

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

CÉSAR LUIZ RODRIGUES DA SILVA

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO COM ENROLAMENTO TERCIÁRIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

CÉSAR LUIZ RODRIGUES DA SILVA

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR
MONOFÁSICO COM ENROLAMENTO TERCIÁRIO**

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

Orientadora: Profa. Dra. Filomena
Barbosa Rodrigues Mendes

PATO BRANCO

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM ENROLAMENTO TERCIÁRIO**, do aluno **CÉSAR LUIZ RODRIGUES DA SILVA** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **238** de 2019.

Fizeram parte da banca os professores:

Profa. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares

Prof. Me. José Paulo de Barros Neto

Prof. Dr. Sérgio Luiz Masutti

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Cleusa e Luiz Carlos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Cleusa e Luiz Carlos pelo apoio em todos os momentos necessários.

A professora Filomena Barbosa Rodrigues Mendes, por sua disponibilidade, confiança e contribuições ao longo deste trabalho.

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

EPÍGRAFE

Happiness is only real when shared.

Henry David Thoreau

RESUMO

SILVA, César Luiz Rodrigues. **Projeto e implementação de um transformador monofásico com enrolamento terciário**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto e implementação de um transformador monofásico com enrolamento terciário sem *tap* central. Inicialmente, um estudo sobre transformadores foi realizado, discutindo seus principais aspectos construtivos, funcionamento, perdas e um de seus métodos de projeto. O projeto do transformador é realizado através de um algoritmo criado em linguagem computacional. Em seguida, são apresentados os processos utilizados para a implementação do transformador projetado. Por fim, são realizados testes que comparam o transformador implementado com as especificações de projeto.

Palavras-chave: Eletromagnetismo. Transformador monofásico. Múltiplos enrolamentos. Terciário.

ABSTRACT

SILVA, César Luiz Rodrigues. **Design and Implementation of a Single-Phase Tertiary Winding Transformer**. 2019. 58 f. Graduation Conclusion Work (Graduation in Electrical Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2019.

This work presents the design and implementation of a single-phase tertiary winding transformer without central tap. Initially, a study on transformers was conducted, discussing their main constructive aspects, operation, losses and one of their design methods. The transformer design is performed through an algorithm created in computational language. Then, the processes used for implementing the designed transformer are presented. Finally, tests are performed that compare the implemented transformer with the design specifications.

Keywords: Electromagnetism. Single Phase Transformer. Multiple windings. Tertiary.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelos esquemáticos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico e (b) enrolamento alternado.....	14
Figura 2: Modelos esquemáticos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente	15
Figura 3: Esquema básico de um transformador de três enrolamentos.	15
Figura 4: Esquema de ligação: (a) conjunto de dois transformadores monofásicos com dois enrolamentos e (b) transformador monofásico com três enrolamentos.....	16
Figura 5: Diagrama de funcionamento de um transformador com dois enrolamentos.....	18
Figura 6: Fluxos de um transformador de dois enrolamentos.....	18
Figura 7: (a) dimensões das lâminas do projeto (b) estrutura final do transformador.	23
Figura 8: Dimensões das lâminas projetadas.	29
Figura 9: Peças de MDF constituintes do carretel.....	30
Figura 10: Carretel construído. Fonte: Autoria própria	31
Figura 11: Fios de cobre esmaltado adquiridos.	31
Figura 12: Enrolamento primário antes da camada de papel isolante.	32
Figura 13: Enrolamentos (a) sem camada isolante e (b) com camada isolante.....	33
Figura 14: Lâminas no formato EI adquiridas.....	33
Figura 15: Processo de montagem das lâminas de formato E.	34
Figura 16: Resultado final após a colocação das 89 lâminas E.....	34
Figura 17: Montagem das lâminas de formato I.	35
Figura 18: Vista frontal do transformador montado.....	36
Figura 19: Vista lateral do transformador montado.	36
Figura 20: Teste de indução do transformador.....	39
Figura 21: Valores obtidos com o teste de indução.....	40
Figura 22: Teste de tensões e correntes sem carga.....	40
Figura 23: Teste de tensões e correntes com carga.....	41
Figura 24: Teste com o miliohmímetro.	43
Figura 25: Teste com o megômetro.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do projeto do transformador.	28
Tabela 2: Resultados do projeto do transformador.....	29
Tabela 3: Resultado das simulações do algoritmo.....	37
Tabela 4: Teste de continuidade do transformador de três enrolamentos.....	38
Tabela 5: Teste de indução em circuito aberto.....	39
Tabela 6: Teste de tensões e correntes sem carga.	41
Tabela 7: Teste das tensões e correntes com carga.	42
Tabela 8: Resistências medidas com o miliohmímetro.....	44
Tabela 9: Teste de resistência de isolamento utilizando o megôhmetro.	45
Tabela 10: Tabela de custos financeiros.	46

LISTA DE SIMBOLOS

N_p	Número de espiras do enrolamento primário.
N_s	Número de espiras do enrolamento secundário.
N_t	Número de espiras do enrolamento terciário.
e_{ind}	Tensão induzida em uma espira.
λ	Fluxo concatenado na bobina.
N	Número de espiras.
$\bar{\Phi}$	Fluxo médio por espira.
$\bar{\Phi}_p$	Fluxo médio no enrolamento primário.
$\bar{\Phi}_s$	Fluxo médio no enrolamento secundário.
$v_p(t)$	Tensão em corrente alternada no enrolamento primário.
$v_s(t)$	Tensão em corrente alternada no enrolamento secundário
$v_t(t)$	Tensão em corrente alternada no enrolamento terciário.
Φ_M	Fluxo mútuo.
Φ_D	Fluxo disperso.
Φ_{DP}	Fluxo disperso do enrolamento primário.
Φ_{DS}	Fluxo disperso do enrolamento secundário.
$e_p(t)$	Tensão induzida pelo enrolamento primário.
$e_s(t)$	Tensão induzida pelo enrolamento terciário.
a_{p-s}	Relação de transformação dos enrolamentos primário e secundário.
a_{p-t}	Relação de transformação dos enrolamentos primário e terciário.
a_{s-t}	Relação de transformação dos enrolamentos secundário e terciário.
ρ	Resistividade do cobre.

S_c	Área da secção transversal do condutor.
l	Comprimento do condutor.
I	Corrente que passa pelo condutor.
P_{fe}	Perdas no ferro.
$P_{w/kg}$	Perda por unidade de massa.
W_{tfe}	Massa do ferro.
f	Frequência.
B_m	Indução magnética máxima.
K_g	Constante de geometria do núcleo.
P_t	Potência total do transformador.
K_e	Constante das condições elétricas.
α	Regulação de tensão.
K_f	Constante de forma da onda.
MPL	Comprimento médio do caminho magnético.
W_{tCu}	Peso do cobre.
MLT	Comprimento médio da espira em uma volta.
A_c	Área do núcleo.
W_a	Área da janela.
A_t	Área requerida para dissipar calor.
A_p	Produto das áreas do núcleo.
K_u	Fator de utilização da janela do núcleo
J	Densidade de corrente.
A_{wsp}	Área do fio no primário.
A_{wsb1}	Área do fio no secundário.
A_{wsb2}	Área do fio no terciário.
K_{up}	Constante da utilização da janela do enrolamento primário.

K_{us}	Constante da utilização da janela do enrolamento secundário.
K_{ut}	Constante da utilização da janela do enrolamento terciário.
K_{unovo}	Constante da utilização total da janela.
I_{in}	Corrente de entrada do enrolamento primário.
I_{o1}	Corrente de saída do enrolamento secundário.
I_{o2}	Corrente de saída do enrolamento terciário.
V_{in}	Tensão do enrolamento primário.
V_{o2}	Tensão do enrolamento secundário.
V_{o3}	Tensão do enrolamento terciário.
Q_{lam}	Quantidade de lâminas.
E_{lam}	Espessura da lâmina.
C_1	Comprimento do condutor primário.
C_2	Comprimento do condutor secundário.
C_3	Comprimento do condutor terciário.
η	Rendimento do transformador.
T_r	Temperatura máxima.

SUMÁRIO

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	Enrolamentos	13
2.1.2	Núcleo	14
2.1.3	Transformador de múltiplos enrolamentos	15
2.2	FUNCIONAMENTO.....	17
2.3	PERDAS.....	21
2.3.1	Perdas no cobre	21
2.3.2	Perdas no núcleo	21
2.4	DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR	23
2.4.1	Dimensionamento do núcleo	23
2.4.2	Dimensionamento dos condutores	24
2.4.3	Janela do núcleo	26
2.4.4	Quantidade de material	26
2.4.4.1	Quantidade de lâminas.....	27
2.4.4.2	Comprimento dos condutores	27
3	DESENVOLVIMENTO.....	28
3.1	PROJETO DO TRANSFORMADOR.....	28
3.2	MONTAGEM DO CARRETEL.....	30
3.3	ENROLAMENTOS	31
3.4	MONTAGEM DO NÚCLEO	33
3.5	RESULTADO FINAL	35

4	RESULTADOS	37
4.1	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	37
4.2	TESTE DE CONTINUIDADE.....	38
4.3	TESTE DE INDUÇÃO	38
4.4	TESTE DAS TENSÕES E CORRENTES.....	40
4.5	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS	43
4.6	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO	44
4.7	CUSTOS FINANCEIROS	46
5	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48
	APÊNDICE A – ALGORITMO DE PROJETO DO TRANSFORMADOR	50

1 INTRODUÇÃO

O uso de transformadores tornou-se indispensável para os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica no mundo todo. No início da década de 1880 quando surgiram as primeiras estações geradoras de eletricidade em corrente contínua (CC), eram necessárias correntes elevadas para conseguir transmitir quantidades consideráveis de energia. Como as perdas energéticas eram grandes, causadas pelas correntes elevadas, a energia não podia ser transmitida para longas distâncias, fazendo com que as unidades geradoras precisassem ser de pequeno porte e localizadas em pontos estratégicos próximas umas das outras, fazendo com que se tornassem ineficientes (CHAPMAN, 2013).

Com o surgimento de estações geradoras de energia em corrente alternada (CA) paralelamente com a invenção do transformador, reduziu-se os problemas de capacidade e alcance dos sistemas de energia elétrica. Sabe-se que em um sistema de energia elétrica as perdas de transmissão são proporcionais ao quadrado da corrente que passa nas linhas. Dessa forma, com o uso de transformadores, elevando as tensões e baixando as correntes é possível minimizar as perdas de transmissão (CHAPMAN, 2013).

O transformador também é amplamente utilizado em diversas áreas da engenharia elétrica, podendo ser utilizados em circuitos eletrônicos de baixa potência para casamento de impedâncias, permitindo uma máxima transferência de potência entre os circuitos. Os transformadores podem também ser utilizados em sistemas de comunicações, encontrados em circuitos de rádio e televisão (DEL TORO, 1994).

Um fator importante na operação de transformadores, é a ocorrência de perdas, que podem ser fortemente influenciadas por fatores construtivos e condições de operação do equipamento. Dessa maneira, uma melhor compreensão da dinâmica de funcionamento e construção de transformadores é indispensável para que as perdas sejam minimizadas e o equipamento funcione sem dificuldades no sistema instalado (VASCONCELLOS, 2013).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é o projeto e implementação de um transformador monofásico com enrolamento terciário sem *tap* central, assim como, uma comparação das metas de projeto com os resultados obtidos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir conhecimento sobre projeto de transformadores monofásicos de múltiplos enrolamentos.
- Escrever um algoritmo para projetar um transformador monofásico com enrolamento terciário sem *tap* central.
- Montar o transformador.
- Realizar os testes e medições do transformador.
- Efetuar um comparativo entre o transformador montado com os dados do projeto.

