

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO VICTOR ARAUJO PINTO

MEDIDAS ELÉTRICAS EM UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

PATO BRANCO

2022

JOÃO VICTOR ARAUJO PINTO

MEDIDAS ELÉTRICAS EM UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Electrical Measurements in a Single-Phase Transformer

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

Orientadora: Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes.

PATO BRANCO

2022



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

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

JOÃO VICTOR ARAUJO PINTO

MEDIDAS ELÉTRICAS EM UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/06/2022

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

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

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

PATO BRANCO

2022

Dedico este trabalho a meu pai e minha mãe que sempre me apoiaram incansavelmente em todas as minhas decisões e me possibilitaram seguir no curso de engenharia elétrica, sem esse apoio toda essa caminhada seria impossível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente a meu Pai Roberto e minha Mãe Raquel por sempre acreditarem no meu potencial, por terem me ajudado em todos os momentos que precisei sem hesitar.

Agradeço a professora Filomena Barbosa Rodrigues Mendes, que é uma pessoa indescritível e uma professora excepcional, sua ajuda e ensinamentos ficarão marcados pelo resto da minha vida.

Agradeço a empresa JL Eléctro Técnica por disponibilizar os meios necessário para elaboração de uma das etapas da construção do protótipo e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

Agradeço também ao grande professor César Augusto Portolann (*in memoriam*) membro da banca avaliadora que acreditou na realização deste trabalho, seus ensinamentos e auxílios ficarão para sempre em minha memória, uma pessoa excepcional.

EPÍGRAFE

Um momento de dor vale uma vida inteira de glória.

(Louis Zamperini).

RESUMO

PINTO, João Victor Araujo. **Medidas elétricas em um transformador monofásico**. 2022. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

O presente trabalho de conclusão de curso busca apresentar o projeto e a implementação de um transformador monofásico cujo núcleo tem o formato E-I. Primeiramente foi realizado um estudo de toda teoria dos transformadores afim de obter a fomentação necessária para a elaboração do projeto e posteriormente a sua implementação, os principais pontos abordados foram os aspectos construtivos, como ocorre a transformação, as perdas e os métodos necessários para elaborar sua implementação. O método de projeto utilizado teve como base um algoritmo elaborado em linguagem computacional, onde o mesmo fornecia as medidas e as quantidades de materiais necessários para atender os requisitos estipulados. Após a implementação foram feitos testes para validar o projeto.

Palavras-chave: Transformador; Monofásico; Implementação; Algoritmo; Núcleo; Projeto; Medidas.

ABSTRACT

PINTO, João Victor Araujo. **Electrical measurements in a single-phase transformer**. 2022. 52 f. Graduation Conclusion Work – Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2022.

The present course conclusion work search to introduce the project and implementation of a single-phase transformer which has the E-I format. Firstly, a study was conducted on the whole theory of transformers to get the necessary support for elaboration and later implementation. The main points addressed were the constructive aspects, how the transformation occurs, the losses, and the necessary methods to elaborate on the implementation. The design method used was based on an algorithm developed in computational language that provided the necessary measurements and quantities of materials to meet the stipulated requirements. After the implementation, tests were carried out to validate the project.

