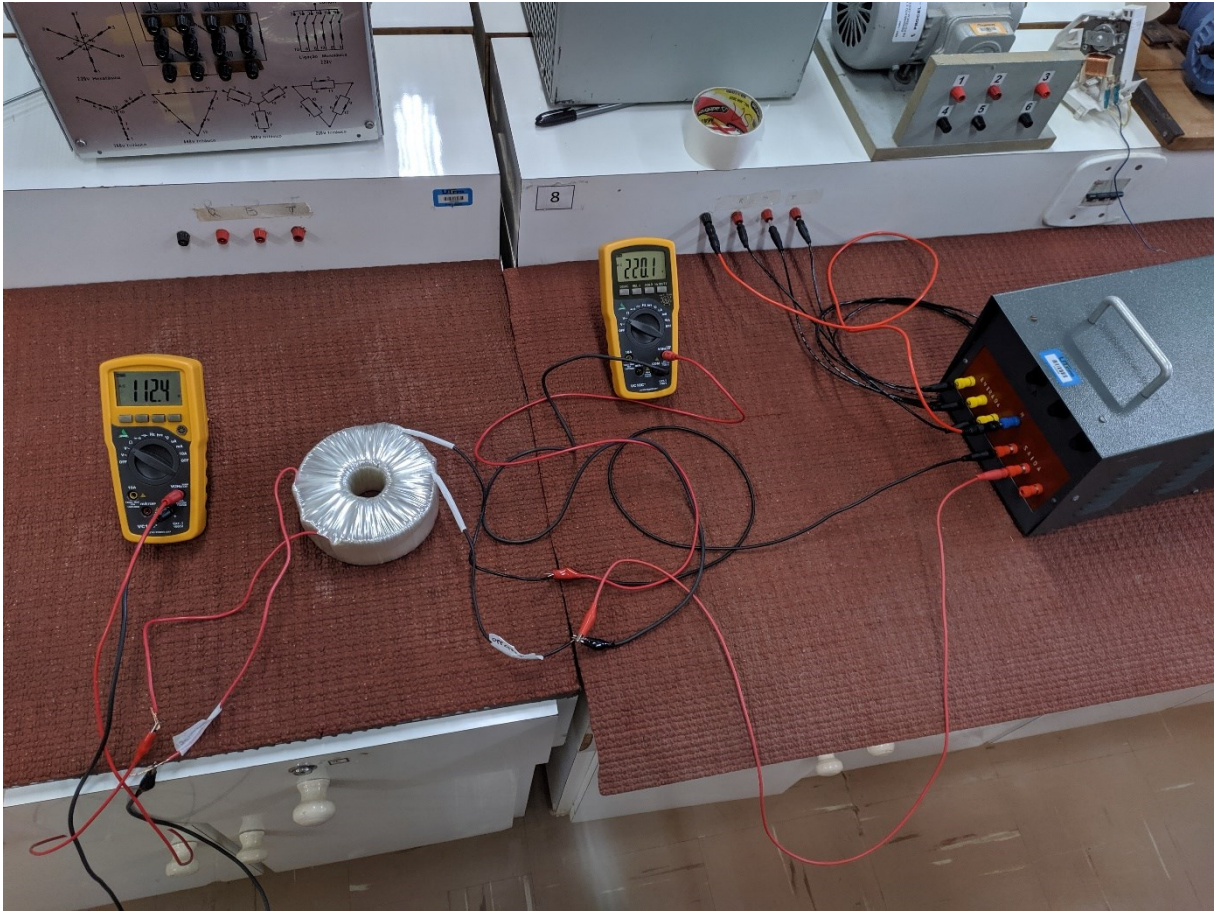


Figura 17: Resultados obtidos a partir do teste de indução. Fonte: autoria própria.

Os resultados do teste são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Resultados do teste de indução. Fonte: autoria própria.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão de alimentação no enrolamento primário	220,1	V
Tensão medida no enrolamento secundário	112,4	V

O ensaio foi satisfatório, uma vez que o enrolamento secundário apresentou um valor de tensão próximo de 110V, sendo comprovada a indução entre os enrolamentos.