1.3 ESTRUTURA GERAL

No capítulo 1 é apresentada uma introdução sobre transformadores e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 será realizado um estudo teórico sobre transformadores, incluindo aspectos construtivos, funcionamento, perdas e por fim o projeto de transformadores de múltiplos enrolamentos.

No capítulo 3 é apresentado o projeto do transformador, onde são descritos os métodos utilizados para a montagem do protótipo.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos através 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 será exposto o algoritmo criado para a realização do projeto.

2 O TRANSFORMADOR

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos mais importantes referentes aos transformadores, inicialmente mostrando seus principais componentes construtivos, na sequência são mostrados seu funcionamento e principais perdas. Por fim, é apresentada uma forma de dimensionar um transformador monofásico com enrolamento terciário sem *tap* central.

2.1 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Basicamente, um transformador consiste de dois ou mais enrolamentos acoplados magneticamente através de um núcleo. Na sequência serão apresentados os principais aspectos construtivos de um transformador.

2.1.1 Enrolamentos

Os enrolamentos, ou bobinas, formam o circuito elétrico do transformador, são constituídos por condutores elétricos, geralmente de cobre, em forma cilíndrica ou de secção retangular. Os condutores são cobertos por uma camada de isolamento que pode ser de verniz isolante, fibra de algodão ou papel isolante (MORA, 2003).

Os enrolamentos são considerados a parte mais importante do equipamento, pois a vida útil do transformador está diretamente ligada a vida útil de suas bobinas. Os enrolamentos são também a parte de maior custo do transformador, devido ao valor de sua matéria prima (SALUSTIANO, 2012).

Os tipos mais comuns de arranjos dos enrolamentos são:

- Enrolamentos concêntricos, em que as bobinas formam cilindros coaxiais na coluna do núcleo e cada enrolamento é dividido por um material isolante, como mostra a figura 1a.
- Enrolamentos alternados, em que os enrolamentos se subdividem em seções de tal forma que as bobinas se sucedem

alternadamente entre a coluna do núcleo, mostrado na figura 1b (MORA,2003).

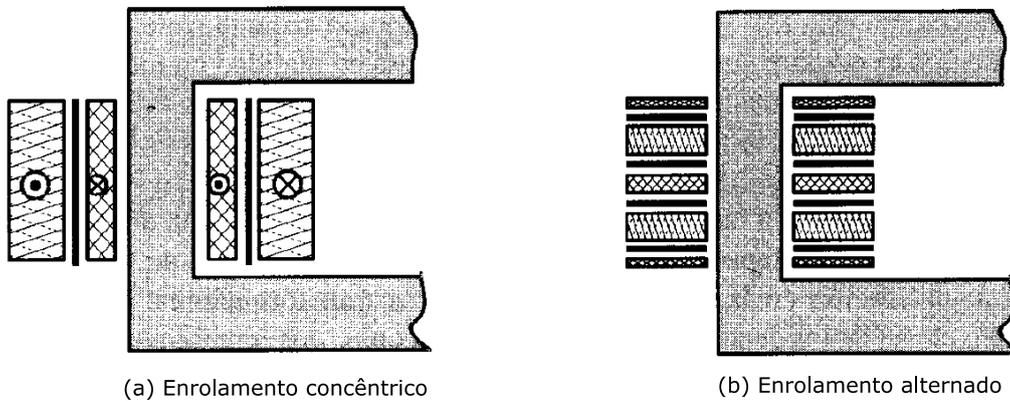


Figura 1: Modelos esquemáticos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico e (b) enrolamento alternado.

Fonte: Adaptado de (MORA,2003)

2.1.2 Núcleo

Para formar uma melhor ligação magnética entre os circuitos, é necessário que as bobinas estejam enroladas sobre um núcleo magnético de mínima relutância, este núcleo deve ter uma permeabilidade magnética muito elevada e entreferros muito reduzidos (MARTIGNONI, 1991).

Para minimizar as perdas causadas por correntes parasitas no núcleo, usualmente utiliza-se um conjunto de lâminas de aço. Os tipos mais comuns de arranjos de construção do núcleo são:

- Os de núcleo envolvido, em que as colunas do núcleo são envolvidas pelas bobinas dos enrolamentos, como mostrado na figura 2a.
- E os de núcleo envolvente, em que a perna central do núcleo é envolvida pelas bobinas dos enrolamentos, apresentado na figura 2b (FITZGERALD, 2006).

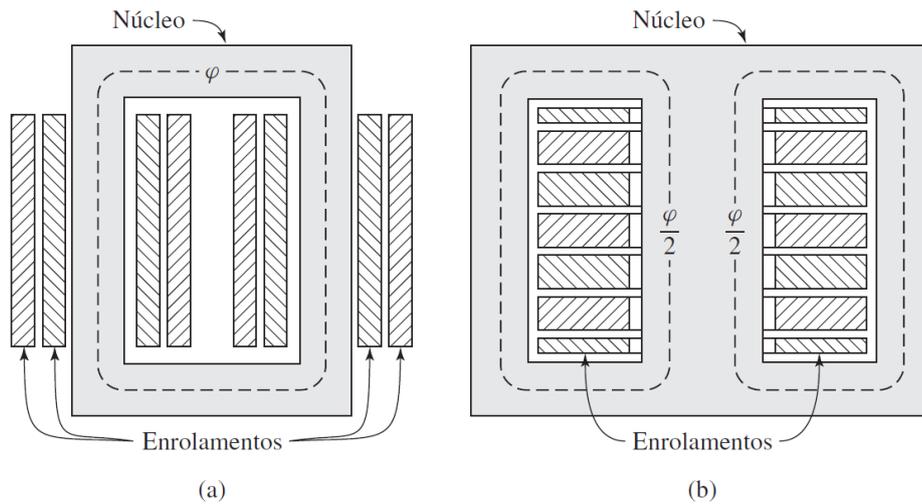


Figura 2: Modelos esquemáticos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente

Fonte: (FITZGERALD, 2006)

Quando comparados, os transformadores de núcleo envolvente possuem a vantagem de utilizar quantidades menores de cobre para os enrolamentos do que os de núcleo envolvido, por outro lado, possuem a desvantagem de utilizar maiores quantidades de material magnético para a construção do núcleo (BIM, 2012).

2.1.3 Transformador de múltiplos enrolamentos

Quando um transformador é construído com três ou mais enrolamentos, como mostra a figura 3, é conhecido como transformador de múltiplos enrolamentos ou de múltiplos circuitos ou ainda transformador com saídas múltiplas (FITZGERALD, 2006).

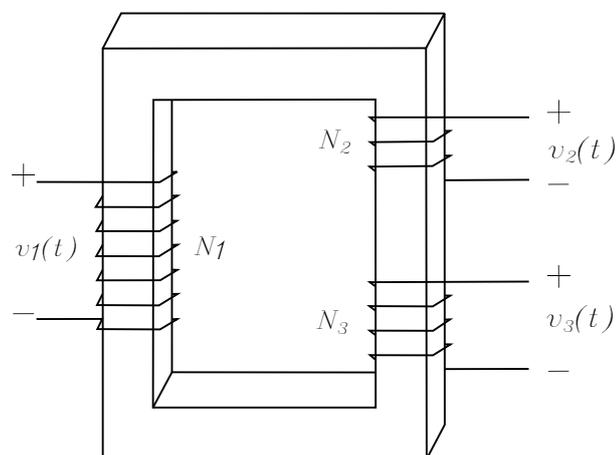


Figura 3: Esquema básico de um transformador de três enrolamentos.
Fonte: (BIM, 2012).

Os enrolamentos adicionais servem para alimentar cargas e linhas com tensões e potências diferentes, alimentados a partir de uma única fonte com apenas um único equipamento, como mostra a figura 4. Para essa finalidade, um transformador de múltiplos enrolamentos tem um menor custo e é mais eficiente quando comparado com um número equivalente de transformadores com apenas dois enrolamentos (BIM, 2012).

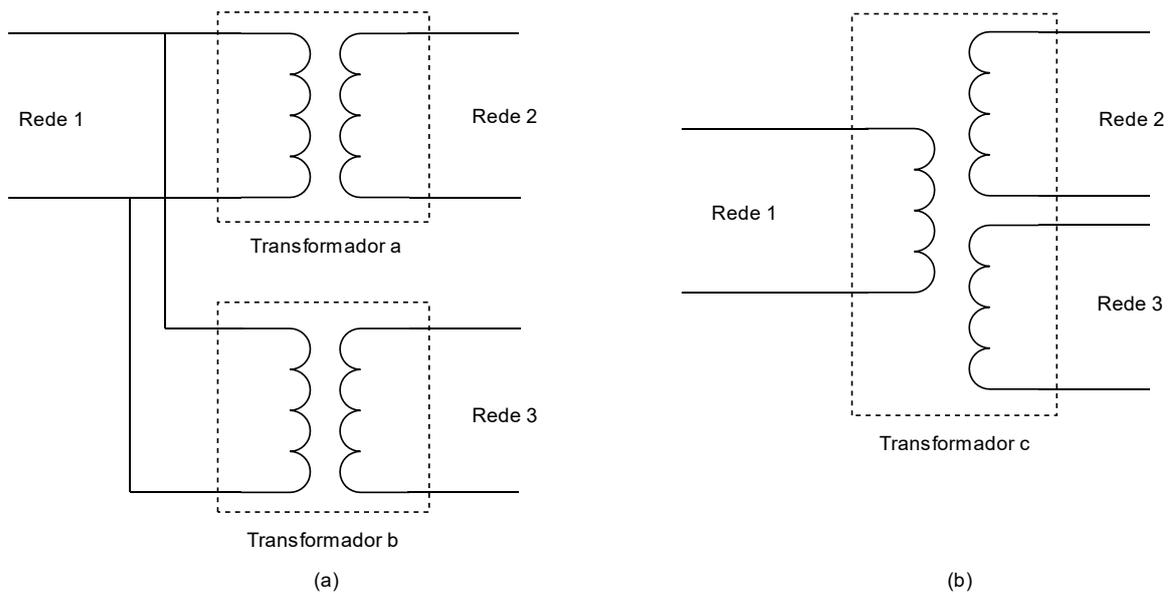


Figura 4: Esquema de ligação: (a) conjunto de dois transformadores monofásicos com dois enrolamentos e (b) transformador monofásico com três enrolamentos.
Fonte: Autoria Própria.

Entretanto, o transformador de múltiplos enrolamentos acaba sendo menos confiável quando comparado a um conjunto de dois transformadores com dois enrolamentos, pois quando um de seus enrolamentos se deteriora todo o conjunto fica fora de serviço, por outro lado, quando um enrolamento do conjunto de dois transformadores com dois enrolamentos se danifica, apenas um dos transformadores fica fora de operação, enquanto o outro opera normalmente.

2.2 FUNCIONAMENTO

A lei de Faraday constitui a base de funcionamento dos transformadores. Segundo Chapman (2013, p. 28-29) “se houver um fluxo passando através de uma espira de fio condutor, então uma tensão será induzida sendo diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo”.

Pela lei de Faraday, temos:

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

Onde, e_{ind} é a tensão induzida em uma espira, λ é o fluxo concatenado na bobina em que a tensão está sendo induzida.