Keywords: Transformer; single phase; Implementation; Algorithm; Core; Project; Measurements.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transformador com (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente. ..	17
Figura 2 - Esquemático de um transformador ideal.....	20
Figura 3 - Medidas das lâminas do núcleo.....	29
Figura 4 - Material necessário para a implementação do transformador.....	30
Figura 5 - Projeto do carretel.....	31
Figura 6 – Chapas de MDF adquiridas.	31
Figura 7 - Carretel finalizado.	32
Figura 8 – Fios de cobre esmaltado adquiridos.	32
Figura 9 - Processo de construção dos enrolamentos.....	33
Figura 10 – Primário finalizado.	33
Figura 11 - Secundário finalizado.	34
Figura 12 - Lâminas E-I adquiridas.....	34
Figura 13 - Processo de montagem do núcleo I.....	35
Figura 14 - Processo de montagem do núcleo II.....	35
Figura 15 - Processo de montagem do núcleo III.....	36
Figura 16 - Resultado final do transformador, vista lateral.	37
Figura 17 - Resultado final do transformador, vista frontal.....	37
Figura 18 – Ensaio de resistência de isolamento.....	39
Figura 19 – Esquema elétrico para o ensaio em vazio.....	40
Figura 20 - Ensaio à vazio.....	41
Figura 21 - Placa de dados do motor de indução monofásico.....	42
Figura 22 - Esquema elétrico do ensaio com carga indutiva.	42
Figura 23 - Ensaio com carga indutiva.....	43
Figura 24 – Esquema elétrico do ensaio com carga resistiva.....	44
Figura 25 - Ensaio com carga resistiva.	45
Figura 26 – Esquema elétrico para o ensaio de perdas no ferro	46
Figura 27 - Ensaio para determinar as perdas no ferro	46
Figura 28 - Esquema elétrico para o ensaio de perdas no cobre.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de projeto do transformador monofásico com núcleo tipo E-I.....	28
Tabela 2 - Resultados para dimensionar as lâminas do núcleo.....	28
Tabela 3 - Resultados obtidos no algoritmo.....	30
Tabela 4 - Resultados da simulação com o algoritmo elaborado.....	38
Tabela 5 - Resultados do ensaio de continuidade.....	39
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência de isolamento.....	40
Tabela 7 - Condições de isolamento em um transformador.....	40
Tabela 8 - Resultados do ensaio à vazio.....	41
Tabela 9 - Resultados do ensaio com carga indutiva.....	43
Tabela 10 - Resultados do ensaio com carga resistiva.....	44
Tabela 11 - Resultados do ensaio de perdas no ferro.....	45
Tabela 12 - Resultados do ensaio de perdas no cobre.....	47
Tabela 13 - Custos totais para a implementação do transformador.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos e Metas	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Estrutura do Documento	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Transformador	16
2.1.1	Núcleo	16
2.1.2	Enrolamentos	17
2.2	Funcionamento	18
2.3	Perdas	22
2.3.1	Perda no núcleo	22
2.3.2	Perda no Cobre	23
2.4	Rendimento	23
2.5	Dimensionamento	24
2.5.1	Dimensionamento do Núcleo	24
2.5.2	Dimensionamento dos Condutores	25
2.5.3	Dimensionamento dos Enrolamentos.....	26
2.5.4	Janela do Núcleo.....	26
2.5.5	Quantidade de Lâminas	27
2.5.6	Quantidade de condutores	27
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Projeto do transformador	28
3.2	Carretel	31
3.3	Enrolamentos	32
3.4	Núcleo	34
3.5	Resultado final da montagem	37
4	RESULTADOS	38
4.1	Simulação	38
4.2	Ensaio de continuidade	39
4.3	Ensaio de resistência de isolamento (Megohmetro)	39
4.4	Ensaio em vazio	40
4.5	Ensaio com carga indutiva	42

4.6	Ensaio com carga resistiva	44
4.7	Perdas no ferro	45
4.8	Perdas no Cobre.....	47
4.9	Custos	48
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE A - ALGORITMO	51

1 INTRODUÇÃO

A primeira estação geradora de energia elétrica foi criada em setembro de 1882 por Thomas A. Edison, porém com a sua criação veio a necessidade de transportar a energia gerada para outras localidades, assim o primeiro sistema de distribuição de energia elétrica dos Estados Unidos foi criado, um sistema de 120V em corrente contínua (CC), porém esse sistema gerava e transmitia energia elétrica com tensões baixas e altas correntes, com isso as perdas aumentavam de maneira significativa conforme a distância entre a carga e a geração também aumentasse (CHAPMAN, 2013).

Os problemas enfrentados pela distribuição de energia elétrica em corrente contínua (CC) foram extintos com a criação de estações geradoras de energia elétrica em corrente alternada (CA) juntamente com transformadores. Basicamente um transformador reduz ou eleva um nível de tensão sem afetar a potência entregue a uma carga. Quando o nível de tensão é elevado pelo transformador a sua corrente é reduzida, e quando esse nível de tensão é reduzido a sua corrente se eleva, com isso a potência original é mantida e a energia elétrica pode ser distribuída de maneira mais eficiente, mesmo em longas distâncias as perdas de energia elétrica são mínimas, e para o seu devido uso esse nível de tensão é novamente transformado e adequado para a rede padronizada da distribuidora de energia elétrica (CHAPMAN, 2013).