4.2.3. ENSAIO SEM CARGA

Foi realizado um ensaio sem carga conectada ao enrolamento secundário (figura 18), utilizando um varivolt, 3 multímetros para realização das medições e cabos de conexão. O esquema de ligação é visto na figura 19.

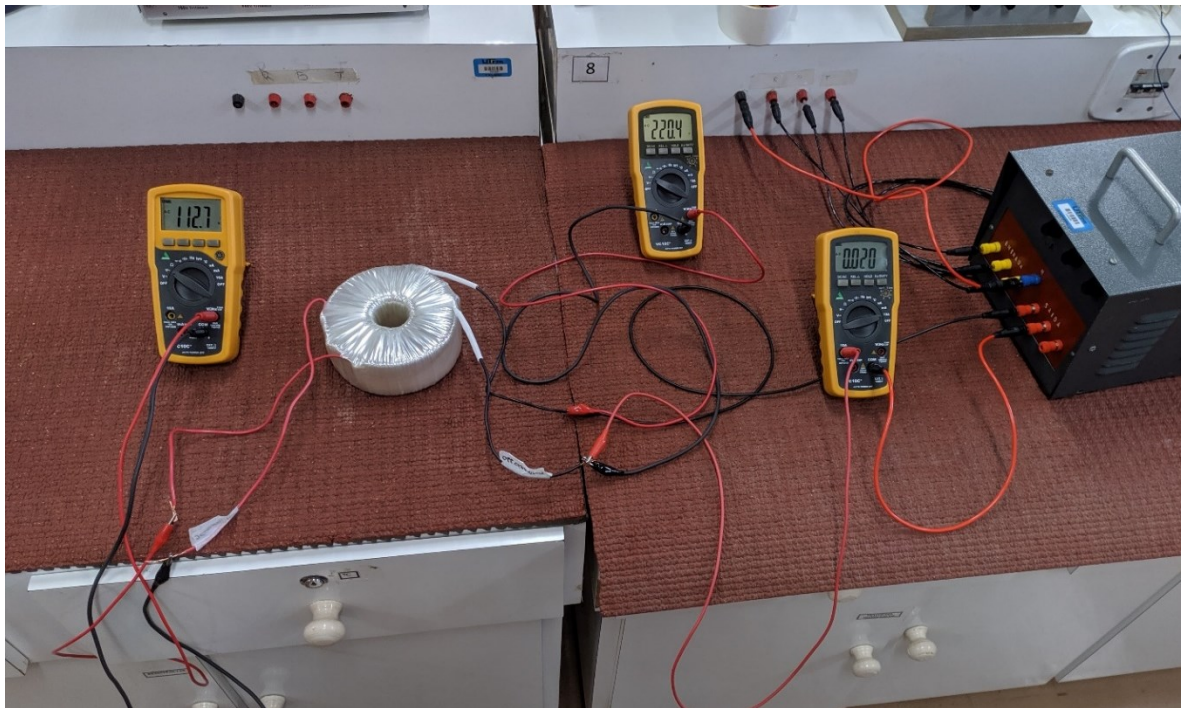


Figura 18: Resultados obtidos a partir do ensaio sem carga. Fonte: autoria própria.

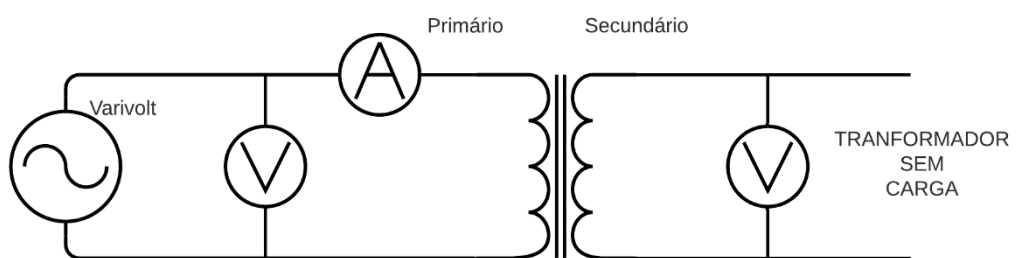


Figura 19: Esquema de ligação utilizado no ensaio sem carga. Fonte: autoria própria.