Temos que λ é a soma do fluxo que passa através de cada espira da bobina:

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

Quando houver N espiras, pode-se dizer que o fluxo médio por espira é:

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

Dessa forma, a lei de Faraday pode ser escrita como:

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

Dessa maneira é possível encontrar a relação de transformação dos transformadores. Supondo um transformador de dois enrolamentos como mostra a figura 5, de acordo com a lei de Faraday, quando aplicada uma tensão $v_p(t)$ o fluxo médio primário $\bar{\phi}_p$ é definido de acordo com a equação 5.

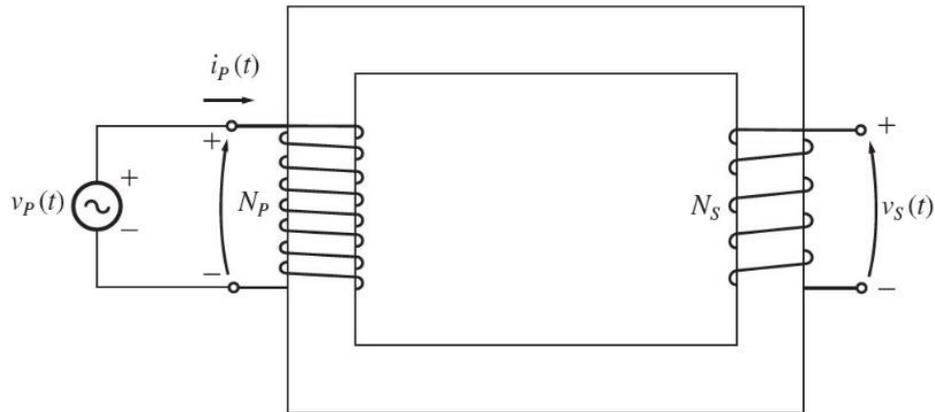


Figura 5: Diagrama de funcionamento de um transformador com dois enrolamentos.
Fonte: (CHAPMAN, 2013).

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

O efeito do fluxo primário na outra bobina dependerá de quanto fluxo atinge o enrolamento secundário, pois nem todo fluxo produzido pela bobina primária chega ao secundário, algumas linhas do fluxo acabam deixando o núcleo, como mostra a figura 6 (CHAPMAN, 2013).

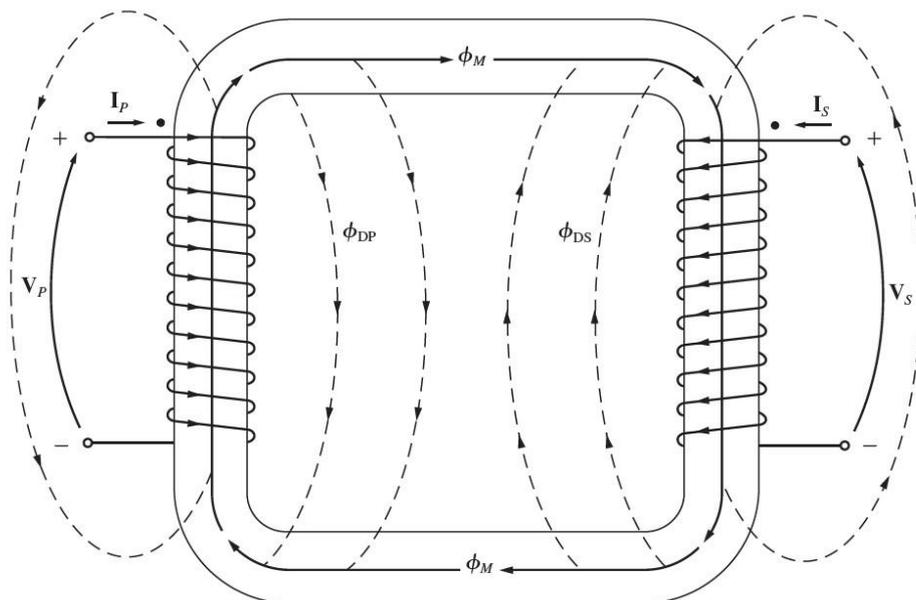


Figura 6: Fluxos de um transformador de dois enrolamentos.
Fonte: (CHAPMAN, 2013).

Esse fluxo que acaba deixando o núcleo é chamado de fluxo disperso (ϕ_D), e o que continua dentro do núcleo, e associa-se as outras bobinas, é chamado de fluxo mútuo (ϕ_M).

Assim, para o transformador da figura 5 temos que:

$$\bar{\Phi}_p = (\phi_M) + (\phi_{DP}) \quad (6)$$

$$\bar{\Phi}_s = (\phi_M) + (\phi_{DS}) \quad (7)$$

Dessa forma, a lei de Faraday para o primário pode ser expressa por:

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

Logo, a tensão induzida pelo enrolamento primário é dada por:

$$e_p(t) = N_p \left(\frac{d\phi_M}{dt} \right) \quad (9)$$

De maneira análoga para a bobina secundária:

$$v_s(t) = N_s \left(\frac{d\phi_{DS}}{dt} + \frac{d\phi_M}{dt} \right) \quad (10)$$

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

Assim, temos que:

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

Portanto, a relação de transformação entre os enrolamentos primário e secundário é:

$$a_{p-s} = \frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} \quad (13)$$

De acordo com Chapman (2013), para um transformador bem projetado, temos que o fluxo mútuo é bem elevado quando comparado com o fluxo de dispersão, com isso, podemos dizer que:

$$a_{p-s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{v_p(t)}{v_s(t)} \quad (14)$$

Quando adicionados mais enrolamentos no transformador, o funcionamento continua igual, a única diferença é que para os cálculos deve-se levar em consideração as bobinas adicionadas.

Assim, de maneira análoga, para um transformador de três enrolamentos as relações de transformação ficam:

$$a_{p-s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{v_p(t)}{v_s(t)} \quad (15)$$

$$a_{p-t} = \frac{N_p}{N_t} = \frac{v_p(t)}{v_t(t)} \quad (16)$$

$$a_{s-t} = \frac{N_s}{N_t} = \frac{v_s(t)}{v_t(t)} \quad (17)$$

Resumidamente, o transformador opera de acordo com o princípio da indução mútua entre duas (ou mais) bobinas através de um núcleo composto por um material ferromagnético. Aplicando uma fonte de tensão alternada em um dos enrolamentos do transformador, será produzido um fluxo alternado em que a amplitude é dependente da tensão aplicada, frequência e número de espiras do enrolamento. Uma parte desse fluxo, chamado de fluxo mútuo, associa-se aos outros enrolamentos, induzindo tensões dependentes do número de espiras, da frequência e da magnitude do fluxo comum. (KOSOW, 2005, FITZGERALD, 2006).

2.3 PERDAS

Em um transformador real, deve-se levar em consideração as perdas de potência que ocorrem em sua operação. Na sequência, serão apresentadas as principais perdas de um transformador.

2.3.1 Perdas no cobre

As perdas no cobre ocorrem por efeito Joule devido à resistência ôhmica dos enrolamentos do transformador. Para encontrar as perdas no cobre utiliza-se a seguinte equação (MARTIGNONI, 1991):

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S_c} \quad (\Omega) \quad (18)$$

Onde ρ é a resistividade do cobre, S_c é a área da secção transversal do condutor, l o comprimento do condutor e I é a corrente que passa pelo condutor.

Com as perdas no cobre é possível encontrar a regulação de tensão percentual do transformador através da equação:

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_{out}} \quad (\%) \quad (19)$$

Sendo P_{out} a potência total de saída do transformador.

2.3.2 Perdas no núcleo

As perdas magnéticas no núcleo são divididas em três naturezas diferentes, a perda por histerese magnética, a perda por correntes de Foucault e as perdas excedentes.

As perdas magnéticas causadas pelas correntes de Foucault, ou também chamadas, correntes parasitas, ocorrem devido as correntes induzidas no núcleo

ferromagnético o qual é percorrido por um fluxo variável no tempo. A tendência do percurso da corrente é a formação de anéis de correntes induzidas perpendiculares à direção do fluxo, ocasionando uma perda de potência (BATISTELA, 2001).

As perdas por histerese estão associadas a reorganização dos momentos magnéticos do material ferromagnético. Cada vez que o ciclo de histerese é realizado, uma parte da energia é utilizada para que os momentos magnéticos sejam realinhados (NOGUEIRA; ALVES, 2009).

As perdas no núcleo, ou perdas no ferro, podem ser encontradas com a equação 20.

$$P_{fe} = P_{w/kg} \cdot W_{tfe} \quad (W) \quad (20)$$

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

A perda por unidade de massa pode ser obtida através da seguinte equação:

$$P_{w/kg} = K \cdot f^M \cdot B_m^N \left(\frac{W}{kg} \right) \quad (21)$$

Sendo f a frequência de operação, B_m a indução máxima que gera o fluxo e K, M e N constantes que dependem do material que constitui o núcleo ferromagnético.

Com as perdas no cobre e as perdas no ferro calculadas, é possível encontrar o rendimento real do transformador, dado pela equação:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{soma}} \quad (22)$$

Onde, P_{soma} é a soma das perdas do ferro e do cobre do transformador.

2.4 DIMENSIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

Para projetos gerais de transformadores, deve-se definir as dimensões do núcleo e as dimensões dos seus condutores. Neste tópico será apresentada uma das diferentes formas existentes de dimensionar um transformador com três enrolamentos sem *tap* central.

Para o dimensionamento do transformador iremos considerar um núcleo laminado de aço silício do tipo envolvente e enrolamentos concêntricos de condutores cilíndricos de cobre esmaltado isolados entre si. A figura 7 apresenta o modelo das lâminas utilizadas e o formato final do transformador.

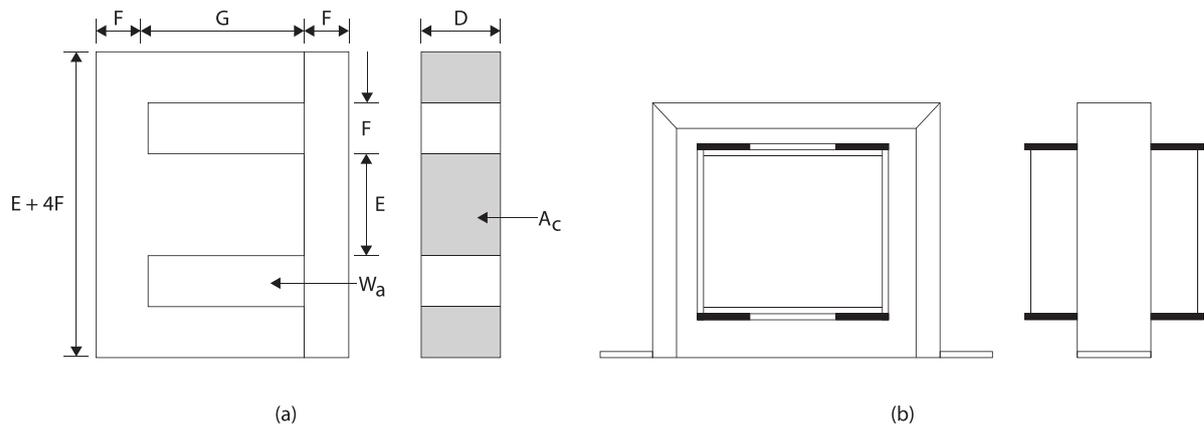


Figura 7: (a) dimensões das lâminas do projeto (b) estrutura final do transformador.
Fonte: Adaptado de (BLUME, 1938).

2.4.1 Dimensionamento do núcleo

Para o dimensionamento do núcleo do transformador é necessário primeiramente definir seus valores nominais, tais como, tensões e correntes, com os valores nominais definidos, é possível encontrar a potência total do transformador. É necessário também, definir o valor da regulação de tensão e a frequência de operação para o transformador.