Um transformador é um dispositivo que acopla por meio de um fluxo magnético dois ou mais enrolamentos, esses enrolamentos são isolados eletricamente e se comunicam basicamente por esse fluxo magnético. Quando um dos enrolamentos é ligado em uma fonte de tensão CA, será criado então um fluxo alternado onde a amplitude depende da tensão aplicada, frequência da tensão aplicada e o número de espiras do enrolamento que recebe a tensão, com isso uma parte do fluxo criado enlaça os outros enrolamentos, a tensão induzida nesses enrolamentos depende do número de espiras, do valor da amplitude do fluxo e frequência da rede. Uma grande vantagem dos transformadores é que basicamente qualquer relação de transformação pode ser obtida (FITZGERALD, 2014).

Os transformadores não são utilizados unicamente na distribuição de energia elétrica, pode-se utilizar em diversas áreas da engenharia elétrica, como por exemplo em circuitos eletrônicos de baixa potência possibilitando a máxima transferência de potência entre circuitos e na área de telecomunicações (TORO, 1994). Há também a

possibilidade de utilizar transformadores para medições de energia elétrica, onde as grandezas de corrente e tensão são adequadas aos níveis usuais de instrumentos de medidas (CHAPMAN, 2013).

Os transformadores podem sofrer diferentes tipos de perdas que estão ligadas à sua construção e operação, ao implementar um transformador o projeto deve seguir um dimensionamento correto visando minimizar essas perdas. Se corretamente dimensionado e implementado um alto rendimento do transformador pode ser obtido (FITZGERALD, 2014).

Um problema para quem viaja entre diferentes localidades é a questão da mudança do padrão de energia elétrica de cada local, atualmente no mundo existem vários padrões que diferem entre si. A rede elétrica no Brasil tem diferentes padrões, dependendo das concessionárias que atendem cada local, no estado do Paraná, por exemplo, a rede é padronizada com tensões de 127/220 Volts com uma frequência de 60Hz, e mesmo dentro do país há locais com tensões 220/380 Volts dependendo da concessionária que a distribui. Existem países como o Japão, por exemplo, que a tensão de atendimento residencial é 200/100 Volts com frequências de 50Hz e 60Hz, logo se algum equipamento fabricado com as especificações dos japoneses for ligado na rede brasileira podem vir a não funcionar corretamente, já que o equipamento não foi feito para funcionar nessa rede. Uma forma de resolver esse problema é a utilização de um transformador adequado, que consiga transformar a tensão da rede brasileira no estado do Paraná de 127 Volts para 100 Volts, onde o equipamento japonês possa ser ligado conforme suas especificações de operação originais (AGN).

1.1 Objetivos e Metas

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo o cálculo das dimensões, simulação e implementação de um transformador monofásico de núcleo do tipo E-I, e a realização de testes e medições para comprovar que os requisitos iniciais foram atendidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Elaboração de um algoritmo de projeto e cálculo de transformadores monofásicos de construção tipo E-I;
- Aquisição dos materiais necessários para a confecção dos enrolamentos e núcleo;
- Montagem do transformador;
- Realização de testes;
- Medições elétricas para comprovar os requisitos iniciais.

1.2 Estrutura do Documento

- No capítulo 1 é elaborada uma introdução referente aos transformadores, como são importantes para a sociedade e o porquê da escolha dos requisitos de projeto do protótipo que foi implementado.
- O capítulo 2 mostra a fundamentação teórica do trabalho, com a teoria dos transformadores, como são construídos, como é dado o seu funcionamento, as perdas existentes na sua operação e como pode ser feito o seu projeto.
- O capítulo 3 mostra a implementação do transformador projetado e como ocorre sua montagem passo a passo.
- No capítulo 4 os testes e ensaios elaborados são discutidos, mostrando se o transformador conseguiu cumprir os requisitos iniciais estipulados.
- O capítulo 5 fica com as conclusões do trabalho, discussões referentes aos resultados e também algumas sugestões para trabalhos futuros.
- No Apêndice A o algoritmo criado é exposto e discutido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transformador

Basicamente um transformador é um dispositivo capaz de transformar níveis de tensões de um sinal elétrico de corrente alternada (CA), mantendo a sua frequência original e podendo elevar ou rebaixar o sinal elétrico em questão. A sua construção consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um material ferromagnético chamado de núcleo, essas bobinas não têm conexão entre si e a única ligação presente é por meio de um fluxo magnético que passa pelo núcleo (JUNIOR, 2010).

