

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

KAMILA NAVA

**TRANSFORMADOR MONOFÁSICO: CÁLCULO, SIMULAÇÕES E
TESTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2020**

KAMILA NAVA

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO: CÁLCULO, SIMULAÇÕES E TESTES

SINGLE-PHASE TRANSFORMER: CALCULATION, SIMULATION AND TESTS

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).

Orientador: Prof. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes.

Coorientador: Prof. Me. Marcio Tadayuki Nakaura.

PATO BRANCO

2020



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 **TRANSFORMADOR MONOFÁSICO: CÁLCULO, SIMULAÇÕES E TESTES**, da aluna **KAMILA NAVA** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **264** de 2020.

Fizeram parte da banca os professores:

Profa. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Prof. Me. Marcio Tadayuki Nakaura

Prof. Me. José Paulo de Barros Neto

Prof. Me. Arthur Tsuguiyoshi Hara

Prof. Me. Santo Tiveroli Filho

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Zuleica e Wolmar pelo apoio em todos os momentos necessários durante minha graduação.

À professora Filomena Barbosa Rodrigues Mendes, por sua disponibilidade, confiança e todo o auxílio durante este trabalho.

À Câmetra Eletro Motores que disponibilizou o ambiente para a confecção do projeto, principalmente por disponibilizar a bobinadeira para a confecção dos enrolamentos.

Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

*"Isso de querer ser exatamente aquilo que a gente é, ainda vai nos levar além."
(Paulo Leminski)*

RESUMO

NAVA, Kamila. **Transformador Monofásico: Cálculo, simulações e testes**. 2020. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2020.

A invenção do transformador juntamente com o desenvolvimento das estações geradoras de energia em corrente alternada contribuíram para eliminar as restrições de alcance e capacidade dos sistemas de energia elétrica, possuindo enorme importância em diversas áreas da engenharia elétrica. Este trabalho apresenta o projeto de um transformador monofásico. Foi desenvolvido um algoritmo que possibilitou a análise do projeto a partir de parâmetros pré-determinados. Posteriormente foi confeccionado um protótipo e realizou-se testes e simulações que comparam o transformador implementado com as especificações do projeto.

Palavras-chave: Transformador monofásico. Algoritmo para transformador. Protótipo de transformador.

ABSTRACT

NAVA, Kamila. **Single-Phase Transformer: Calculation, simulation and tests**. 2020. 46

p. Undergraduate Thesis (Electrical Engineering Course) – Federal University of Technology Paraná. Pato Branco, 2020.

The transformer invention, combined with the development of alternating current power generating stations, contributed to eliminate the range and capacity restrictions of electrical energy systems, having high importance in several areas of electrical engineering. This conclusion work presents a single-phase transformer project. Initially a study on the transformers was carried out, to create an algorithm that allows the development of the project based on certain parameters. Subsequently, the prototype was made with the purchased materials and finally tests and simulations were used to compare the implemented transformer with the project specifications.

Keywords: Single-Phase Transformer. Algorithm. Prototype.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos esquemáticos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente	18
Figura 2 – Modelos esquemáticos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico e (b) enrolamento alternado.....	19
Figura 3 – Exemplo de placa de identificação para transformador monofásico.	19
Figura 4 – Diagrama esquemático de um transformador de dois enrolamentos.	21
Figura 5 – Fluxos do transformador monofásico.	21
Figura 6 – Dimensões das lâminas do núcleo	25
Figura 7 – Carretel	30
Figura 8 – Bobinadeira utilizada (Câmara Eletro Motores)	31
Figura 9 – Carretel com o enrolamento primário e papel isolante.....	31
Figura 10 – Carretel com o enrolamento secundário.....	32
Figura 11 – Carretel com o enrolamento secundário finalizado com papel isolante	32
Figura 12 – Soldagem fio AWG 18.....	33
Figura 13 – Chapas EI	33
Figura 14 – Processo de montagem das chapas EI	34
Figura 15 – Processo de colocação dos parafusos	34
Figura 16 – Verniz utilizado	35
Figura 17 – Transformador Finalizado.....	35
Figura 18 – Teste da tensão à vazio.....	38
Figura 19 – Teste das tensões e correntes com carga resistiva	39
Figura 20 – Carga resistiva	40
Figura 21 – Teste com lâmpada incandescente.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do projeto do transformador monofásico.....	29
Tabela 2 – Parâmetros do projeto do transformador monofásico.....	30
Tabela 3 – Resultados da simulação do algoritmo para transformador monofásico	36
Tabela 4 – Teste de continuidade para o transformador monofásico	37
Tabela 5 – Teste da tensão a vazio.....	37
Tabela 6 – Teste das tensões e correntes com carga resistiva	38
Tabela 7 – Teste com lâmpada incandescente	40

LISTA DE SÍMBOLOS

e_{ind}	Tensão induzida em uma espira.
λ	Fluxo concatenado na bobina.
Φi	Fluxo médio por espira.
N	Número de espiras.
Φ_p	Fluxo médio no enrolamento primário.
Φ_s	Fluxo médio no enrolamento secundário.
Φ_M	Fluxo mútuo.
Φ_D	Fluxo de dispersão.
Φ_{DP}	Fluxo disperso no enrolamento primário.
Φ_{DS}	Fluxo disperso no enrolamento secundário.
N_p	Número de espiras no enrolamento primário.
N_s	Número de espiras no enrolamento secundário.
$v_p(t)$	Tensão em corrente alternada no enrolamento primário.
$v_s(t)$	Tensão em corrente alternada no enrolamento secundário.
$e_p(t)$	Tensão induzida pelo enrolamento primário.
$e_s(t)$	Tensão induzida pelo enrolamento secundário.
a	Relação de transformação.
P_{cu}	Perdas no cobre.
P_{fe}	Perdas no ferro.
I	Corrente que passa pelo condutor.
ρ	Resistividade do cobre.
l	Comprimento do condutor.
S_c	Área da secção transversal do condutor.
α	Regulação de tensão

$P_{w/kg}$	Perda por unidade de massa.
W_{tfe}	Massa do ferro em kilogramas.
f	Frequência.
B_m	Indução magnética máxima.
η	Rendimento.
T_r	Temperatura máxima.
P_t	Potência total do transformador.
P_o	Potência de saída do transformador.
K_g	Constante de geometria do núcleo.
K_e	Constante das condições elétricas e magnéticas.
G	Altura da janela do núcleo.
F	Largura da janela do núcleo.
E	Largura da coluna central do núcleo.
W_a	Área da janela do núcleo.
A_c	Área do núcleo.
MPL	Comprimento médio do caminho magnético.
W_{tCu}	Peso do cobre.
A_t	Área requerida para dissipar calor.
A_p	Produto das áreas do núcleo.
MLT	Comprimento médio da espira em uma volta.
J	Densidade de corrente.
A_{wpb}	Área do fio primário.
A_{wsb}	Área do fio secundário.
I_{in}	Corrente de entrada.
I_o	Corrente de saída.
K_u	Fator de utilização da janela do núcleo.