Com os valores iniciais definidos é possível encontrar a constante de geometria do núcleo K_g através da equação 23.

$$K_g = \frac{P_t}{2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100} \text{ (cm}^5\text{)} \quad (23)$$

Onde P_t é a potência total do transformador em Watts, α é a regulação de tensão percentual desejada e K_e é a constante das condições elétricas e magnéticas, que é definida pela seguinte equação:

$$K_e = 0.145 \cdot K_f^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot 10^{-4} \quad (24)$$

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

Com o valor da constante da geometria do núcleo definida, é possível definir as dimensões das lâminas apresentada na figura 7.

Para a lâmina é possível obter outros dados importantes para o projeto, tais como: comprimento médio do caminho magnético (MPL), peso do núcleo em gramas (W_{tfe}), peso do cobre em gramas (W_{tcu}), o comprimento médio da espira em uma volta em cm (MLT), a área do núcleo em cm^2 (A_c), a área da janela em cm^2 (W_a), a área requerida para dissipar calor (A_t) e o produto das áreas do núcleo (A_p).

2.4.2 Dimensionamento dos condutores

Para o dimensionamento dos condutores do transformador, primeiramente, deve-se definir o fator de utilização da janela do núcleo (K_u) e o produtos das áreas do núcleo (A_p). Com isso, e as já definidas constante da forma de onda, frequência de operação, indução máxima e potência total do transformador, é possível realizar o cálculo da densidade de corrente (J), como mostra a equação 25.

$$J = \frac{P_t \cdot 10^4}{K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p} \left(\frac{A}{cm^2} \right) \quad (25)$$

Após definida a densidade de corrente, pode-se realizar o cálculo da área dos fios nus necessários para o transformador. As equações utilizadas para o cálculo do transformador com três enrolamentos são:

$$A_{wsp} = \frac{I_{in}}{J} (cm^2) \quad (26)$$

$$A_{wsb1} = \frac{I_{o1}}{J} (cm^2) \quad (27)$$

$$A_{wsb2} = \frac{I_{o2}}{J} (cm^2) \quad (28)$$

Sendo A_{wsp} a área calculada para o fio do enrolamento primário, A_{wsb1} a do enrolamento secundário e A_{wsb2} do enrolamento terciário. I_{in} , I_{o1} e I_{o2} são, respectivamente, as correntes do primário, secundário e terciário.

Com os valores calculados, pode-se selecionar o fio com o valor de área mais próxima possível, também é possível encontrar outros dados importantes a respeito dos fios escolhidos, tais como, diâmetro com a camada de isolamento e a resistência estimada do condutor.

Para o cálculo do número de espiras necessários para cada enrolamento utiliza-se as seguintes equações:

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} (voltas) \quad (29)$$

$$N_s = \left(\frac{N_p \cdot V_{o1}}{V_{in}} \right) \cdot (1 + \alpha) (voltas) \quad (30)$$

$$N_t = \left(\frac{N_p \cdot V_{o2}}{V_{in}} \right) \cdot (1 + \alpha) (voltas) \quad (31)$$

Onde N_p , N_s e N_t são, respectivamente, o número de voltas no primário, secundário e terciário. Temos também que V_{in} , V_{o2} e V_{o3} são as tensões no enrolamento primário, secundário e terciário.

2.4.3 Janela do núcleo

Para verificar se é viável a construção do transformador, deve-se analisar se os enrolamentos irão caber dentro da janela do núcleo, para isso, é calculada a constante total de utilização da janela do núcleo (K_{unovo}). Para um transformador com três enrolamentos usa-se as seguintes equações:

$$K_{up} = \frac{N_p \cdot A_{wpb}}{W_a} \quad (32)$$

$$K_{us} = \frac{N_s \cdot A_{wsb1}}{W_a} \quad (33)$$

$$K_{ut} = \frac{N_t \cdot A_{wsb2}}{W_a} \quad (34)$$

$$K_{unovo} = K_{up} + K_{us} + K_{ut} \leq 0,4 \quad (35)$$

Onde, K_{up} , K_{us} e K_{ut} , são, respectivamente, as constantes de utilização da janela do enrolamento primário, secundário e terciário. Observa-se que para a viabilidade da construção do transformador, a constante total da janela do núcleo deve ser menor ou igual a 0,4.

2.4.4 Quantidade de material

Para a construção de um transformador, deve-se realizar o cálculo do número de lâminas necessários para a montagem do núcleo, assim como o comprimento dos condutores dos enrolamentos. Este tópico apresenta uma maneira de realizar quantificação desses parâmetros.

2.4.4.1 Quantidade de lâminas

A quantidade total de lâminas pode ser dada ao dividir a profundidade do núcleo em centímetros, pela espessura da lâmina utilizada em centímetros, como mostra a equação 36.

$$Q_{lam} = \frac{D}{E_{lam}} \quad (36)$$

2.4.4.2 Comprimento dos condutores

O cálculo do comprimento dos condutores dá-se pela multiplicação do *MLT* apresentado no tópico 2.2.1 e o número de espiras calculados apresentados no item 2.2.2. Como mostra as seguintes equações.

$$C_1 = MLT \cdot N_p \text{ (cm)} \quad (37)$$

$$C_2 = MLT \cdot N_s \text{ (cm)} \quad (38)$$

$$C_3 = MLT \cdot N_t \text{ (cm)} \quad (39)$$

Onde C_1 , C_2 e C_3 são, respectivamente, os comprimentos dos condutores do primário, secundário e terciário.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será descrito o processo de projeto e implementação do transformador, primeiramente serão descritos os dados de projeto assim como os resultados obtidos com o algoritmo criado, posteriormente será detalhado o processo de implementação do transformador, mostrando o método de montagem do carretel, enrolamentos e núcleo. Por fim, será mostrado o resultado final da montagem do protótipo.

3.1 PROJETO DO TRANSFORMADOR

Para a realização do projeto do transformador, foram utilizadas as especificações apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Especificações do projeto do transformador.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão primária	V_{in}	220	V
Tensão secundária	V_{o1}	127	V
Tensão terciária	V_{o2}	110	V
Corrente secundária	I_2	1	A
Corrente terciária	I_3	4	A
Frequência	f	60	Hz
Rendimento	η	90%	-
Regulação de tensão	α	5%	-
Indução máxima	B_m	1,2	T
Temperatura máxima	T_r	50	°C

Fonte: Autoria Própria.

Com os dados apresentados na tabela 1 e as equações apresentadas no capítulo 2, foi criado um algoritmo em linguagem C para realizar os cálculos de projeto do transformador. O algoritmo é apresentado no apêndice A.

Os resultados obtidos com o auxílio do algoritmo são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Resultados do projeto do transformador.

Resultados			
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Constante das condições elétricas	K_e	1,482	-
Constante da geometria do núcleo	K_g	80,778	-
Dimensão D da lâmina	D	4,445	cm
Dimensão E da lâmina	E	4,445	cm
Dimensão F da lâmina	F	2,223	cm
Dimensão G da lâmina	G	6,668	cm
Número de espiras do primário	N_p	366,643	-
Número de espiras do secundário	N_{s1}	222,235	-
Número de espiras do terciário	N_{s2}	192,487	-
Densidade de corrente	J	336,548	$\frac{A}{cm^2}$
Fio primário	A_{wgb}	18	AWG
Fio secundário	A_{wsb1}	23	AWG
Fio terciário	A_{wsb2}	17	AWG
Diâmetro fio primário	$diam_p$	0,109	cm
Diâmetro fio secundário	$diam_{s1}$	0,063	cm
Diâmetro fio terciário	$diam_{s2}$	0,122	cm
Constante total de utilização da janela do núcleo	k_{unovo}	0,398	-
Quantidade de lâminas	Q_{lam}	88,900	-
Quantidade de fio primário	M_{cond1}	93,861	m
Quantidade de fio secundário	M_{cond2}	56,892	m
Quantidade de fio terciário	M_{cond3}	49,277	m

A figura 8 mostra as dimensões da lâmina projetadas.

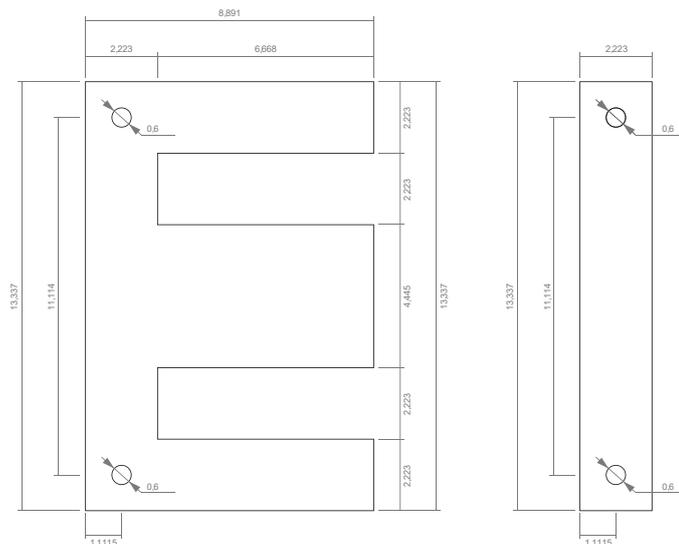


Figura 8: Dimensões das lâminas projetadas.
Fonte: Autoria Própria.

3.2 MONTAGEM DO CARRETEL

Neste trabalho foi necessário a utilização de um carretel construído artesanalmente, pois não foi possível encontrar um carretel comercial do tamanho desejado. Para a confecção do carretel, foram utilizadas lâminas de MDF de 3 milímetros cortadas a laser, a escolha desse material foi devido ao fácil manuseio e baixo custo de aquisição.

Para o dimensionamento das peças, foram utilizadas as medidas da área da perna central do núcleo e a área total da janela do núcleo. Foram utilizadas duas peças para as bases e quatro peças para o corpo do carretel, apresentadas na figura 9.

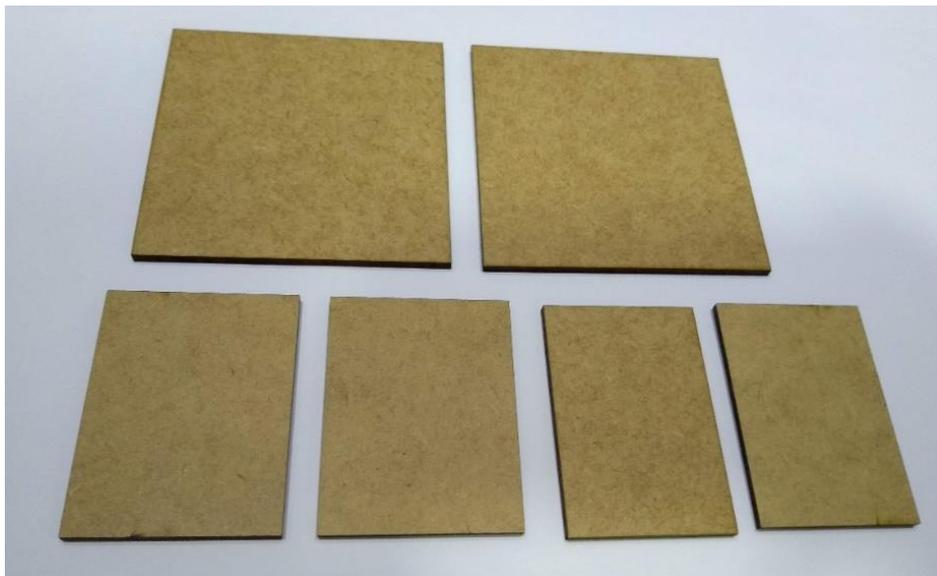


Figura 9: Peças de MDF constituintes do carretel
Fonte: Autoria própria

Para a montagem, diversos itens foram utilizados, tais como: régua, cola, serra, lixas, entre outros.