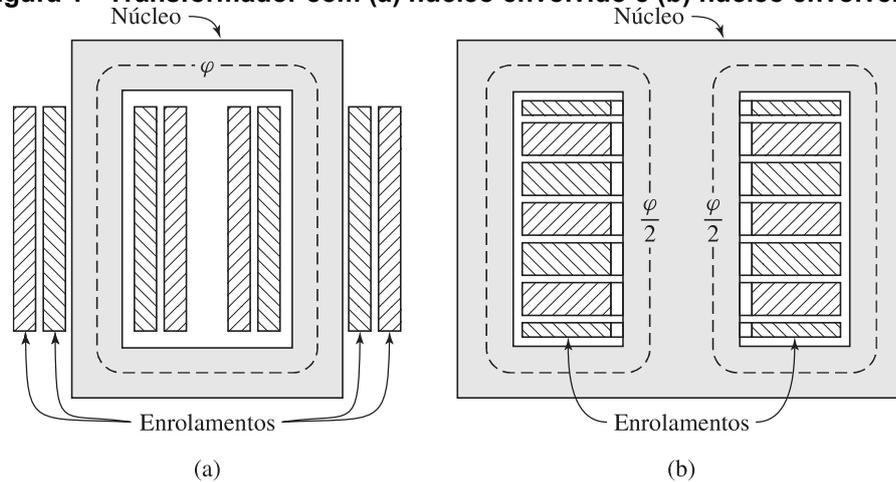
2.1.1 Núcleo

Os transformadores possuem um material ferromagnético com alta permeabilidade magnética chamado de núcleo, é nesse material onde o fluxo magnético irá fluir, usualmente são feitos de aço silício com lâminas de espessura mínima para assim minimizar as perdas por correntes parasitas de Foucault já que com essa característica construtiva a indução de correntes parasitas é reduzida. A forma de construção do núcleo pode ser feita de duas maneiras:

- Núcleo envolvido, onde sua representação é disposta na figura 1.a, cada coluna do material ferromagnético é envolvida pelas bobinas dos enrolamentos.
- Núcleo envolvente, representado na figura 1.b, a coluna central do material ferromagnético é envolvida pelas bobinas dos enrolamentos (FITZGERALD, 2014).

A figura 1 ilustra os tipos de construção do núcleo, onde o transformador pode ser do tipo núcleo envolvido e núcleo envolvente.

Figura 1 - Transformador com (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente.



Fonte: (FITZGERALD, 2014).

Uma comparação entre os dois tipos de construção pode ser exemplificada na quantidade dos materiais gastos. Na construção do tipo núcleo envolvente usa-se menores quantidades de cobre, porém a quantidade de material ferromagnético é maior (BIM, 2018).

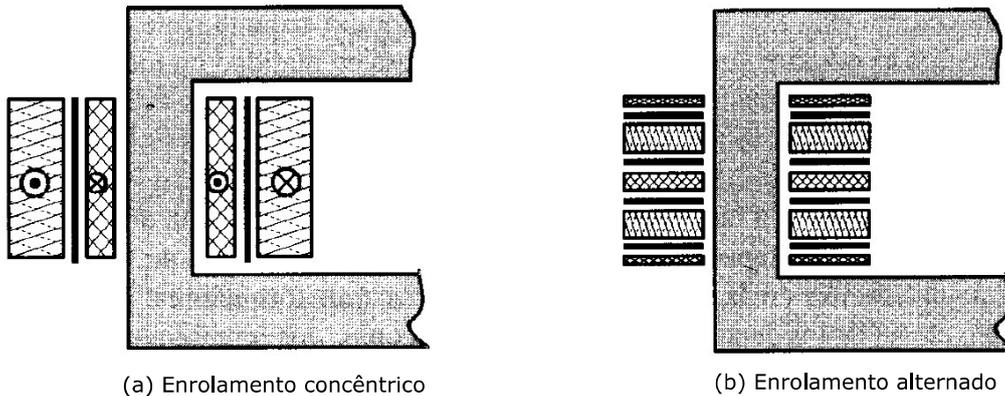
2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos podem ser compostos por condutores de cobre ou alumínio, quando finalizado as voltas necessárias para o enrolamento que está sendo enrolado uma camada de isolamento para evitar curto circuitos é aplicada, essa isolamento pode ser de verniz, fibra de algodão ou papel isolante, os enrolamentos podem ter formas cilíndricas ou de seção retangular e são formados por uma certa quantidade de voltas no núcleo do transformador (MORA, 2008).