K_f	Constante de forma de onda.
V_{in}	Tensão de entrada.
V_s	Tensão de saída.
K_{up}	Constante da utilização da janela do enrolamento primário.
K_{us}	Constante da utilização da janela do enrolamento secundário.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 – TRANSFORMADOR.....	17
2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	17
2.1.1 Núcleo	17
2.1.2 Enrolamentos	18
2.1.3 Dados de Placa	19
2.2 FUNCIONAMENTO	20
2.3 PERDAS	23
2.3.1 Perdas no condutor de Cobre.....	23
2.3.2 Perdas no Núcleo do Transformador.....	23
2.4 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR	24
2.4.1 Dimensionamento do Núcleo.....	24
2.4.2 Dimensionamento dos Condutores	26
2.4.3 Janela do Núcleo.....	27
2.4.4 Quantidade de Material	27
2.4.4.1 Quantidade de Lâminas.....	27
2.4.4.2 Comprimento dos Condutores	28
3 – DESENVOLVIMENTO	29
3.1 PROJETO DO TRANSFORMADOR.....	29
3.2 MONTAGEM DO CARRETEL.....	30
3.3 ENROLAMENTOS.....	31
3.4 NÚCLEO.....	33
3.5 RESULTADO FINAL.....	34
4 – RESULTADOS.....	36
4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	36
4.2 TESTE DE CONTINUIDADE	36
4.3 TESTE DA TENSÃO À VAZIO	37
4.4 TESTE DAS TENSÕES E CORRENTES COM CARGA RESISTIVA.....	38
4.5 TESTE COM LÂMPADA INCANDESCENTE.....	40

5 – CONCLUSÃO	42
Referências	43
APÊNDICE A– ALGORITMO PARA CÁLCULO DO PROJETO DO TRANSFOR- MADOR	44

1 INTRODUÇÃO

As primeiras estações geradoras de energia elétrica geravam e transmitiam a energia a partir de tensões muito baixas sendo necessário utilizar correntes muito altas para que houvesse o fornecimento de quantidades significativas de energia elétrica. Devido a utilização de correntes muito altas, ocorriam quedas de tensão e perdas energéticas altíssimas nas linhas de transmissão o que ocasionava uma limitação da área de atendimento das estações geradoras de energia.

Conforme Chapman, a invenção do transformador e o desenvolvimento simultâneo de estações geradoras de energia CA eliminaram para sempre essas restrições de alcance e de capacidade dos sistemas de energia elétrica.

O transformador é um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nos princípios eletromagnéticos da Lei de Faraday e da Lei de Lenz. Ele possui no mínimo dois enrolamentos que são acoplados por um fluxo magnético comum que flui através de um núcleo. O núcleo por onde percorre o fluxo é composto por um material ferromagnético. Seus enrolamentos servem então, de caminho para a corrente elétrica e uma vez que aplica-se uma tensão no enrolamento primário, origina-se um campo magnético próximo a este enrolamento. Desse modo, é desenvolvido no núcleo linhas de campo magnético que produzem indução magnética, as quais atravessam a seção transversal do núcleo e produzem fluxo magnético, uma vez que este fluxo é variável no tempo ocorre o aparecimento de uma tensão induzida no enrolamento secundário.

Sua principal finalidade é a conversão de potência elétrica CA de um nível de tensão em outro nível de tensão mas com mesma frequência. Este equipamento é utilizado em diversas aplicações destacando-se a elevação e redução da tensão ou do número de fases de transporte e distribuição de energia elétrica.

Segundo Umans, o transformador também é largamente utilizado em circuitos de baixa potência, em circuitos eletrônicos de baixas correntes e nos circuitos de controle. Executam funções como: casar as impedâncias entre uma fonte e sua carga, obter a máxima transferência de potência, isolar um circuito do outro, ou isolar a corrente contínua mantendo a continuidade CA entre dois circuitos.

Os transformadores podem também ser utilizados em sistemas de comunicações, encontrados em circuitos de rádio e televisão (TORO, 1994).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é projetar um transformador monofásico que atenda aos parâmetros de: 110 W, 60 Hz, tensão primária de 220 V e secundária de 110 V,

corrente secundária de 1 A, rendimento de 95%, regulação de tensão de 5%, indução máxima de 1,2 T, elevação de temperatura de 55°C e fator de utilização de janela de 0,4%.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a teoria dos transformadores a partir de bibliografias referentes ao assunto.
- Escrever um algoritmo para projetar um transformador monofásico com os parâmetros desejados.
- Fazer a simulação do algoritmo e observar se os resultados correspondem as metas estabelecidas.
- Especificar o material necessário para a confecção do transformador.
- Construir um protótipo de transformador.
- Efetuar ensaios e medições no equipamento.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentado uma introdução sobre o transformador e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta uma teoria sobre o transformador, explicando seus aspectos construtivos, funcionamento, perdas e como é realizado o dimensionamento do transformador.

No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento do projeto onde são descritos os métodos utilizados para a montagem do protótipo.

No Capítulo 4 mostra os resultados obtidos por meio de ensaios e testes realizados no transformador, assim como, uma discussão sobre os resultados obtidos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho, onde constam também, as sugestões para os trabalhos futuros. No Apêndice A exibe o algoritmo criado para o desenvolvimento do projeto do transformador.

2 TRANSFORMADOR

O transformador é um dispositivo que funciona em corrente alternada e é responsável por realizar a transformação da energia elétrica possibilitando a redução ou elevação da tensão elétrica alternada. Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos referentes aos transformadores, apresentando os aspectos construtivos, funcionamento e principais perdas. Na sequência apresenta-se como fazer o dimensionamento do transformador monofásico.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Essencialmente o transformador é constituído por dois ou mais enrolamentos que são acoplados magneticamente por um núcleo de material ferromagnético.

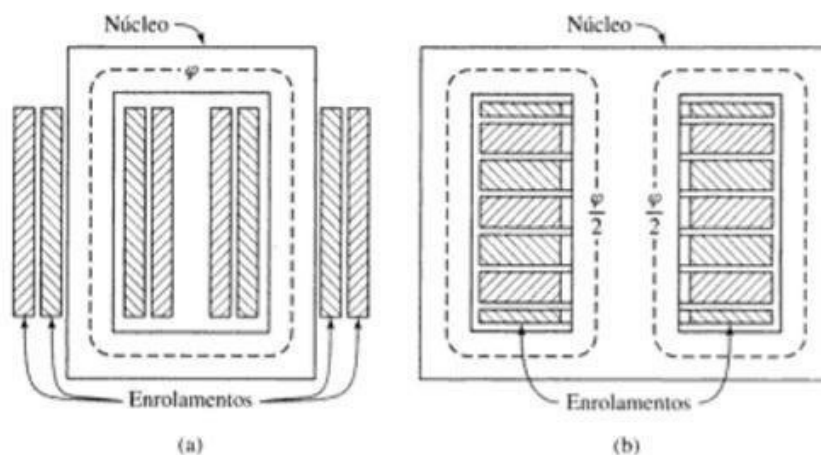
2.1.1 Núcleo

O núcleo do transformador é definido pelo sistema que forma seu circuito magnético, comumente constituído por chapas de aço silício. Estas chapas passam por um tratamento químico especial conhecido comercialmente como carlite, que é aplicado uma camada isolante muito fina (0,01mm) sobre as chapas, reduzindo consideravelmente as perdas no ferro. Os espaços vazios por onde passam os enrolamentos são chamados de janelas do núcleo (MORA, 2008).

Segundo (UMANS, 2014), os tipos mais comuns de arranjos de construção do núcleo são:

- Núcleo Envolvido: onde os enrolamentos envolvem duas pernas de um núcleo magnético retangular;
- Núcleo Envolvente: onde os enrolamentos envolvem a perna central de um núcleo de três pernas.

Figura 1 – Modelos esquemáticos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente.



Fonte: Umans (2014)

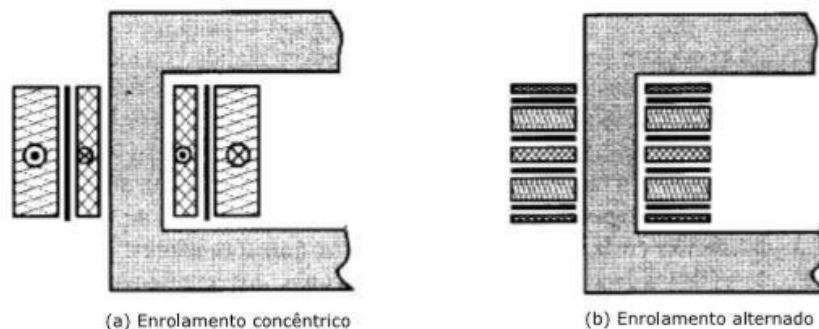
2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos constituem o circuito elétrico do transformador. Eles são feitos de condutores de cobre ou de alumínio, sendo o segundo menos comum. Possuem forma cilíndrica ou de seção retangular. Os condutores são cobertos por uma camada de isolamento que pode ser de verniz isolante, fibra de algodão ou papel isolante (MORA, 2008).