Após o corte e colagem das peças foram feitos ajustes com uma lixa, para que as lâminas se encaixassem perfeitamente no corpo do carretel. Posteriormente foram feitos cortes nas duas peças referentes as bases, para a entrada e saída dos fios dos enrolamentos.

A estrutura final do carretel pode ser observada na figura 10.

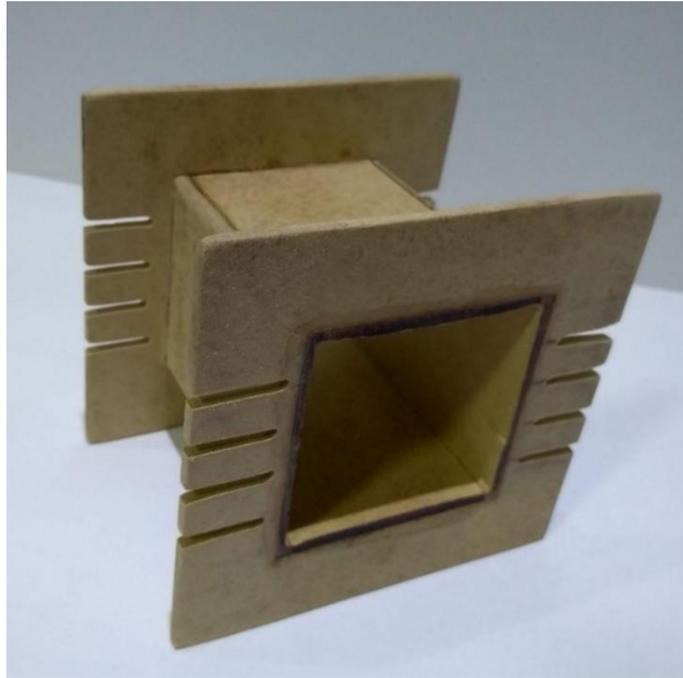


Figura 10: Carretel construído.
Fonte: Autoria própria

3.3 ENROLAMENTOS

Para os enrolamentos, foram utilizados fios de cobre esmaltado, papel isolante, fita crepe, fita isolante e tubos termo retráteis de 1,5 mm. As bobinas foram enroladas de forma concêntrica. Os fios utilizados são apresentados na figura 11.



Figura 11: Fios de cobre esmaltado adquiridos.
Fonte: Autoria própria.

Primeiramente foi realizado o enrolamento do fio referente a bobina primária do transformador. Foram realizadas 367 voltas manuais com o fio AWG 18, foram utilizados os tubos termo retrateis para o acabamento na entrada e saída dos fios, a fim de se evitar possíveis curtos-circuitos. A figura 12 apresenta o resultado final dos processos descritos. Posteriormente, foi utilizado uma camada de papel isolante para fazer o isolamento entre as bobinas.

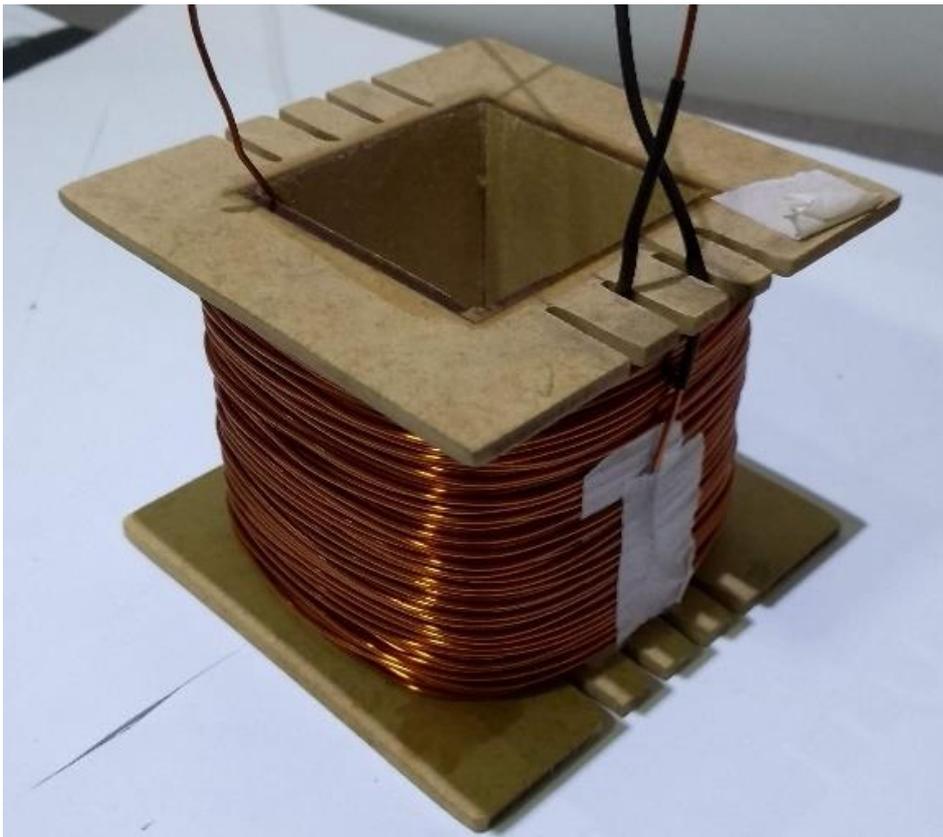


Figura 12: Enrolamento primário antes da camada de papel isolante.
Fonte: Autoria própria.

O processo anteriormente descrito foi repetido para os enrolamentos secundário e terciário, fazendo, respectivamente, 223 e 193 voltas, cada um com seu respectivo condutor calculado, realizando o enrolamento sempre no mesmo sentido das bobinas anteriores.

O resultado final é apresentado na figura 13.

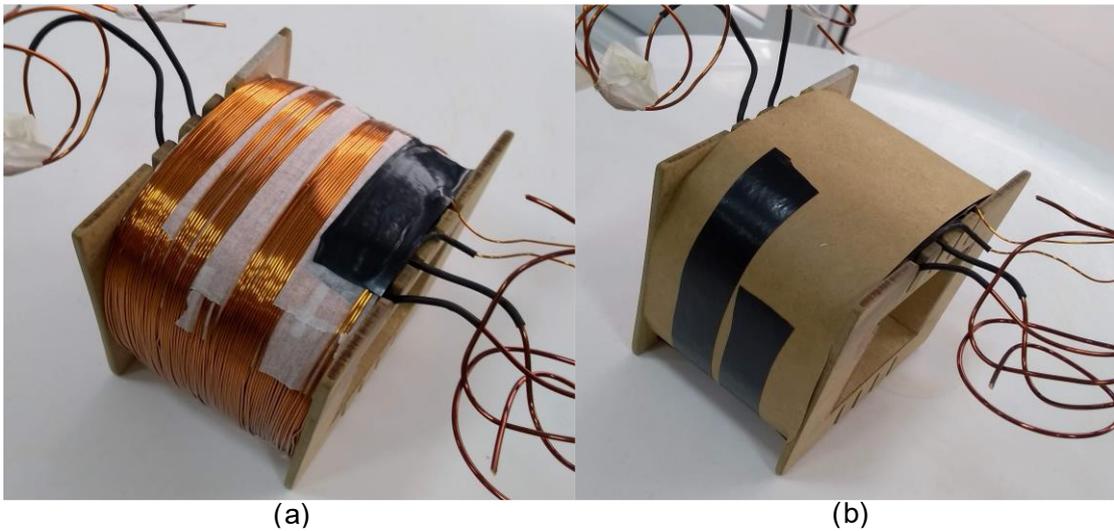


Figura 13: Enrolamentos: (a) sem camada isolante e (b) com camada isolante.
Fonte: Autoria própria.

3.4 MONTAGEM DO NÚCLEO

Foram adquiridas as lâminas *EI* de aço silício modelo EI 4HS-444, com espessura de 0,5 milímetros cada, com especificações extremamente próximas as calculadas em projeto. A figura 14 apresenta as lâminas utilizadas.



Figura 14: Lâminas no formato EI adquiridas.
Fonte: Autoria Própria.

Para a montagem do núcleo com espessura de 4,445 cm foram necessárias 89 lâminas, como mostrado na tabela 2. A montagem foi realizada intercalando as peças *E* em cada lado do carretel, como mostra a figura a seguir.

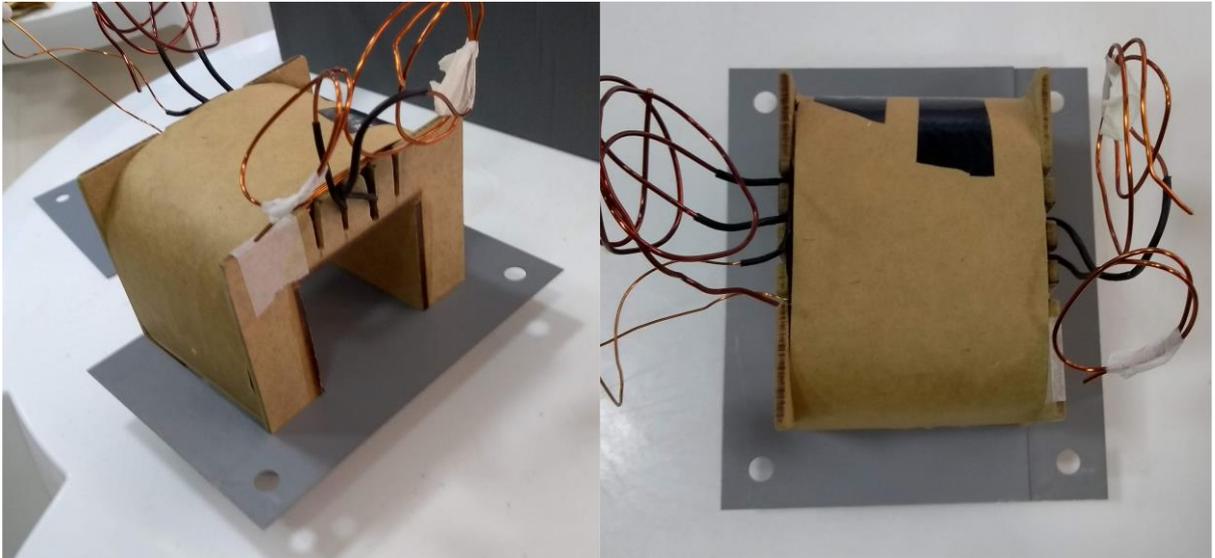


Figura 15: Processo de montagem das lâminas de formato E.
Fonte: Autoria própria.

Após a colocação de todas as 89 lâminas *E* sobraram espaços na parte superior e inferior do núcleo, como é possível observar na figura 16.