Os enrolamentos são considerados a parte mais importante de um transformador. É necessário certo cuidado para o seu projeto já que a vida útil de um transformador está diretamente relacionada à vida útil dos seus enrolamentos (SALUSTIANO, 2012).

A figura 2, mostra os dois tipos mais comuns de construção dos enrolamentos.

Figura 2: Construções dos enrolamentos em um transformador



Fonte: (MORA, 2003).

Na figura 1a é mostrado o enrolamento construído na forma concêntrica, onde as bobinas do primário e secundário são sobrepostas, assim os enrolamentos devem ser separados por algum material isolante.

A figura 1b mostra como seria um enrolamento construído de maneira alternada, assim as bobinas do enrolamento primário e secundário seriam subdivididas e dispostas se alternando uma das outras (Mora, 2003).

2.2 Funcionamento

O transformador tem o seu funcionamento baseado nos fundamentos do eletromagnetismo, especialmente os estudados por Faraday e Lenz. Ao movimentar um campo magnético diante de um indutor uma corrente induzida irá surgir, ou seja, um campo magnético variável produz um fluxo magnético variável, que é responsável pela corrente induzida (JUNIOR, 2010).

A lei de Faraday (CHAPMAN, 2013) pode ser descrita conforme a equação 1.

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

Em que a tensão induzida é dada por e_{ind} e λ é o fluxo concatenado que passa através da espira. A soma do fluxo que passa por cada espira da bobina é dada pela equação 2.

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

E o fluxo individual de cada espira é dado por ϕ_i . Se uma bobina possuir N espiras, então o fluxo que atravessa cada uma delas terá certa discrepância de valores, logo se faz necessário a utilização de um valor médio. O fluxo médio por espira é descrito na equação 3.

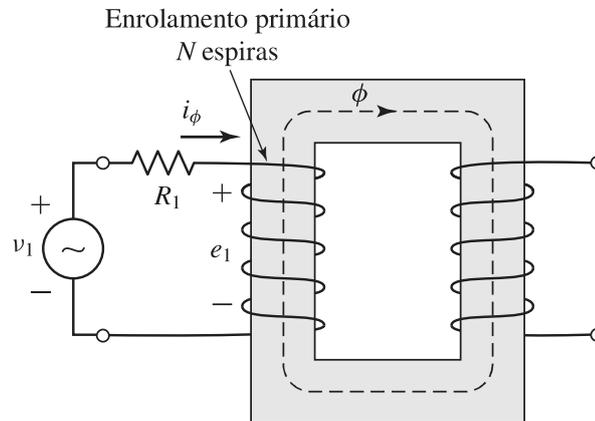
$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N} \quad (3)$$

Logo a lei de Faraday pode ser reescrita, como mostrado na equação 4.

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

A Figura 2 mostra o desenho de um transformador ideal.

Figura 2 - Esquemático de um transformador ideal



Fonte: (FITZGERALD, 2014).

Quando aplicada uma tensão de corrente alternada ($V_1(t)$) no primário do transformador verifica-se que o fluxo médio do enrolamento primário ($\bar{\phi}_p$) depende diretamente da tensão ($V_1(t)$) e é inversamente proporcional ao número de voltas (N_p) do enrolamento primário, como na equação 5.

$$\bar{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_1(t) dt \quad (5)$$

O fluxo médio que passa pelo primário pode ser subdividido em duas partes, o fluxo mútuo (ϕ_M) e fluxo de dispersão primário (ϕ_{DP}), onde o fluxo mútuo (ϕ_M) refere-se ao fluxo que consegue percorrer o caminho do núcleo e engloba a bobina do secundário e retorna para a bobina do primário, e o fluxo de dispersão primário (ϕ_{DP}) ocorre quando algumas linhas do fluxo deixam o núcleo e não chegam à bobina secundária, assim o fluxo médio do primário de um transformador pode ser descrito conforme a equação 6.

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

De maneira análoga para a bobina secundária temos, conforme a equação 7.