Os resultados das medições de tensões e correntes são apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Resultados do teste com o transformador sem carga. Fonte: autoria própria.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de alimentação no enrolamento primário	V_{in}	220,4	V
Corrente medida no enrolamento primário	I_{in}	0,02	A
Tensão medida no enrolamento secundário	V_o	112,7	V
Corrente medida no enrolamento secundário	I_o	0	A

A partir dos resultados é possível ver que, como o secundário está em vazio a corrente demandada pelo primário é muito baixa, apenas a necessária para a magnetização do circuito. A tensão no enrolamento secundário é levemente maior que o valor projetado, mas está dentro do tolerável, visto que essa diferença é esperada pois não existem perdas relacionadas a carga e o transformador é projetado para trabalhar em tensão nominal quando opera próximo a sua carga nominal.

4.2.4. ENSAIO COM CARGA

Os ensaios foram realizados com cargas resistivas, utilizando um reostato de resistência variável máxima igual a $187\ \Omega$ e uma lâmpada incandescente de 127V e potência de 100W.

Primeiramente o enrolamento secundário do transformador foi conectado ao reostato, inicialmente em sua resistência máxima e então foram realizadas as medições (figura 20), posteriormente a resistência do reostato foi ajustada em $108\ \Omega$, valor que deu origem a corrente nominal de 1A no enrolamento secundário para então serem realizadas as medidas (figura 21). O esquema de ligação para ambos os ensaios é o mesmo e é exibido na figura 22.

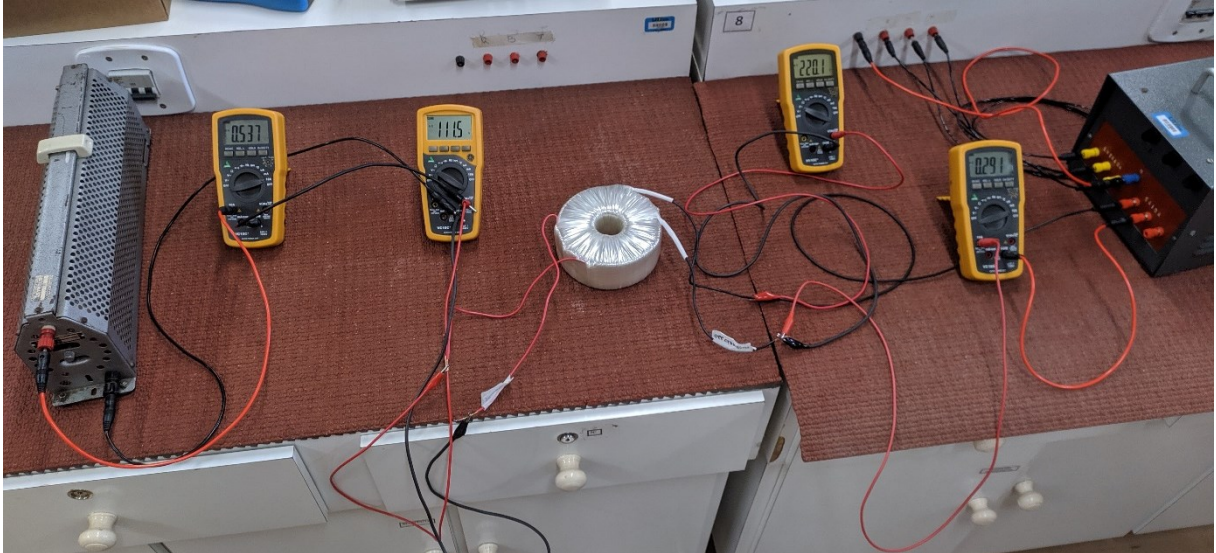


Figura 20: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em 187Ω .
Fonte: autoria própria.