Segundo (MORA, 2008), os enrolamentos podem ser classificados em:

- Enrolamentos concêntricos: as suas bobinas formam cilindros coaxiais na coluna do núcleo e cada enrolamento é dividido por um material isolante;
- Enrolamentos alternados: os enrolamentos se subdividem em seções de tal forma que as bobinas se sucedem.

Figura 2 – Modelos esquemáticos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico e (b) enrolamento alternado.



Fonte: Mora (2008)

2.1.3 Dados de Placa

Todo transformador deve possuir uma placa de identificação disposta na parte externa que trata-se de uma chapa metálica que inclui os dados do produto. Os dados inseridos são: tensão, frequência, potência aparente, impedância percentual e fator de potência. Esses dados são as grandezas nominais da máquina. Também a partir desta placa é possível encontrar os esquemas e formas de ligação do transformador.

Figura 3 – Exemplo de placa de identificação para transformador monofásico.

ROMAGNOLE PRODUTOS ELETRICOS S.A.
 C.N.P.J. 78.958.717/0016-14
 RODOVIA BR 376 Km 394
 MANDAGUARI - PARANA - BRASIL

TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

N.º FECHA DE FABR. / /

kVA ACEITE AISLANTE PESO NETO kgf

IMP. % NORMA NBR - 5440 FREQ. 50 Hz

ENR.	VOLTIOS	POS.	COMUT.	LIGA	TERM.
AT	15120	1	7	-	8
	14760	2	8	-	5
	14400	3	5	-	6
	14040	4	6	-	3
BT	13680	5	3	-	4
	231	A VACIO		H1-H2T	
	220	A PLENA CARGA		X1 - X2	

ALTITUD HASTA MSNM POLARIDAD SUSTRACTIVA

VOLUMEN DE ACEITE L BIL kV

INDUSTRIA BRASILEIRA

P.I. N.º 4140

Fonte: Fazan, 2020

2.2 FUNCIONAMENTO

O transformador é um dispositivo de corrente alternada que opera baseado nas leis de Faraday e de Lenz. A partir da lei de Faraday temos que:

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

Onde λ é o fluxo concatenado na bobina onde a tensão é induzida e e_{ind} é a tensão induzida em uma espira. O fluxo concatenado é a soma do fluxo que passa através de cada espira, dado por:

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

Segundo Chapman (2013, p. 78), É possível definir um *fluxo médio* por espira em uma bobina. Se o fluxo concatenado de todas as espiras da bobina for λ e se houver N espiras, o *fluxo médio por espira* será dado por:

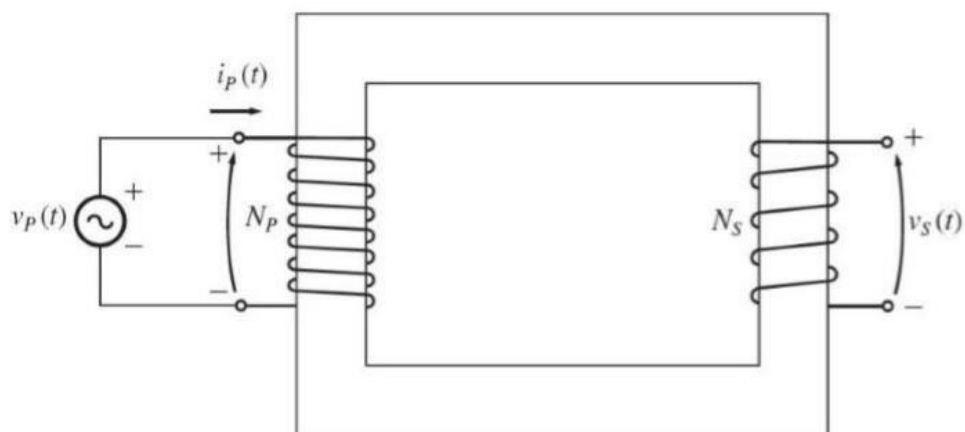
$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N} \quad (3)$$

Assim a lei de Faraday pode ser escrita da seguinte forma:

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

A Figura 4 representa um transformador que possui duas bobinas de fios enroladas ao redor do seu núcleo, sendo que o enrolamento primário está conectado a uma fonte CA de potência. Considerando que seja aplicada uma tensão $v_P(t)$ diretamente a esta bobina, a partir da lei de Faraday é possível determinar o fluxo médio primário:

Figura 4 – Diagrama esquemático de um transformador de dois enrolamentos.

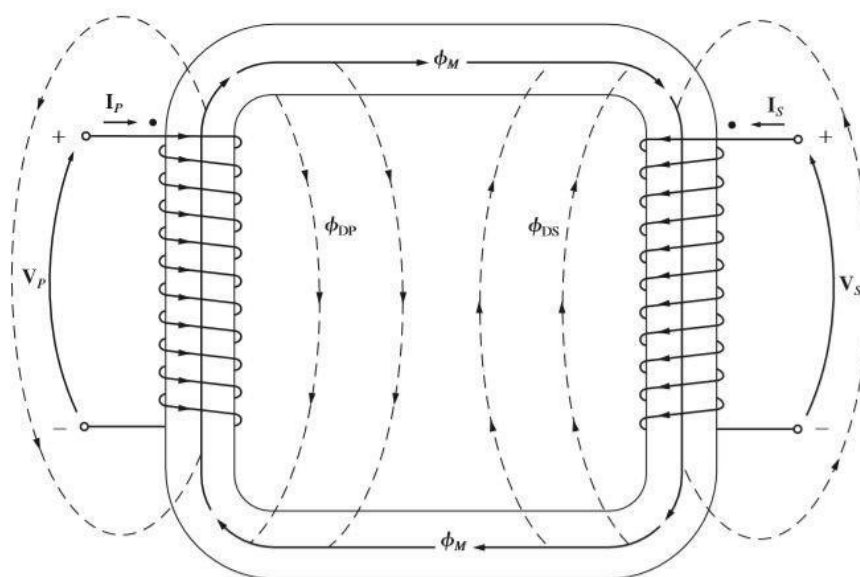


Fonte: Chapman (2013)

$$\bar{\Phi}_p = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt \tag{5}$$

O efeito do fluxo primário que atinge a segunda bobina depende de quanto fluxo irá atingir a bobina secundária, uma vez que algumas linhas de fluxo deixam o núcleo de ferro passando através do ar, não conseguindo chegar da bobina primária até a secundária como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Fluxos do transformador monofásico.



Fonte: Chapman (2013)

Assim, o fluxo produzido na bobina primária pode ser dividido em duas partes, sendo elas o fluxo mútuo (Φ_M) que mantém-se no núcleo e enlaça os dois enrolamentos e o fluxo de dispersão (Φ_D).

Desse modo tem-se que o fluxo primário médio total ($\overline{\phi_P}$) e o fluxo secundário médio total ($\overline{\phi_S}$) são dados pelas expressões:

$$\overline{\phi_P} = \phi_M + \phi_{DP} \quad (6)$$

$$\overline{\phi_S} = \phi_M + \phi_{DS} \quad (7)$$

Logo, a lei de Faraday para o enrolamento primário é expressa por:

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

e para o enrolamento secundário é:

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

Dessa maneira, a tensão primária oriunda do fluxo magnético fica:

$$e_p(t) = N_p \left(\frac{d\Phi_M}{dt} \right) \quad (10)$$

e a tensão secundária oriunda do fluxo mútuo é:

$$e_s(t) = N_s \left(\frac{d\Phi_M}{dt} \right) \quad (11)$$

Analisando as equações, conclui-se que:

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{d\Phi_M}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \quad (12)$$

Segundo Chapman (2013, p. 80), a razão entre a tensão primária e a tensão secundária, ambas causadas pelo fluxo mútuo, é igual à relação de espiras do transformador. Sendo a a relação do transformador dada pela equação:

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (13)$$

Uma vez que pode-se considerar que o fluxo mútuo é mais elevado que o fluxo de dispersão, a relação de transformação pode ser obtida por:

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (14)$$

2.3 PERDAS

Para o projeto de um transformador, é necessário levar em consideração as perdas de potência que nele existem.