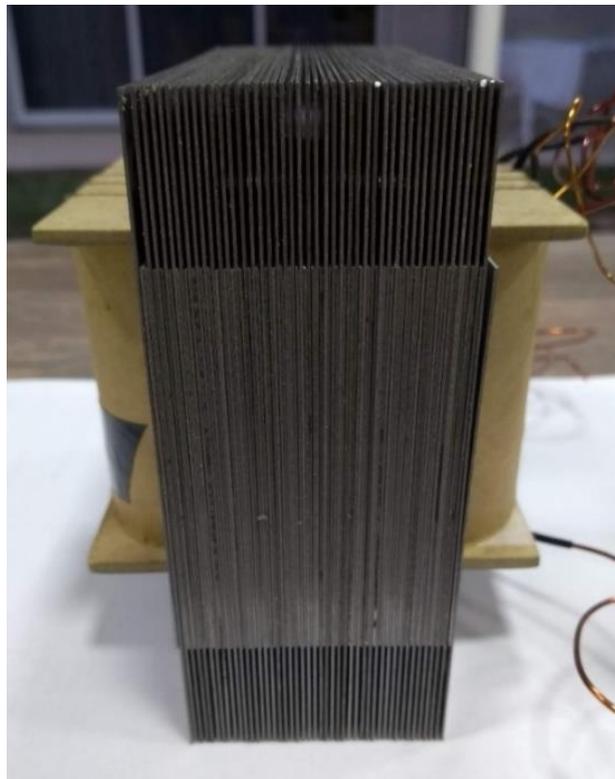


Figura 16: Resultado final após a colocação das 89 lâminas E.
Fonte: Autoria própria.

Para ocupar os espaços deixados, são utilizadas as lâminas no formato *I*. A figura 17 mostra a montagem das lâminas *I*.

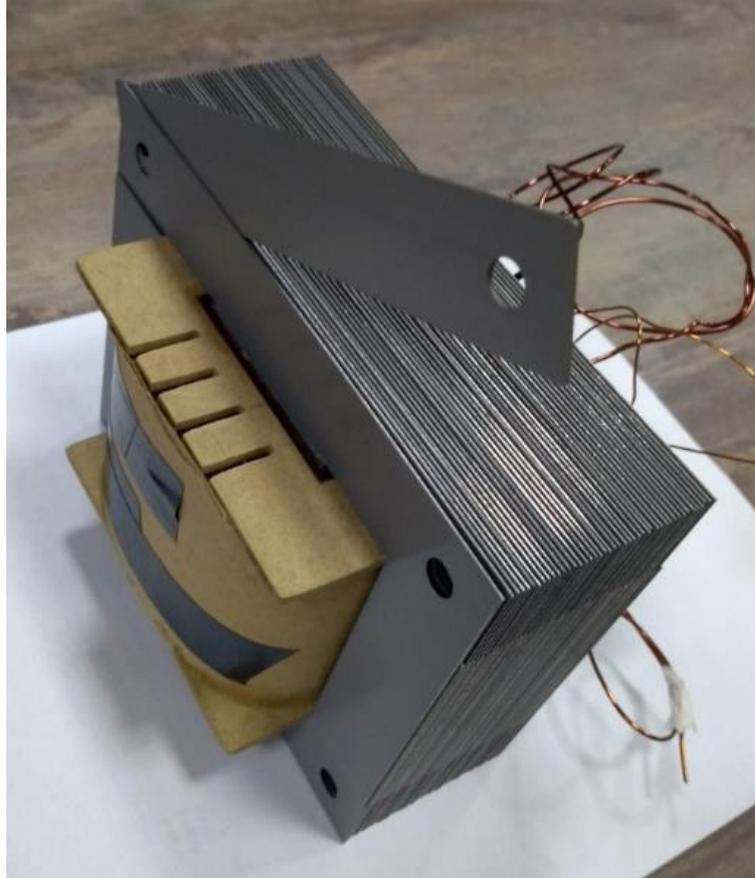


Figura 17: Montagem das lâminas de formato *I*.
Fonte: Autoria própria.

3.5 RESULTADO FINAL

Após a montagem de todas as lâminas, foram utilizados 4 parafusos para fixar o núcleo laminado, a fim de evitar vibrações na operação do transformador. As figuras 18 e 19 apresentam o transformador finalizado.

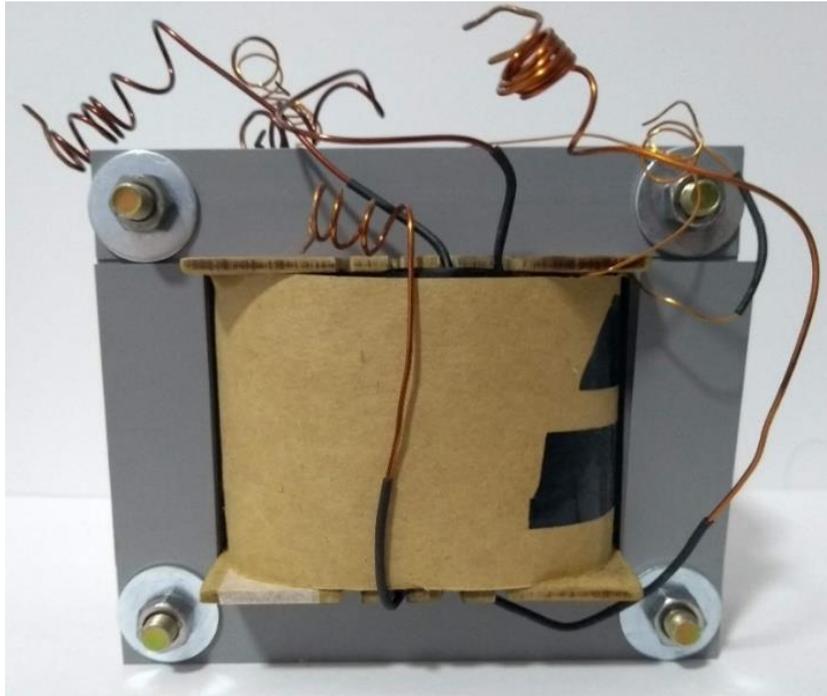


Figura 18: Vista frontal do transformador montado.
Fonte: Autoria Própria.

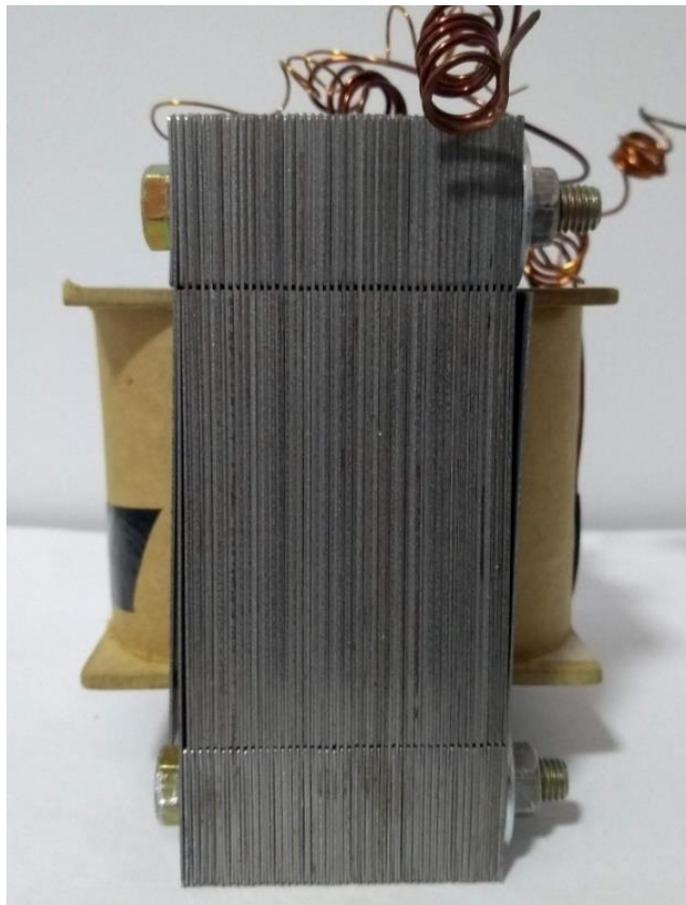


Figura 19: Vista lateral do transformador montado.
Fonte: Autoria Própria.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da simulação do algoritmo e dos testes realizados com o transformador construído. Todos os testes foram realizados na Laboratório de Máquinas Elétricas no Bloco I na sala I001 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco.

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Com o algoritmo criado para o projeto, também foi possível a realização de uma simulação do transformador. A tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3: Resultado das simulações do algoritmo.

Resultados			
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Resistencia fio primário	R_p	1,966	Ω
Resistência fio secundário	R_{s1}	3,789	Ω
Resistência fio terciário	R_{s2}	0,817	Ω
Perdas totais no cobre	P_{cu}	32,986	W
Regulação calculada	$alfa_{calc}$	5,82%	-
Perdas no ferro	P_{fe}	4,025	W
Perdas totais do transformador	P_{soma}	37,011	W
Rendimento calculado	$Rend_{calc}$	93,87%	-

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar com os resultados da simulação, que tanto o rendimento calculado quanto a regulação de tensão calculada, ficaram próximos dos valores estipulados no projeto do transformador. Porém, deve-se levar em consideração que os valores simulados não são os mesmo que o transformador montado, pois no algoritmo, foram utilizados diversos arredondamentos para os cálculos e também, considera-se condições perfeitas de tensões e correntes.

4.2 TESTE DE CONTINUIDADE

Com o teste de continuidade é possível verificar a existência de possíveis curtos-circuitos entre as partes do transformador. Com o auxílio de um multímetro configurado para teste de continuidade foi feita a verificação entre cada enrolamento, posteriormente foi realizado o teste entre enrolamentos e o núcleo do transformador. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Teste de continuidade do transformador de três enrolamentos.

	Entrada 1º	Saída 1º	Entrada 2º	Saída 2º	Entrada 3º	Saída 3º	Núcleo
Entrada 1º	-	Sim	Não	Não	Não	Não	Não
Saída 1º	Sim	-	Não	Não	Não	Não	Não
Entrada 2º	Não	Não	-	Sim	Não	Não	Não
Saída 2º	Não	Não	Sim	-	Não	Não	Não
Entrada 3º	Não	Não	Não	Não	-	Sim	Não
Saída 3º	Não	Não	Não	Não	Sim	-	Não

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que ocorre continuidade apenas entre as saídas e entradas de um mesmo enrolamento. Isso é o esperado, pois confirma a não existência de curto-circuito entre as partes do transformador e mostra que os enrolamentos não romperam.

4.3 TESTE DE INDUÇÃO

O teste de indução tem a finalidade de verificar a ocorrência de indução de tensão entre os enrolamentos. Para o teste foram utilizados um *varivolt*, três multímetros e cabos para as conexões.

Os dados coletados com o ensaio são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Teste de indução em circuito aberto.

Tensão de alimentação (V)	Tensão medida em circuito aberto (V)	
	Enrolamento 1°	Enrolamento 2°
220	133	116,1

Fonte: Autoria Própria.

O resultado obtido foi satisfatório, pois observa-se que existe indução de tensão entre os enrolamentos. As figuras 20 e 21 apresentam uma comprovação do bom funcionamento do transformador calculado e montado.