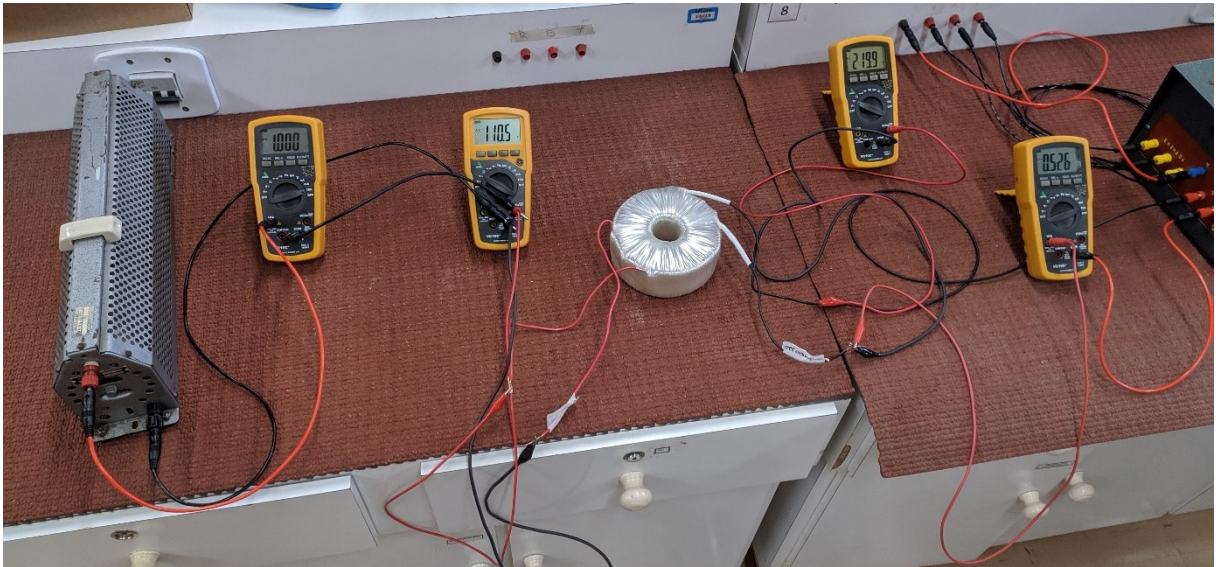


Figura 21: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em 108Ω .
Fonte: autoria própria.

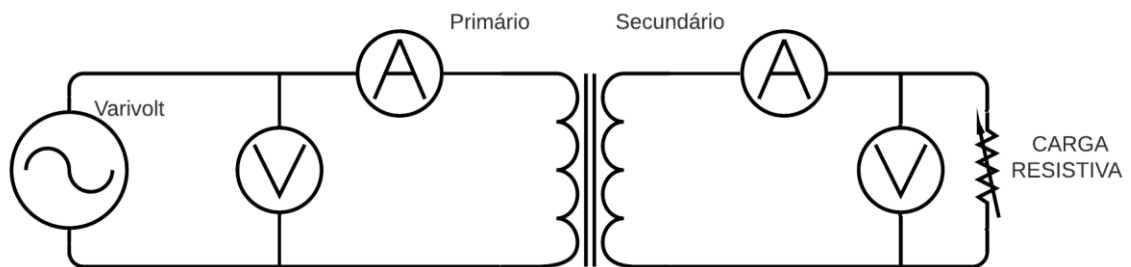


Figura 22: Resultados do teste realizado utilizando como carga o reostato ajustado em 108Ω .
Fonte: autoria própria.

Num terceiro momento o reostato foi substituído pela lâmpada incandescente e foram realizadas as medições necessárias (figura 23), o esquema de ligação é mostrado na figura 24.