2.3.1 Perdas no condutor de Cobre

As perdas no condutor de cobre que ocorrem em um transformador, são originadas devido ao aquecimento das bobinas onde parte da energia é dissipada em forma de calor. Em outras palavras, pode-se dizer que estas perdas ocorrem por efeito Joule devido à resistência ôhmica dos seus enrolamentos.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S_c} [\Omega] \quad (15)$$

Pela equação 15, é possível encontrar as perdas no cobre do transformador, onde I é a corrente que passa pelo condutor, ρ é a resistividade do cobre, S_c é a área da seção transversal do condutor e l é o comprimento do condutor.

Com as perdas no cobre e a potência total de saída do transformador é possível encontrar o valor da sua regulação de tensão, que é dada pela equação:

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_{out}} \quad (16)$$

2.3.2 Perdas no Núcleo do Transformador

Também conhecidas como perdas no ferro, as perdas existentes no núcleo do transformador são divididas em perdas por correntes de Foucault, perdas por histerese magnética e perdas excedentes.

As perdas por correntes parasitas de Foucault são ocasionadas devido as correntes que circulam no material ferromagnético provocando aquecimento, representando a energia não transferida para a carga do transformador. Estas perdas podem ser reduzidas utilizando um material ferromagnético de alta resistividade ou fazendo a laminação do núcleo.

Calcula-se as perdas no núcleo a partir da equação:

$$P_{fe} = P_{w/kg} \cdot W_{tfe} [W] \quad (17)$$

Onde $P_{w/kg}$ é a perda por unidade de massa e W_{fe} é a massa do ferro em kg.

A perda por unidade de massa é obtida a partir da frequência de operação e da indução máxima que gera o fluxo e é dada pela equação:

$$P_{w/kg} = K \cdot f^M \cdot B_m^N [W/kg] \quad (18)$$

As constantes das perdas K, M e N dependem da espessura da lâmina, do material que constitui ela e da frequência.

Uma vez tendo os valores das perdas no cobre e no ferro, é possível calcular o seu somatório que é dado pela equação:

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

Com este valor é possível então encontrar o valor do rendimento do transformador, dado pela equação:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{soma}} \quad (20)$$

Sabendo-se que At é o valor da área que necessita-se para a dissipação de calor, pode-se calcular a perda por unidade de área, dada por:

$$P_{porarea} = \frac{P_{soma}}{At} [W/cm^2] \quad (21)$$

Por fim é possível calcular o aumento de temperatura do transformador dado por:

$$T_r = 450 \cdot (P_{porarea})^{0.826} (^\circ C) \quad (22)$$

2.4 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

Para que seja possível dimensionar um transformador monofásico é necessário definir as dimensões do núcleo e dos seus condutores. Neste tópico será apresentado como calcular o núcleo laminado de aço silício feito com chapas "EI" e os condutores cilíndricos de cobre esmaltado que serão isolados entre si.

2.4.1 Dimensionamento do Núcleo

Para o dimensionamento do núcleo é necessário possuir o valor da sua potência total que é encontrada a partir dos valores nominais do transformador. A partir dos

valores de corrente e tensão de saída é possível encontrar sua potência de saída podendo então encontrar o valor da potência total do transformador, dada pela equação:

$$P_t = P_o \left(\frac{1}{r_{end}} + 1 \right) [W] \quad (23)$$

Com este valor é possível calcular a constante de geometria do núcleo K_g para um dado valor de regulação de tensão, dado por:

$$K_g = \frac{P_t}{\xi \cdot 2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100} [cm^5] \quad (24)$$

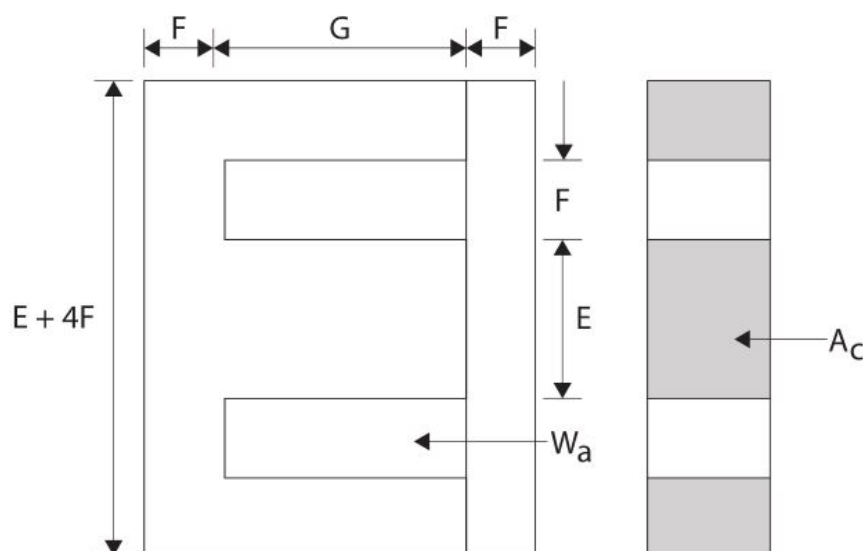
onde K_e é a constante das condições elétricas e magnéticas, dada por:

$$K_e = 0,145 \cdot K_f^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot 10^{-4} \quad (25)$$

Sendo K_f a constante de forma de onda que possui um valor de 4,44 para uma onda senoidal, f é a frequência de operação do transformador dada em *Hertz* e B_m a indução máxima que gera o fluxo mútuo dada em Tesla.

Uma vez tendo o valor da constante de geometria do núcleo definida é possível encontrar as dimensões das lâminas como pode ser visto na figura:

Figura 6 – Dimensões das lâminas do núcleo.



Fonte: Adaptado de BLUME, (1938)

A partir da Figura 6 é possível identificar que G é a altura da janela do núcleo e F a largura da janela do núcleo ambas em *cm*. W_a é a área da janela do núcleo

em cm^2 , E a largura da perna central do núcleo. Ac^2 é a área do núcleo do material ferromagnético.

Também é possível obter outros parâmetros importantes como o comprimento médio do caminho magnético (MPL), o peso do núcleo em gramas (W_{tfe}), o peso do cobre em gramas (W_{tcu}), a área da janela em cm^2 (W_a), a área requerida para dissipar calor (At), o produto das áreas do núcleo (Ap) e o comprimento médio da espira em uma volta em cm (MLT).

2.4.2 Dimensionamento dos Condutores

Para o dimensionamento dos condutores do transformador é preciso realizar o cálculo da densidade de corrente que é dada por:

$$J = \frac{P_t \cdot 10^4}{K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p} \left[\frac{A}{cm} \right] \quad (26)$$

Onde é necessário definir o valor do fator de utilização da janela do núcleo (K_u) e o produto das áreas do núcleo (Ap). Com estes dois valores e já tendo definido os outros parâmetros encontra-se este valor para assim realizar o cálculo da área dos fios necessários.

A área do fio primário do transformador é dada por:

$$A_{wpb} = \frac{I_{in}}{J} [cm^2] \quad (27)$$

onde, I_{in} é a corrente de entrada dada pela equação:

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in} \cdot \eta_{end}} [A] \quad (28)$$

e a área do fio secundário é dada por:

$$A_{wsb} = \frac{I_o}{J} [cm^2] \quad (29)$$

Com estes valores é possível selecionar o fio com o valor de área mais próxima a ser utilizado na confecção do protótipo. Por fim, calcula-se o número de espiras necessárias para cada enrolamento a partir das equações:

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} [voltas] \quad (30)$$

$$N_s = \left(N_p \cdot \frac{V_s}{V_{in}} \right) \cdot (1 + \alpha) [voltas] \quad (31)$$

Onde N_p é o número de espiras para o enrolamento primário e N_s o número de espiras para o enrolamento secundário.