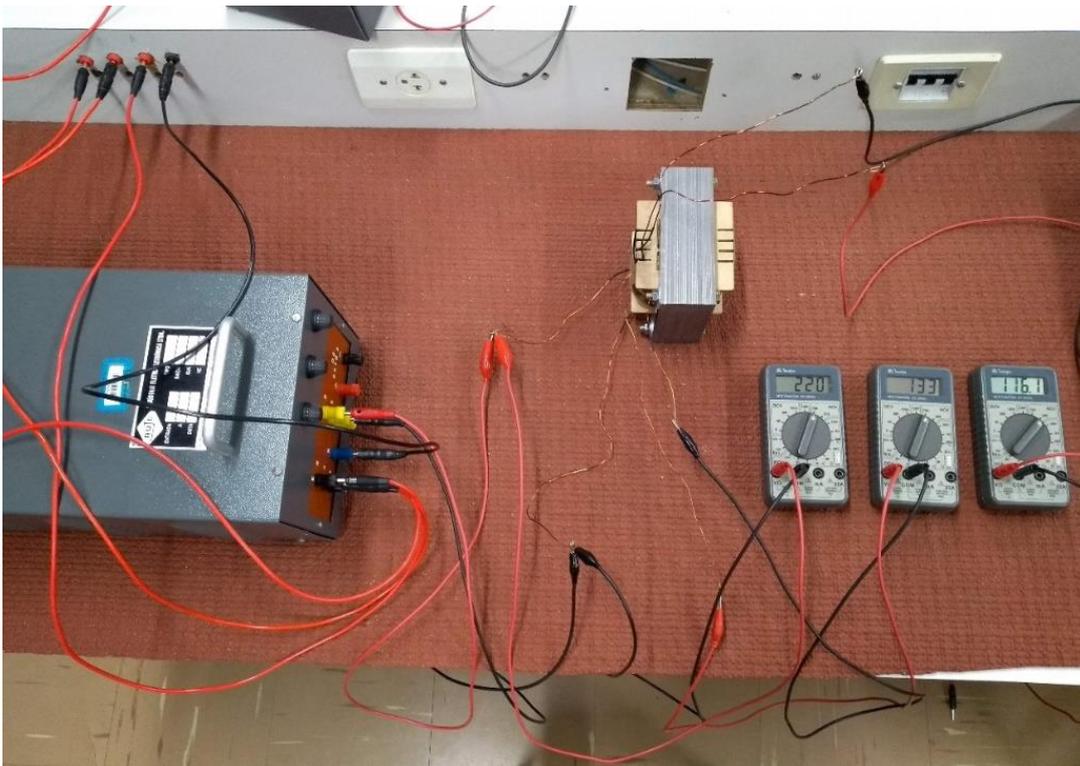


Figura 20: Teste de indução do transformador.
Fonte: Autoria Própria.

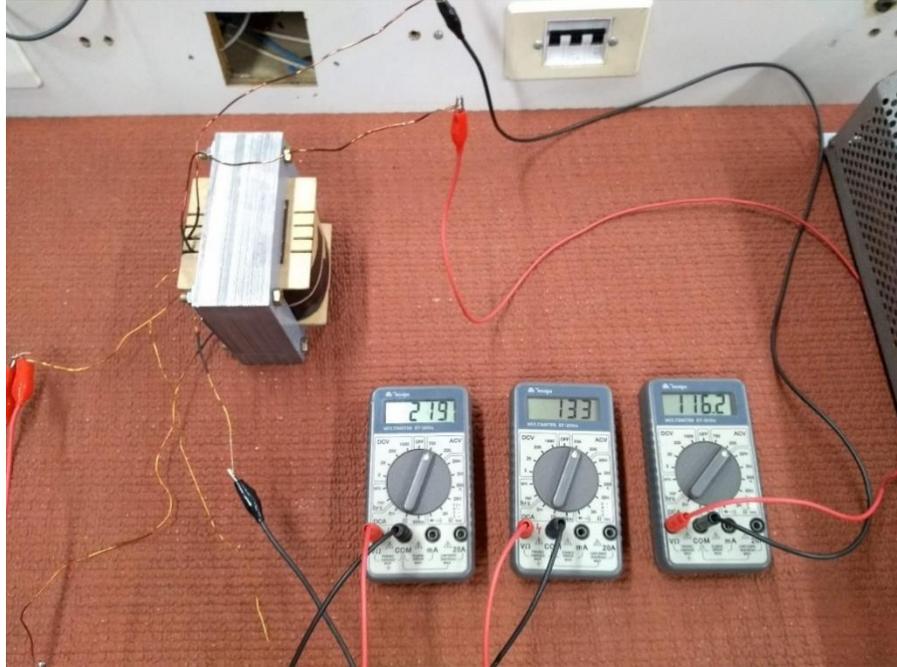


Figura 21: Valores obtidos com o teste de indução.
Fonte: Autoria Própria.

4.4 TESTE DAS TENSÕES E CORRENTES

Os testes das tensões e correntes tem a finalidade de verificar se os valores medidos são correspondentes com as especificações de projeto. Para os testes foram utilizados um *varivolt*, multímetros, alicate amperímetro, dois reostatos e cabos para a conexão.

Primeiramente foi realizado o teste com o transformador sem carga. O esquema de ligação utilizado é apresentado na figura 22.

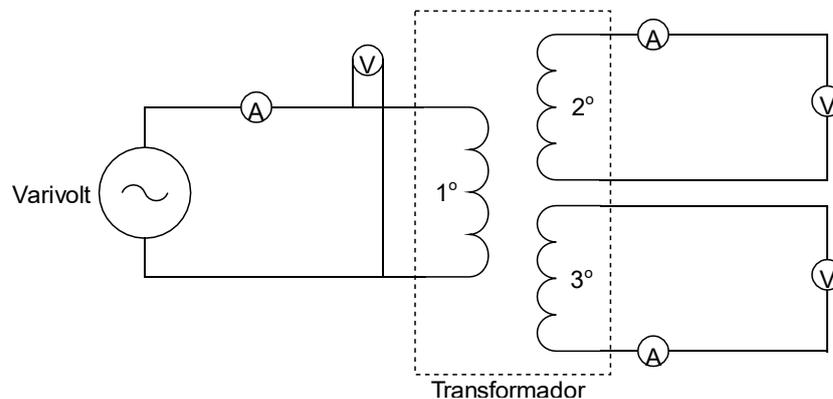


Figura 22: Teste de tensões e correntes sem carga.
Fonte: Autoria Própria.

Com essa configuração, obteve-se os resultados mostrados na tabela 6.

Tabela 6: Teste de tensões e correntes sem carga.

Teste das tensões e correntes com o 2° e 3° abertos		
	Valores medidos	
2° e 3° abertos	I_1 (A)	0,30
	I_2 (A)	0
	I_3 (A)	0
	V_1 (V)	219
	V_2 (V)	133,7
	V_3 (V)	115,9

Fonte: Autoria Própria.

Com os resultados obtidos com o teste a vazio, observa-se que as tensões no secundário e terciário ficaram acima dos valores especificados do projeto, isso era o esperado, pois em uma rede real a tensão de alimentação dificilmente ficará constante em seu valor nominal. Dessa forma, com a flutuação de tensão de alimentação o transformador poderá manter os valores de saída próximos do desejado.

Posteriormente, foram realizados os testes com carga, conectando os reostatos aos enrolamentos secundário e terciário do transformador. Primeiramente foi realizado o teste com os reostatos operando em resistência nominal, em seguida, as resistências foram reguladas para que o transformador operasse o mais próximo possível de seus valores nominais. O esquema de ligação é apresentado na figura 23.

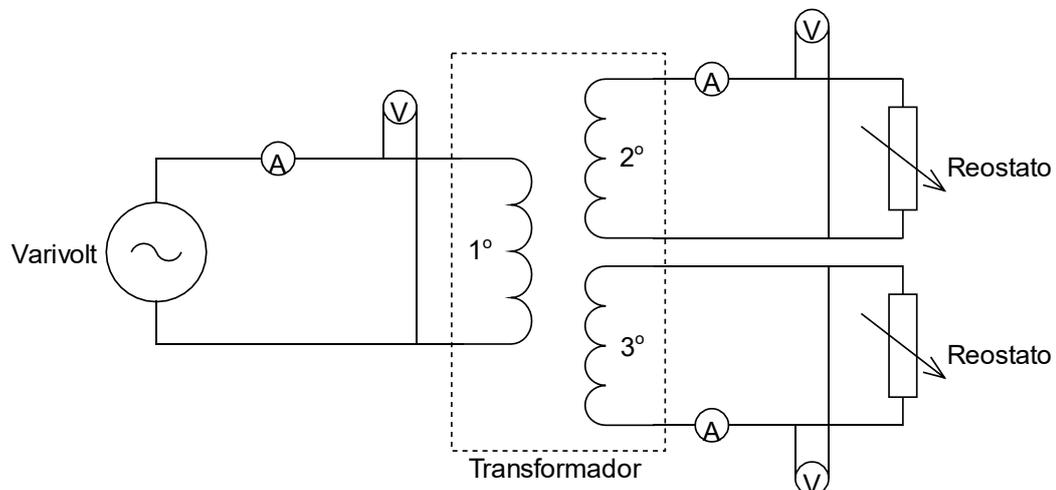


Figura 23: Teste de tensões e correntes com carga.
Fonte: Autoria Própria.

Para esse esquema, obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 7: Teste das tensões e correntes com carga.

Teste das tensões e correntes com carga no 2º e 3º			
		Valores medidos	
		R_{nom}	Plena carga
Carga resistiva no 2º e no 3º $R_{nom} = 320\Omega$	I_1 (A)	0,54	2,1
	I_2 (A)	0,67	0,67
	I_3 (A)	0,30	4
	V_1 (V)	219	215
	V_2 (V)	131,2	126,3
	V_3 (V)	115	107,6
Resistencia medida (Ω)	No 2º	330	265
	No 3º	311	32,9

Fonte: Autoria Própria.

Com os valores obtidos com o teste observa-se que os valores da corrente primária aumentam, quando comparados com o teste sem carga. Isso é de se esperar, pois quando está sem carga, o primário só fornece o valor da corrente de magnetização necessária.

Observa-se também, que os valores de tensões no secundário e no terciário satisfazem em todos os casos os dados de projeto do transformador.

Com os valores da tabela 6 e 7 foi possível fazer o cálculo experimental da regulação de tensão do transformador.

Para o secundário:

$$\alpha = \frac{133,7 - 126,3}{126,3} \cdot 100 = 5,86\% \quad (40)$$

E para o terciário:

$$\alpha = \frac{115,9 - 107,6}{107,6} \cdot 100 = 7,71\% \quad (41)$$

Os valores foram satisfatórios, porém, deve-se levar em consideração que para o teste a plena carga, devido aos equipamentos dispostos, não foi possível

chegar nos valores de corrente nominais do transformador (não foi possível fazer com que I_2 chegasse a 1A mantendo I_3 em 4A). Desse modo, esse cálculo de regulação de tensão não contem os melhores resultados possíveis do transformador.

Conclui-se, que para os testes das tensões e correntes o resultado foi bastante satisfatório, uma vez que as tensões de saída mantiveram valores próximos aos dados de projeto, tanto para o teste sem carga, quanto para o teste com carga.

4.5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS ENROLAMENTOS

Os testes de medição das resistências dos enrolamentos foram realizados com o miliohmímetro digital megabrás modelo MO-2K. A figura 24 mostra o teste realizado.



Figura 24: Teste com o miliohmímetro.
Fonte: Autoria Própria.

Os dados obtidos através dos ensaios são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Resistências medidas com o miliohmímetro.

Resistência	Enrolamento		
	1°	2°	3°
Medida (Ω)	1,760	4,450	0,8920
	1,750	4,440	0,8910
Média (Ω)	1,755	4,445	0,8915
Simulado (Ω)	1,966	3,789	0,817

Fonte: Autoria Própria.

Com a tabela 8 observa-se que os valores obtidos com o miliohmímetro ficaram próximos dos valores calculados na simulação do algoritmo de projeto do transformador. Essa diferença deve-se ao fato de que para os valores calculados foram utilizados valores aproximados de comprimento da espira e de resistência do condutor. Porém, os valores obtidos com o teste são satisfatórios, uma vez que apresentam valores semelhantes ao simulado.