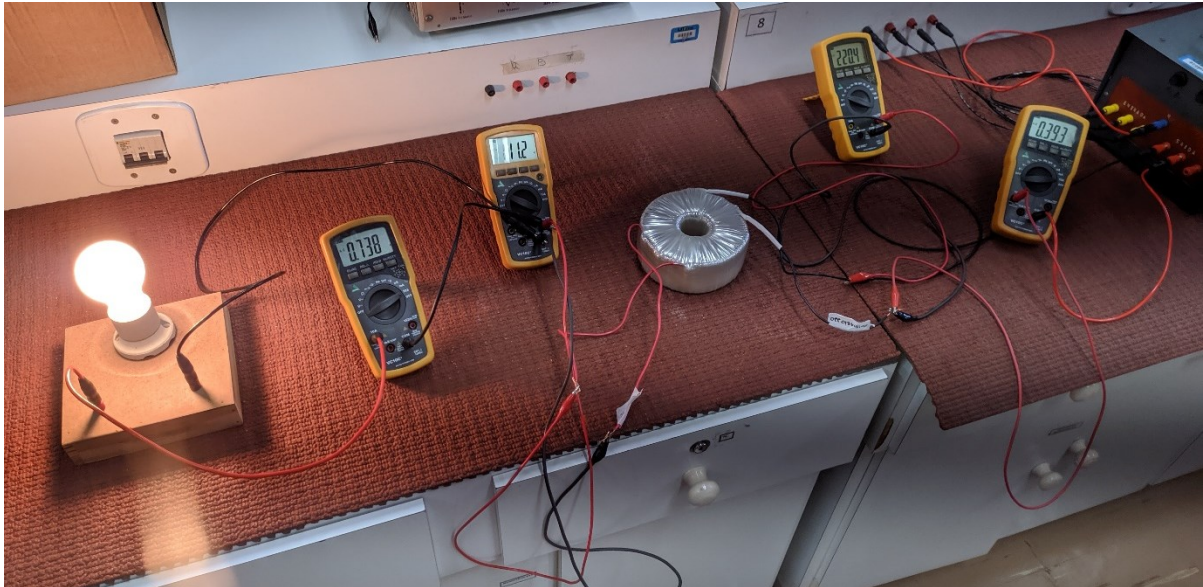


Figura 23: Resultados do ensaio utilizando lâmpada incandescente como carga. Fonte: autoria própria.

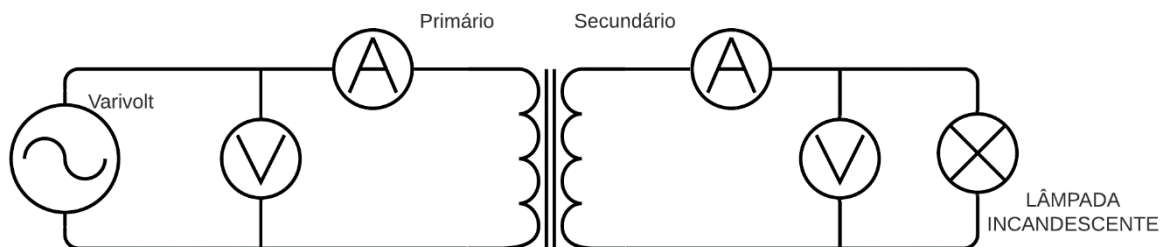


Figura 24: Esquema de ligação do ensaio utilizando a lâmpada incandescente. Fonte: autoria própria.

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios anteriormente citados.

Tabela 8: Resultados do teste para diferentes cargas. Fonte: autoria própria.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	R = 187	R =108	Lâmpada Incandescente
Tensão de alimentação no 1°	V_{in}	V	220,3	219,9	220,2
Corrente medida no 1°	I_{in}	A	0,29	0,52	0,39
Tensão medida no 2°	V_o	V	111,5	110,5	111,1
Corrente medida no 2°	I_o	A	0,53	1,00	0,73

A partir dos resultados dos testes é possível observar que as tensões e correntes medidas estão condizentes com o que foi projetado e o transformador se comportou muito bem, principalmente operando com carga nominal. O ensaio com o reostato em 108Ω mostra bem isso, pois com a corrente nominal de 1 A no enrolamento secundário foi obtida uma diferença de apenas 0,6V da tensão nominal de 110V para a qual o transformador foi projetado.