2.4.3 Janela do Núcleo

A constante de utilização de janela do núcleo é calculada a partir da equação:

$$K_u = K_{up} + K_{us} \quad (32)$$

Onde K_{up} é a constante de utilização de janela do fio primário dada pela equação:

$$K_{up} = \frac{N_p \cdot A_{wpb}}{W_a} \quad (33)$$

e K_{us} é a constante de utilização de janela do fio secundário:

$$K_{us} = \frac{N_s \cdot A_{wsb}}{W_a} \quad (34)$$

Pode-se perceber que as equações estão em função dos valores de área do fio primário (A_{wpb}) e área do fio secundário (A_{wsb}). Lembrando que os valores utilizados para o cálculo desta constante são os valores comerciais das áreas dos fios. Também é necessário o número de espiras dos enrolamentos primário (N_p) e secundário (N_s). Para que seja possível realizar a construção do transformador, é necessário que o valor de K_u seja menor ou igual a 0,4.

2.4.4 Quantidade de Material

Para a confecção do transformador, é necessário o cálculo da quantidade de lâminas que serão utilizadas na montagem do núcleo e também o comprimento dos condutores dos enrolamentos.

2.4.4.1 Quantidade de Lâminas

A profundidade do núcleo é dada pela expressão:

$$Profund = \frac{Ac}{E} [cm] \quad (35)$$

Pela divisão entre a profundidade do núcleo e a espessura da lâmina ($EspLam$) é possível encontrar a quantidade de lâminas a serem utilizadas no projeto.

$$QuantLam = \frac{Profund}{EspLam} \quad (36)$$

2.4.4.2 Comprimento dos Condutores

Para avaliar a quantidade de metros de fios necessária para a produção do transformador é utilizada como referência a volta do perímetro maior do carretel ($PerimExt$). Também será utilizado um valor seguro de uma volta ao redor do carretel ($UmaVolta$).

$$PerimExt = (2.(E + 2.F)) + (2.Profund.10^{-1}) [cm] \quad (37)$$

$$UmaVolta = PerimExt + (PerimExt.0,26) \quad (38)$$

Desse modo, encontra-se a quantidade necessária para a confecção do transformador, onde $Metragem1$ refere-se ao primário e $Metragem2$ ao secundário:

$$Metragem1 = Np.UmaVolta.10^{-2} \quad (39)$$

$$Metragem2 = Ns.UmaVolta.10^{-2} \quad (40)$$

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é detalhado o processo do projeto e implementação do transformador monofásico. Inicialmente são apresentados os dados do projeto e os resultados obtidos por meio da simulação no algoritmo desenvolvido neste trabalho. Em seguida é apresentado o processo de implementação do transformador, mostrando a montagem do carretel, enrolamentos e a montagem do núcleo. Por fim, é apresentado o resultado final do protótipo.

3.1 PROJETO DO TRANSFORMADOR

Para o projeto do transformador monofásico, foram utilizados os parâmetros a seguir:

Tabela 1 – Parâmetros do projeto do transformador monofásico.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de entrada	V_{in}	220	V
Tensão de saída	V_o	110	V
Corrente secundária	I_o	1	A
Potência de saída	P_o	110	W
Frequência	f	60	Hz
Rendimento	η	95%	-
Regulação de tensão	a	5%	-
Indução máxima	B_m	1,2	T
Temperatura máxima	T_r	55	°C

Fonte: Autoria Própria

Com os dados apresentados na Tabela 1 e as equações apresentadas no Capítulo 2 escreveu-se um algoritmo em linguagem C para realizar os cálculos do projeto e determinar os parâmetros desejáveis. O algoritmo é apresentado no Apêndice A.

Os resultados obtidos a partir do algoritmo podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do projeto do transformador monofásico.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Potência Total	P_t	225,789	W
Constante das condições elétricas	K_e	1,481	-
Constante da geometria do núcleo	K_g	15,237	-
Dimensão E da lâmina	E	3,175	cm
Dimensão F da lâmina	F	1,588	cm
Dimensão G da lâmina	G	4,763	cm
Número de espiras do enrolamento primário	N_p	718,5843	-
Número de espiras do enrolamento secundário	N_s	377,256	-
Densidade de corrente	J	243,874	A/cm ²
Fio do enrolamento primário	AWG	24	AWG
Fio do enrolamento secundário	AWG	22	AWG
Diâmetro fio primário	diam _p	0,0566	cm
Diâmetro fio secundário	diam _s	0,0785	cm
Constante total de utilização da janela do núcleo	Kunovo	0,35	-
Quantidade de lâminas	QuantLam	59,144	-
Quantidade de fio primário	Metragem1	120,468	m
Quantidade de fio secundário	Metragem2	63,245	m

Fonte: Autoria Própria

3.2 MONTAGEM DO CARRETEL

O carretel utilizado neste trabalho foi cedido pela Professora Dr. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes. O carretel pode ser visto na Figura 7:

Figura 7 – Carretel



Fonte: Autoria Própria

3.3 ENROLAMENTOS

Para os enrolamentos foram utilizados fios de cobre esmaltado, fita crepe, papel isolante, fio AWG 24 e AWG 22 e tubos termo retráteis. Os enrolamentos foram enrolados em uma bobinadeira da empresa Câmera Eletro Motores na cidade de Am-
pére • Paraná, que gentilmente deixou a disposição para ser utilizada nesse projeto.

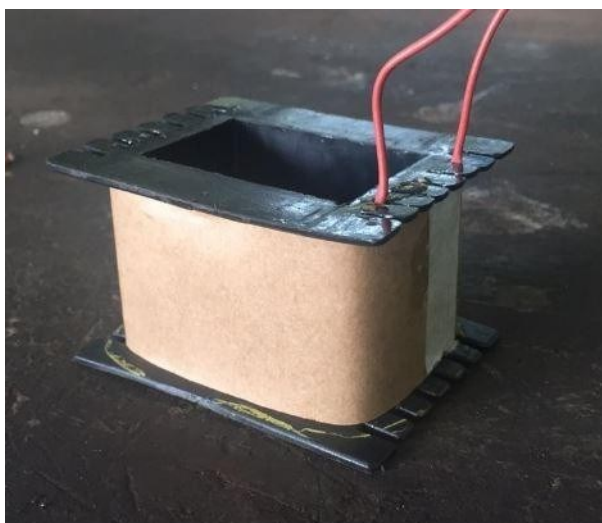
Figura 8 – Bobinadeira utilizada (Câmera Eletro Motores)



Fonte: Aatoria Própria

Primeiro foi realizado o enrolamento do fio referente a bobina primária do transformador. Foram realizadas 719 voltas com o fio AWG 24. Após realizadas as voltas, foi colocado uma camada de papel isolante 19 milímetros para fazer o isolamento entre as bobinas como pode ser observado na Figura 9:

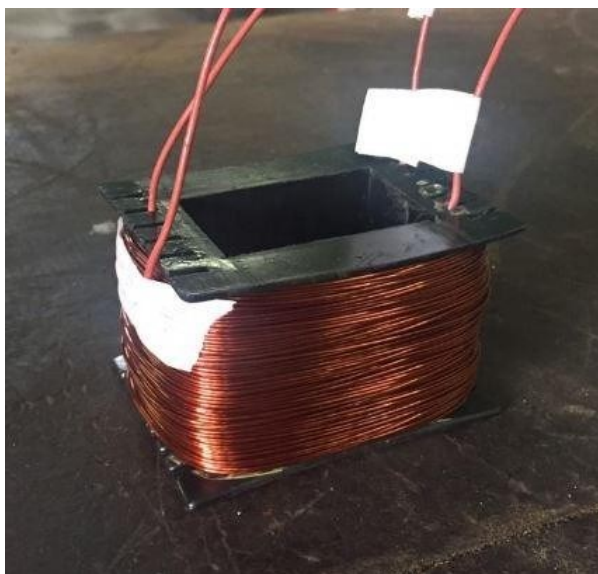
Figura 9 – Carretel com o enrolamento primário e papel isolante