4.6 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

A medição da resistência de isolamento foi realizada com o auxílio do equipamento megômetro modelo MD1035.

Com este aparelho também é possível determinar o índice de polarização I_p (razão entre as resistências de isolação em 10 minutos e 1 minuto), e o índice de absorção I_A (razão entre as resistências de isolação em 1 minuto e 30 segundo).

Primeiramente foram realizados os testes entre os enrolamentos do transformador, conectando os terminais de teste em cada enrolamento e o terminal *guard* no núcleo, foi regulado a tensão de teste para o valor mais próximo da tensão nominal dos enrolamentos. Após 10 minutos foi possível coletar os dados do aparelho.

Posteriormente foram realizados os testes entre cada bobina e o núcleo do transformador, desligando o terminal *guard* e conectando os terminais de teste no

enrolamento e no núcleo do transformador. Após 10 minutos foi possível coletar os dados do aparelho.

A figura 25 apresenta uma imagem do ensaio realizado.

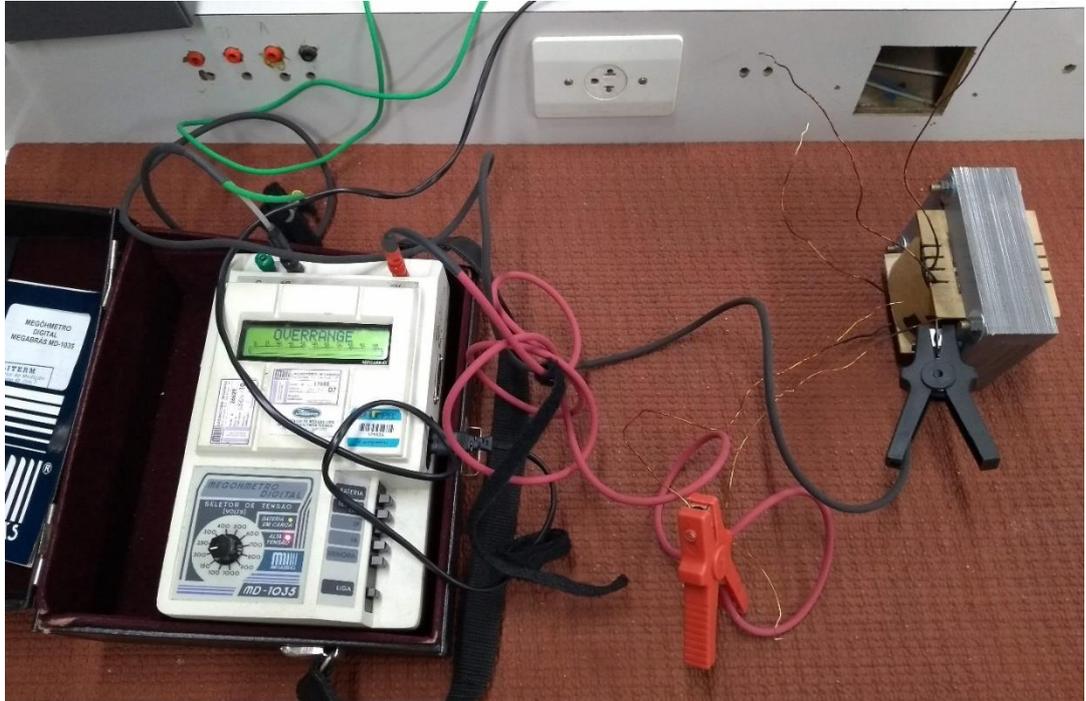


Figura 25: Teste com o megômetro.
Fonte: Autoria Própria.

Os dados obtidos pelo teste são apresentados na tabela 9.

Tabela 9: Teste de resistência de isolamento utilizando o megômetro.

Terminais	Terminal <i>Guard</i>	R de isolamento (Ω)	I_A	I_P	Tensão teste (V)	Tempo (min)
1° e 2°	Núcleo	$> 1000 \times 10^9$	0	> 100	150	10
1° e 3°	Núcleo	$> 10 \times 10^9$	2,1	0,1	100	10
2° e 3°	Núcleo	$> 75 \times 10^9$	0,9	1,6	100	10
1° e Núcleo	Desligado	$> 1000 \times 10^9$	0,5	1,2	200	10
2° e Núcleo	Desligado	$> 50 \times 10^9$	2,3	1,7	150	10
3° e Núcleo	Desligado	$> 159 \times 10^9$	3,1	1,9	110	10

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que as resistências de isolamento de todos os testes foram extremamente elevadas, o que é de se esperar, pois isso mostra que as partes do transformador estão bem isoladas e não correm riscos de apresentar defeitos.

4.7 CUSTOS FINANCEIROS

A tabela 10 apresenta os custos financeiros para a confecção do protótipo.

Tabela 10: Tabela de custos financeiros.

Item	Valor (R\$)	Fornecedor/Vendedor
Placas de MDF	10,00	
Cola	7,50	Via da arte
Lixa	1,50	
Fita	3,00	-
Parafusos e arruelas	4,00	Ferragens Fianco
Tubo termo retrátil	5,00	Áudio K
Fios de cobre esmaltado	85,00	Patoeste
Lâminas de aço silício	91,00	Tessin/Lider Transformadores
Total	207,00	

Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso teve por objetivo realizar o projeto e implementação de um transformador monofásico com enrolamento terciário sem *tap* central.

Para que o trabalho alcançasse os objetivos propostos, foram necessárias diversas etapas. Primeiramente, foram realizados os estudos sobre os conceitos fundamentais a respeito de transformadores. Em seguida, foi realizado o projeto do equipamento a partir de especificações pré-determinadas, com o auxílio de um algoritmo criado em linguagem computacional. Com o algoritmo criado também foi possível simular diversas informações do transformador, tais como, o rendimento, a regulação, as resistências dos enrolamentos e as perdas do transformador.

Para calcular o transformador não foi utilizado um programa pronto de terceiros por este não permitir visualizar as fórmulas implementadas e impossibilitar o acesso de algumas informações como o rendimento, a elevação de temperatura e a regulação de tensão.

Após o projeto, foi realizada a montagem do protótipo, destacando os principais métodos de montagem de cada parte do transformador. Por fim, foram realizados testes que comprovassem o funcionamento do transformador de acordo com os dados estipulados no projeto.

Conclui-se que o resultado final do trabalho foi bastante satisfatório, uma vez que o algoritmo foi capaz de realizar o projeto do transformador com as especificações determinadas e o transformador implementado alcançou com êxito os dados definidos no projeto. O trabalho atingiu seus objetivos, visto que cada item descrito nele foi atendido.

Como sugestão para os trabalhos futuros é o cálculo e implementação de um transformador com enrolamento terciário com outras geometrias de núcleo, tal como, toroidal.

REFERÊNCIAS

BATISTELA, Nelson J. **Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício**. Florianópolis, p. 210, 2001.

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. Elsevier Brasil, 2015.

BLUME, L. **Transformer Engineering**. Nova York: John Wiley & Sons Inc, 1938.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Prentice-Hall do Brasil, 1994.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

KOSOW, Irving L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15ª. ed. São Paulo: Globo, 2005.

MARTIGNONI, Afonso. **Transformadores**. 8ª. ed. São Paulo: Globo, 1991.

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

NOGUEIRA, Daniel D. S.; ALVES, Diego P. **Transformadores de Potência - Teoria e Aplicação Tópicos Essenciais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. 212 p. Disponível em: <<http://migre.me/tuUgJ>>. Acesso em: Outubro 2019.

SALUSTIANO, R. **Análise técnica de transformadores para redes de média tensão**. Itajubá, Minas Gerais, 2012.

VASCONCELLOS, Jonathan C. D. **Análise das Perdas no Transformador Monofásico Para Diferentes Condições de Operação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013. 106 p. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006710.pdf>>. Acesso em: Outubro 2019.

APÊNDICE A – ALGORITMO DE PROJETO DO TRANSFORMADOR.

```

Vin = 220;
Vo1 = 127;
Io1 = 1;
Vo2 = 110;
Io2 = 4;
f = 60;
rend = 0.90;
alfa = 0.05;
Bm = 1.2;
Ku = 0.4;
Tr = 50;
Kf = 4.44;

Po1 = Vo1*Io1;
Po2 = Vo2*Io2;
Po = Po1 + Po2;
Ptso1 = Po1;
Ptso2 = Po2;
Pts = Ptso1 + Ptso2;
Pin = Po/rend;
Ptp = Pin;
Pt = Ptp + Pts;

Ke = 0.145*Kf*Kf*f*Bm*Bm*10^-4;
Kg = Pt/(2*Ke*alfa*100);

D = 4.445;
E = 4.445;
F = 2.223;
G = 6.668;
MPL = 26.7;
Wtfe = 3711/1000;
Wtcu = 1348;
MLT = 25.6;
Ac = 18.770;
Wa = 14.818;
Ap = 278.145;
Kgnovo = 81.656;
At = 652;

Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*f*Ac);
J = (Pt*10^4)/(Kf*Ku*Bm*f*Ap);
lin = Po/(Vin*rend);
Awpb = lin/J;
Awgp = 18;

```

```

diamp = 0.1090;
Awpbnovo = 8.2280*10^-3;
Awp = 9.3260*10^-3;
microohmsporcmp = 209.5;
Rp = MLT*Np*(microohmsporcmp*10^-6);
lp=lin;
Pp=lp*lp*Rp;

Vs1 = Vo1;
Ns1 = ((Np*Vs1)/Vin)*(1+alfa);

Vs2 = Vo2;
Ns2 = ((Np*Vs2)/Vin)*(1+alfa);

Awsb1 = lo1/J;
Aags1 = 23;
diams1 = 0.0632;
Awsbnovo1 = 2.5880*10^-3;
Aws1 = 3.1350*10^-3;
microhmsporcms1 = 666;
Rs1 = MLT*Ns1*microhmsporcms1*10^-6;
Ps1 = (lo1^2)*Rs1;

Awsb2 = lo2/J;
Aags2 = 17;
diams2 = 0.1220;
Awsbnovo2 = 10.39*10^-3;
Aws2 = 11.68*10^-3;
microhmsporcms2 = 165.8;
Rs2 = MLT*Ns2*microhmsporcms2*10^-6;
Ps2 = (lo2^2)*Rs2;
Ps = Ps1 + Ps2;

Pcu= Pp+Ps
alfacalc = Pcu/Po
K = 0.0035700;
M= 1.32;
N = 1.710;
wattsporkg = (K)*(f^M)*(Bm^N);
Pfe = wattsporkg*Wtfe;
Psoma = Pcu+Pfe;
Rendcalc = (Po1+Po2)/((Po1+Po2) + Psoma);
Pporarea = Psoma/At;
Trcalc = 450*(Pporarea^0.826);

Kus1 = (Ns1*Awsbnovo1)/Wa;
Kus2 = (Ns1*Awsbnovo2)/Wa;
Kus = Kus1 + Kus2;
Kup = (Np*Awpbnovo)/Wa;
Kunovo = Kup + Kus;

```

$E_{lam} = 0.05;$
 $Q_{lam} = D/E_{lam};$
 $Q_{lamcompra} = 1.25 \cdot Q_{lam};$

$M_{cond1} = (MLT \cdot N_p)/100;$
 $M_{cond2} = (MLT \cdot N_{s1})/100;$
 $M_{cond3} = (MLT \cdot N_{s2})/100;$

$M_{cond1compra} = M_{cond1} \cdot 1.50;$
 $M_{cond2compra} = M_{cond2} \cdot 1.50;$
 $M_{cond3compra} = M_{cond3} \cdot 1.50;$