4.3. RENDIMENTO E REGULAÇÃO DE TENSÃO

Segundo Bim, 2012, ao retirar a carga de um transformador, a tensão nos terminais do secundário sofre uma certa variação mantendo a tensão fixa no enrolamento primário, denominada *regulação de tensão* (α), e pode ser expressa pela equação 37, em que V_{2carga} representa a tensão do secundário sob carga e V_{2vazio} a tensão após a retirada da carga.

$$\alpha = \frac{V_{2vazio} - V_{2carga}}{V_{2carga}} * 100 \quad (37)$$

Sendo assim, a partir dos dados apresentados nas tabelas 7 e 8, foi possível determinar o valor prático da regulação de tensão do transformador através da equação 38.

$$\alpha = \frac{112,7 - 110,5}{110,5} * 100 = 1,92\% \quad (38)$$

A regulação de tensão é a variação da tensão desde a vazio até plena carga. A meta da regulação de tensão é 5%. Quanto menor a regulação de tensão melhor é o transformador. Observar que 1,92% é menor que 5%. Desta forma conclui-se que o transformador superou sua meta de regulação de tensão.

O rendimento de um transformador é dado pela razão entre a potência útil na saída e a potência de entrada como mostra a equação 39.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_o * I_o}{V_{in} * I_{in}} \quad (39)$$

Utilizando os dados obtidos na tabela 8 é possível calcular o rendimento do transformador como mostra a equação 40.

$$n = \frac{V_o * I_o}{V_{in} * I_{in}} = \frac{110,5 * 1,00}{219,9 * 0,52} = 96,6\% \quad (40)$$

Este não é o melhor método para a realização do cálculo do rendimento, mas apresenta uma boa aproximação, visto que para obter uma melhor precisão deve-se levar em consideração as perdas que são obtidas através do ensaio a vazio, ensaio esse que não foi realizado em nosso caso.

Para todos os cálculos foram utilizados os dados referentes ao ensaio com carga resistiva de 108Ω em que foi obtida a corrente nominal no enrolamento secundário. Os resultados das equações 38 e 40 são satisfatórios, uma vez que ficaram muito próximos dos valores calculados e simulados.

4.3.1. CUSTOS

Como o transformador foi adquirido já montado não foi possível mensurar os valores de todos os componentes utilizados, uma vez que a empresa não forneceu um relatório detalhado. O custo final foi de R\$230,00 reais incluindo o frete.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo geral o projeto, implementação e teste de um transformador monofásico toroidal.

Inúmeras etapas foram necessárias para o desenvolvimento do trabalho, sendo que a maior dificuldade foi, após a decisão de adquirir o transformador já montado devido a motivos citados anteriormente, encontrar uma empresa com os requisitos necessário para a realização da implementação do transformador, tendo em vista que a maioria das indústrias do ramo não trabalha com vendas para pessoa física.

Apesar do acadêmico não passar pela experiência de, de fato realizar a montagem do dispositivo, foi possível aprender e entender, a partir de conversas com os responsáveis pela construção, todos os processos necessários pelos quais os componentes do transformador passaram até a entrega do produto final, bem como a importância e as implicações práticas que cada etapa tem. Outro fator que deve ser mencionado foi a interação com empresas e profissionais com vasta experiência na área, fornecendo uma perspectiva diferente da do mundo acadêmico em que se está acostumado, mesmo que superficialmente, do funcionamento de uma empresa, das etapas necessárias desde o pedido até a finalização do produto.

A realização desse trabalho possibilitou ao acadêmico a aplicação e melhor entendimento de diversos conceitos de inúmeras disciplinas vistas durante o curso como máquinas elétricas 1, eletromagnetismo, instrumentos de medidas elétricas, gestão de projetos, entre outras.