Fonte: Aatoria Própria

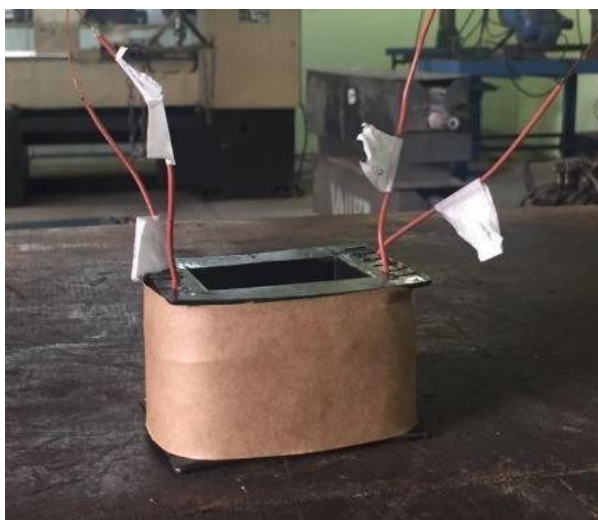
O mesmo foi feito para o segundo enrolamento, sendo que para este foram realizadas 377 voltas com o fio AWG 22. Finalizou-se o processo com mais uma camada de papel isolante como pode ser visto nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Carretel com o enrolamento secundário



Fonte: Autorial Própria

Figura 11 – Carretel com o enrolamento secundário finalizado com papel isolante



Fonte: Autorial Própria

Para facilitar no momento dos testes do protótipo, foram colocados fios encaixados AWG 18 nas entradas e saídas tanto do primário quanto do secundário, como pode-se observar na Figura 12:

Figura 12 – Soldagem fio AWG 18



Fonte: Aatoria Própria

Por fim foram colocados tubos termo retráteis no final das entradas e saídas para evitar curto circuitos.

3.4 NÚCLEO

O núcleo do transformador é composto por chapas de aço sílicio EI como pode ser observado nas Figuras 13 e 14. Para este protótipo foram utilizadas 61 lâminas no total. A montagem do núcleo se faz colocando uma lâmina E, seguida de uma lâmina I e assim alternano sucessivamente, até que todas as lâminas sejam colocadas até preencher todo o espaço destinado ao núcleo.

Figura 13 – Chapas EI



Fonte: Aatoria Própria

Figura 14 – Processo de montagem das chapas EI



Fonte: Autorial Própria

A Figura 15 mostra o transformador com todas as chapas EI encaixadas. Para que fiquem bem fixadas foram colocados parafusos nos espaços destinados aos mesmos.

Figura 15 – Processo de colocação dos parafusos



Fonte: Autorial Própria

3.5 RESULTADO FINAL

Após a montagem do transformador, este recebeu um banho do óleo verniz apresentado na Figura 16:

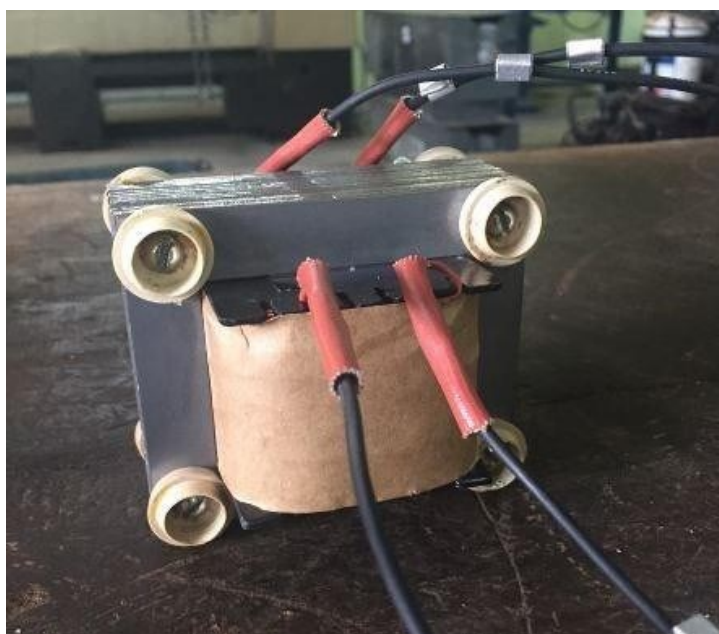
Figura 16 – Verniz utilizado



Fonte: Aatoria Própria

A Figura 17 apresenta o transformador finalizado.

Figura 17 – Transformador Finalizado



Fonte: Aatoria Própria

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação do algoritmo e dos testes realizados com o protótipo. Os testes foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas, no bloco I, sala I001 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco.

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos por meio da simulação do transformador a partir do algoritmo desenvolvido são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Resultados da simulação do algoritmo para transformador monofásico.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência fio primário	R_p	11,073	ohm
Resistência fio secundário	R_s	3,668	ohm
Perdas totais no cobre	P_{cu}	6,763	W
Perdas totais no ferro	P_{fe}	1,019	W
Perdas totais do transformador	P_{soma}	7,76	W
Regulação de tensão calculada	alphacalculado	6,12%	-
Rendimento calculado	rendCacl	93,41%	-

Fonte: Autoria Própria

A partir dos resultados da simulação, é possível perceber que tanto a regulação de tensão quanto o seu rendimento estão próximos dos valores esperados no projeto do transformador monofásico. É válido ressaltar que as perdas ôhmicas influenciam nos resultados finais, uma vez que a corrente do primário é limitada por mais de 10% e no secundário está limitada a 27%.

4.2 TESTE DE CONTINUIDADE

O teste de continuidade tem a função de fazer a verificação de possíveis curtos-circuitos entre as partes do protótipos e interrupções no enrolamento. Com o multímetro na escala de continuidade colocou-se uma ponteira no início do enrolamento primário e outra no final deste mesmo enrolamento, sendo feito o mesmo processo para o enrolamento secundário. Também foi realizado o teste entre enrolamentos colocando-se uma ponteira no enrolamento primário e outra no enrolamento secundário. Para verificar contato com a massa, colocou-se uma ponteira no início do enrolamento primário e a outra ponteira no núcleo. O mesmo foi feito com o enrolamento secundário e o

núcleo. Os resultados obtidos por meio do teste de continuidade são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Teste de continuidade para o transformador monofásico.

	Saída 1º	Saída 2º	Núcleo
Entrada 1º	Continuidade	Sem continuidade	Sem continuidade
Entrada 2º	Sem continuidade	Continuidade	Sem continuidade

Fonte: Autoria Própria

A partir dos resultados é possível concluir que ocorre continuidade apenas entre as saídas e entradas de um mesmo enrolamento. Este resultado é satisfatório pois significa a não existência de curtos-circuitos entre as partes do transformador e a não ocorrência de rompimentos nos enrolamentos.

4.3 TESTE DA TENSÃO À VAZIO

O teste da tensão à vazio tem o objetivo de analisar se o valor da tensão medida está de acordo com as especificações do projeto do transformador. Para o teste a vazio foi utilizado um varivolt, dois multímetros e cabos para realizar as conexões. Este teste foi realizado de maneira que conecta-se o varivolt e um multímetro no enrolamento primário e o segundo multímetro no enrolamento secundário.

Os resultados a partir deste teste podem ser observados na Tabela 5:

Tabela 5 – Teste da tensão a vazio.

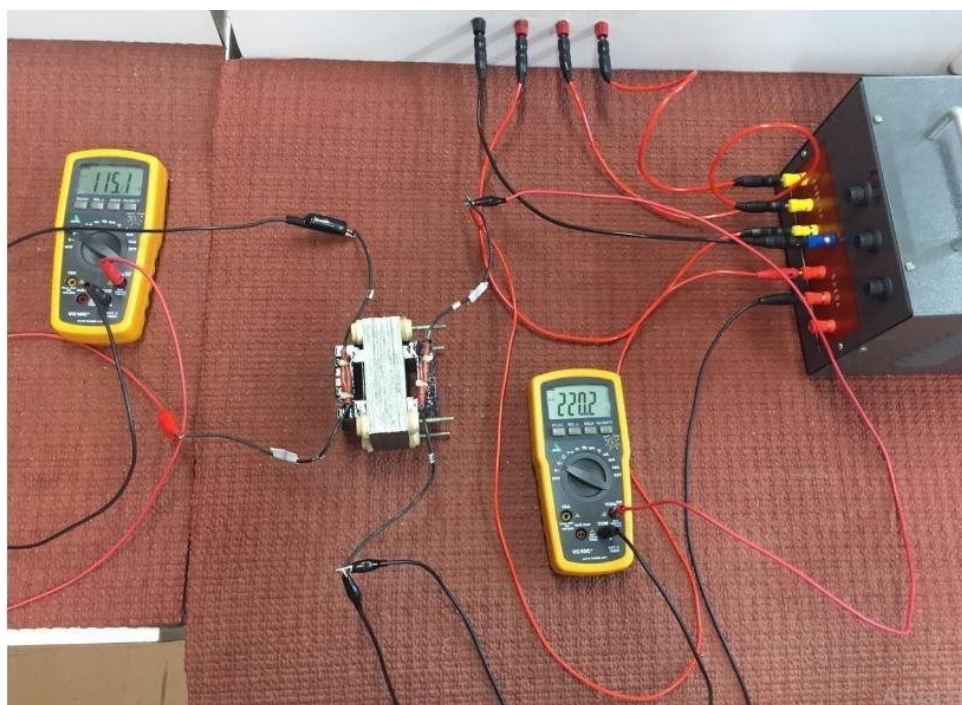
Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão Primária	220,2	V
Corrente Primária	0,088	A
Tensão Secundária	115,1	V
Corrente Secundária	0	A

Fonte: Autoria Própria

Pode-se observar que os resultados obtidos com o teste a vazio ficaram muito próximos dos valores esperados para o projeto, sendo considerados resultados satisfatórios.

A Figura 18 apresenta a realização do teste:

Figura 18 – Teste da tensão à vazio



Fonte: Autoria Própria

4.4 TESTE DAS TENSÕES E CORRENTES COM CARGA RESISTIVA

Este teste foi feito utilizando um variavolt, cabos para conexão e quatro multímetros, sendo dois utilizados para medir tensão e dois utilizados para medir corrente e uma carga resistiva. Conectou-se o variavolt e dois multímetros no enrolamento primário e a carga resistiva e dois multímetros no enrolamento secundário. A carga resistiva foi ajustada para um valor de 187 ohms.

Os resultados a partir deste teste podem ser observados na Tabela 6 e Figuras 19 e 20:

Tabela 6 – Teste das tensões e correntes com carga resistiva.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão Primária	219,8	V
Corrente Primária	0,349	A
Tensão Secundária	110,6	V
Corrente Secundária	0,587	A

Fonte: Autoria Própria

Os valores obtidos a partir da conexão de uma carga de 187 ohms no transformador também foram satisfatórios. Pode-se observar que o valor da corrente primária aumentou se comparado ao valor obtido no teste sem carga. Isto é esperado uma vez

que quando sem carga o primário fornece apenas o valor da corrente de magnetização necessária. Uma carga resistiva de 187Ω não é a carga nominal do transformador porque a corrente medida foi inferior a 1 A.

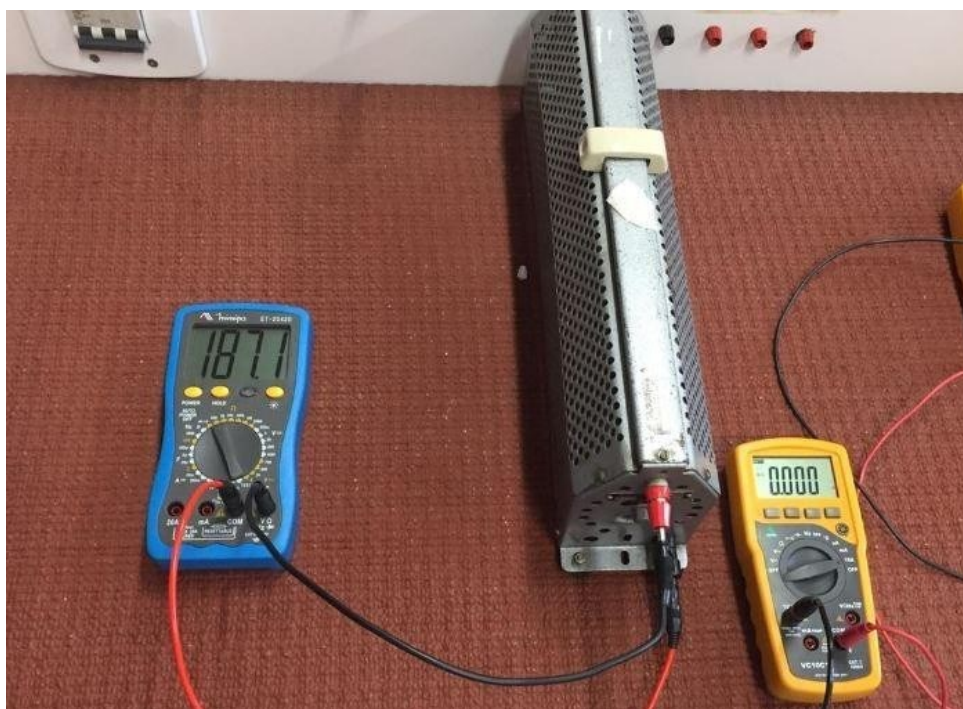
Também é possível observar que esperava-se um valor de até 1A de corrente secundária, sendo obtido um valor menor, porém aceitável.

Figura 19 – Teste das tensões e correntes com carga resistiva



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Carga resistiva



Fonte: Autoria Própria

4.5 TESTE COM LÂMPADA INCANDESCENTE

O teste com lâmpada incandescente também tem a finalidade de analisar os valores obtidos de tensão e corrente quando conecta-se ao secundário uma lâmpada. Para este teste foi utilizado um varivolt, quatro multímetros, cabos para conexão e uma lâmpada de 110W.

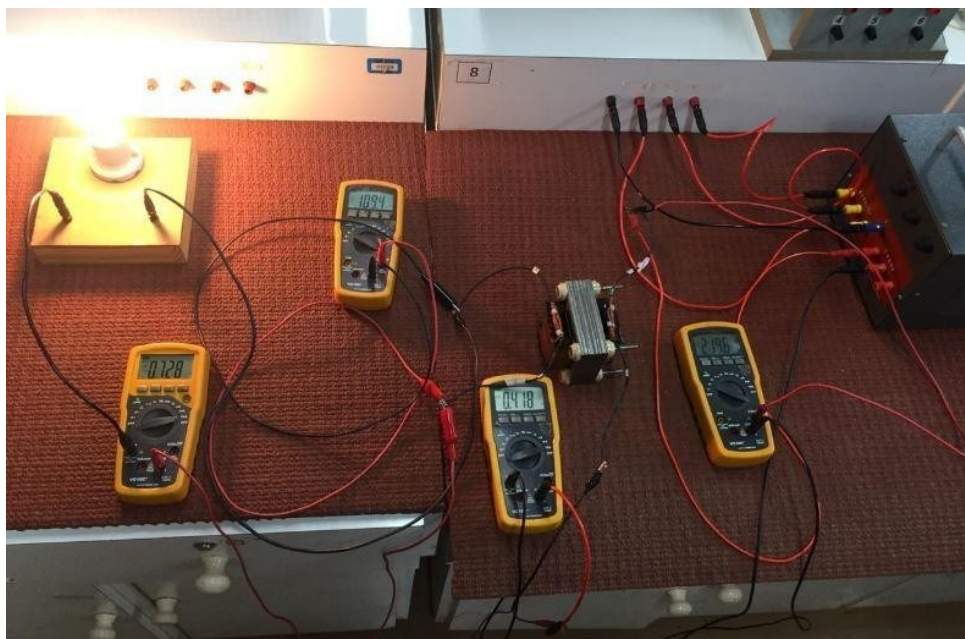
Os valores obtidos neste teste podem ser observados na Tabela 7 e Figura 21:

Tabela 7 – Teste com lâmpada incandescente.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão Primária	219,5	V
Corrente Primária	0,418	A
Tensão Secundária	109,4	V
Corrente Secundária	0,729	A

Fonte: Autoria Própria

Figura 21 – Teste com lâmpada incandescente



Fonte: Autoria Própria

Conclui-se que para projetar o transformador foram especificadas as tensões (V_{in} e V_o), a corrente (I_o) e foram estabelecidas metas de rendimento, elevação de temperatura máxima e regulação de tensão. Para determinar o tamanho e a quantidade de chapas do núcleo, a bitola do fio de cobre e o número de espiras dos enrolamentos escreveu-se um algoritmo que utiliza dados tabelados de chapas de um fabricante. Para montar o protótipo do transformador foram comprados materiais com as dimensões indicadas pelo algoritmo mas de um fabricante diferente. Por este motivo comparações entre valores medidos no protótipo e valores do algoritmo não são apropriadas. Ensaio devem ser realizados diretamente no protótipo para compará-los com as especificações de tensão e de corrente estabelecidas inicialmente e para comparar com as metas estabelecidas (e não com os resultados teóricos do algoritmo).

Em virtude do contingenciamento do COVID-19 não foram realizados no protótipo do transformador: ensaio de curto circuito (para determinar a perda no cobre), ensaio de circuito aberto (para determinar a perda no ferro), ensaio com o megôhmetro (para medir a resistência de isolamento), ensaio com miliohmímetro (para medir as resistências dos enrolamentos) e teste com termômetro a laser (para monitorar a temperatura superficial do núcleo). Como as cargas existentes no laboratório não levaram o transformador em situação de plena carga (com 1 A no enrolamento secundário) não calculou-se a regulação de tensão do transformador para comparar com a meta estabelecida.

5 CONCLUSÃO

O trabalho de conclusão de curso teve como objetivo realizar o projeto e a implementação de um transformador monofásico de dois enrolamentos. Todas as etapas descritas no trabalho foram de extrema importância para que os objetivos propostos fossem alcançados com sucesso. Com o estudo teórico sobre o transformador monofásico, foi possível desenvolver um algoritmo que foi capaz de simular as informações necessárias para a construção de um protótipo partindo das especificações propostas.

O algoritmo possui um papel fundamental para a realização do projeto, uma vez que a partir deste é possível encontrar valores de rendimento e regulação de tensão por exemplo, os quais são de extrema importância para a realização da montagem de um transformador.

Também a partir deste algoritmo, foi possível encontrar o número de chapas necessárias, quais fios deveriam ser adquiridos e não menos importante o número de voltas necessárias para os enrolamentos do transformador.

Uma vez tendo as constantes e os valores necessários de material, foi possível realizar a montagem do transformador. Com o protótipo pronto foram realizados os testes descritos no decorrer do trabalho. A partir dos testes foi possível comprovar o funcionamento do transformador de acordo com os dados previstos, podendo concluir que o resultado final do projeto foi satisfatório, uma vez que os valores encontrados a partir dos testes ficaram de acordo com o previsto.

Vale reforçar ao final deste trabalho, que os resultados obtidos neste trabalho não tiveram os valores exatos pois, devido ao momento pandêmico que vivemos hoje não foi possível repetir os testes, uma vez que os laboratórios da universidade estão fechados. Também é válido ressaltar, que se fosse usado um megôhmetro, os testes provavelmente teriam obtido valores mais próximos da teoria.

Referências

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 21.

MORA, J. F. **Máquinas elétricas**. [S.l.]: McGraw•Hill, 2008. v. 5. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 19.

TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: Prentice•Hall do Brasil, 1994. Citado na página 15.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley•7**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

APÊNDICE A – ALGORITMO PARA CÁLCULO DO PROJETO DO TRANSFORMADOR

```

1 Vin = 220;
2 Vo = 110;
3 Io = 1;
4 Po = Vo * Io;
5 f = 60;
6 rend = 0.95;
7 alfa = 0.05;
8 Bm = 1.2;
9 Ku = 0.4;
10 Tr = 55;
11 Kf = 4.44;
12
13 Pt = Po * ((1 / rend) + 1);
14 Ke = 0.145 * (Kf^2) * (f^2) * (Bm^2) * (10^(-4));
15 Kg = Pt / (2 * Ke * alfa * 100);
16
17 F = 1.588;
18 E = 3.175;
19 G = 4.763;
20 MPL = 19.1;
21 Wtfe = 1.343;
22 Wtcu = 492;
23 Ac = 9.577;
24 Wa = 7.560;
25 Ap = 72.404;
26 Kgnovo = 15.162;
27 At = 333;
28 MLT = 18.3;
29
30 Np = Vin * (10^4) / (Kf * Bm * f * Ac);
31 J = Pt * (10^4) / (Kf * Ku * Bm * f * Ap);
32 lin = Po / (Vin * rend);
33 Awpb = lin / J;
34
35 AWGP = 24;
36 diamp = 0.0566;
37 Awpbново = 0.0020470;
38 Awp = 0.0022;
39 microOmsporcmp = 842.1;
40
41 Rp = MLT * Np * microOmsporcmp * (10^-6);
42 Ip = lin;

```

```
43 Pp = ( Ip^2) * Rp;
44 Vs = Vo;
45 Ns = ( Np * Vs/ Vin) * (1 + alfa);
46
47 Awsb = Io/J;
48
49 AWGs = 21;
50 diams = 0.0785;
51 Awsbnovo = 0.004116;
52 Aws = 0.00411;
53 microOmsporcms = 531.4 ;
54
55 Rs = MLT * Ns * microOmsporcms * (10^-6);
56 Is = Io;
57 Ps = ( Is^2) * Rs;
58 Pcu =Pp+ Ps;
59 alfacalculado = (Pcu/Po);
60
61 k = 0.0005570;
62 m = 1.680;
63 n = 1.860;
64 wattsporKg = k * (f^m) * ( Bm^n);
65
66 Pfe = wattsporKg * Wtfe;
67 Psoma =Pcu+ Pfe;
68 rendCalc = Po / ( Po + Psoma);
69 PporArea = Psoma / At;
70 Trcalculado = 450 * ( PporArea^0.826);
71
72 Kus = ( Ns*Awsbnovo) / Wa;
73 Kup = ( Np * Awpbnovo) / Wa;
74 Kunovo = Kup + Kus;
75
76 profund = Ac / E;
77 lfcpl=(G*1)/ diamp;
78 cfcp = Np / lfcpl;
79 ocupp = ( cfcp * diamp) / 1;
80
81 lfcs =(G*1)/ diams;
82 cfcs =Ns/ lfcs;
83 ocups = (cfcs*diams)/1;
84
85 ocupTE = ocupp + ocups;
86
87 espPI = 0.02;
88 ocupPI = espPI * 3;
89 ocupTJ = ocupTE + ocupPI;
```

```
90
91 folga = F - ocupTJ; EspLam =
92 0.051;
93
94 quantLam = ( profund * 1) / EspLam; quantLamSeg =
95 quantLam + ( quantLam*25/100);
96
97 PerimExt = (2 * (E + 2 * F)) + (2 * profund *(10^-1)); umaVolta = PerimExt + (
98 PerimExt * 26/100);
99
100 metragem1 = Np * umaVolta * (10^-2); metragem2 = Ns
101 * umaVolta * (10^-2);
```