Num panorama geral o trabalho atendeu os objetivos, o algoritmo desenvolvido foi capaz de fornecer parâmetros construtivos demandando um tempo muito menor quando comparado ao cálculo manual, tendo em vista que a partir dos testes realizados obteve-se resultados condizentes com as metas estabelecidas inicialmente sendo possível assim validar o projeto.

REFERÊNCIAS

BASTISTELA, N. J., “Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício”. Tese de doutorado – UFSC, Florianópolis – 2001.

BIM, Edson., *Máquinas elétricas e acionamento*. Elsevier Brasil, 2015.

COLONEL Wm. T. McLyman, 2011, “Magnetic Cores from: Transformer and Inductor Design Handbook CRC Press”.

DEL TORO, Vincent., *Fundamentos de máquinas elétricas*. Prentice-Hall do Brasil, 1994.

FITZGERALD, A. E., *Máquinas Elétricas*. 7ª edição. 2014.

MARTIGNONI, Alfonso., Transformadores. 8ª Edição. Editora Globo, 1991.

MORA, J. F. Máquinas Elétricas. 5ª. ed. Madri: Concepción Fernández Madrid, 2003

SALUSTIANO, Rogério. et al. “Análise técnica de transformadores para redes de média tensão”. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2017.

Tersariol, F. G. R., “*Estudo do caminho magnético médio em estrutura eletromagnética monofásica*”. Dissertação de Mestrado - UFSC. Florianópolis, 2017.

APÉNDICE A – ALGORITMO COMPUTACIONAL

```

clear;
clc;

Vin = 220;
Vo = 110;
Io = 1;
Po = Vo*Io;
Freq = 60;
rend = 0.95;
alfa = 0.05;
Bm = 1.2;
Ku = 0.4;
Tr = 55;
Kf = 4.44;

Pt = Po*((1/rend)+1);
Ke = 0.145*Kf*Kf*Freq*Freq*Bm*Bm*10^-4;
Kg = Pt/(2*Ke*alfa*100);

Od = 12.732;
Id = 5.080;
Ht = 4.445;
Mpl = 23.94;
Wtfe = 0.839727;
Wtcu = 805.60;
Mlt = 11.18;
Ac = 4.597;
Wa = 20.271;
Ap = 93.181;
Kgnovo = 15.33034;
At = 432.5;

Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*Freq*Ac);
J = (Pt*10^4)/(Kf*Ku*Bm*Freq*Ap);
Iin = Po/(Vin*rend);

Awpb = Iin/J;
Awgp = 24;
diamp = 0.0566;
Awpbnovo = 2.0470*10^-3;
Awp = 2.5140*10^-3;
uohmsporcmp = 842.1;

Rp = Mlt*Np*uohmsporcmp*10^-6;
Ip=Iin;
Pp=Ip*Ip*Rp;

Vs = Vo;
Ns = ((Np*Vs)/Vin)*(1+alfa);
Awsb = Io/J;

```

```
Awgs = 20; %
```

```

diams = 0.0879;
Awsbnovo = 5.1880*10^-3;
Aws = 6.0650*10^-3;
uohmsporcms = 332.3;

Rs = Mlt*Ns*uohmsporcms*10^-6;

Is=Io;
Ps = Is*Is*Rs;

Pcu= Pp+Ps;

alfacalc=Pcu/Po;

K = 0.0005570;
M = 1.680;
N = 1.860;

wattsporkg = (K)*(Freq^M)*(Bm^N);
Pfe = wattsporkg*Wtfe;

Psoma = Pcu+Pfe;
Rendcalc = Po/(Po + Psoma);

Pporarea = Psoma/At;

Trcalc = 450*(Pporarea^0.826);

Kus = (Ns*Awsbnovo)/Wa;
Kup = (Np*Awpbnovo)/Wa;
Kunovo = Kup + Kus;

EspLam = 0.027;
Qvoltage = (Od-Id)*(1/EspLam);

Pext = (2*(Od-Id)+2*Ht);
Espira = Pext*1.26;
CompPrim = Np*Espira*10^-2;
CompSec = Ns*Espira*10^-2;

```