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

A lei de Faraday pode ser reescrita levando em consideração o fluxo de dispersão, assim para o primário a tensão induzida nas bobinas pode ser descrita conforme a equação 8.

$$V_1(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt} + N_p \frac{d\phi_{DP}}{dt} \quad (8)$$

Se o transformador for bem projetado, utilizando núcleo com um material de alta permeabilidade magnética e não o saturando, o fluxo de dispersão pode vir a ser desconsiderado, pois o fluxo mútuo é muito maior que o fluxo de dispersão, assim a tensão induzida no primário é descrita conforme a equação 9.

$$V_1(t) = N_p \frac{d\phi_M}{dt} \quad (9)$$

De maneira análoga para a secundário do transformador, a equação 10 descreve a tensão induzida no secundário.

$$V_2(t) = N_s \frac{d\phi_M}{dt} \quad (10)$$

A relação de transformação pode ser obtida dividindo as equações 9 e 10, assim chega-se na equação 11.

$$\frac{V_p}{V_s}(t) = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (11)$$

2.3 Perdas

Ao elaborar um projeto para a implementação de um transformador real deve-se levar em consideração as perdas que podem ocorrer na sua operação. Neste subcapítulo serão apresentadas as principais perdas que ocorrem no transformador.

2.3.1 Perda no núcleo

As perdas no núcleo ou também chamadas de perdas no ferro são produzidas por correntes parasitas e histerese magnética. Pode-se aplicar as seguintes definições para essas perdas:

- Perdas por correntes parasitas: ocorrem quando em uma massa metálica que está sendo sujeita a uma variação de fluxo com uma tensão induzida, surgem correntes muito intensas. Essas correntes se opõem ao fluxo magnético e constitui uma perda de potência. Esse problema pode ser reduzido com base na construção do núcleo, utilizando-se lâminas de material ferro magnético finas e isoladas entre si.
- Perdas por histerese magnética: ocorrem toda vez que o material ferromagnético passa a percorrer o ciclo de magnetização, assim uma pequena parte da energia é utilizada para realinhar os momentos magnéticos. Ao utilizar um material de alta permeabilidade, esse problema pode ser reduzido (MARTIGNONI, 1991).
- Perdas excedentes: essas perdas quando somadas as duas anteriores fornecem as perdas totais no ferro.

As perdas no núcleo, ou perdas no ferro são descritas com base na equação 12.

$$P_{fe} = P \cdot W_{tfe} \quad (12)$$

Em que o peso do núcleo em quilogramas é dado por W_{tfe} e P seriam as perdas por unidade de massa em W/kg.

A perda por unidade de massa é descrita com base na equação 13.

$$P = K \cdot f^M \cdot B_m^N \quad (13)$$

Onde K, M e N seriam coeficientes que dependem diretamente do material em que o núcleo foi construído.

2.3.2 Perda no Cobre

Essas perdas ocorrem nos enrolamentos, devido ao aquecimento resistivo dos mesmos. “São proporcionais ao quadrado da corrente nos enrolamentos” (CHAPMAN, 2013). As perdas no cobre em watts estão descritas na equação 14.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S_c} \quad (14)$$

Onde ρ é a resistividade do cobre em $\Omega \cdot m$, l é o comprimento do condutor em metros, I a corrente que passa pelo condutor em amperes e S_c é a área da seção transversal do condutor em m^2 . As perdas no cobre permitem encontrar a regulação de tensão do transformador, parâmetro que é dado em percentual e descrito na equação 15.

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

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

2.4 Rendimento

Com as perdas definidas é possível calcular o rendimento real do transformador, parâmetro muito importante para um correto dimensionamento.

O rendimento é dado pela equação 16.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{soma}} \quad (\%) \quad (16)$$

Onde η seria o rendimento, P_{out} seria a potência de saída e P_{soma} seria a soma das perdas no ferro e do cobre no transformador.

2.5 Dimensionamento

O projeto de transformador deve seguir um dimensionamento correto para que não ocorram problemas na sua operação. Existem diferentes formas de dimensionar um transformador, para esse projeto será utilizado lâminas de aço silício no formato E-I, onde o núcleo será do tipo envolvente e os enrolamentos serão construídos de maneira concêntrica com condutores cilíndricos de cobre esmaltado isolados entre si.

2.5.1 Dimensionamento do Núcleo

O núcleo do transformador é dimensionado com base nos requisitos iniciais estipulados. Os principais valores que devem ser definidos são as correntes, as tensões, frequência de operação e a regulação de tensão. Com os valores definidos encontra-se a potência total do transformador, assim a constante de geometria do núcleo (K_g) em cm^5 , pode ser encontrada com base na equação 17.

$$K_g = \frac{P_t}{2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100} \quad (17)$$

Na equação 17 temos que potência total em Watts é descrita como P_t , a constante das condições elétricas e magnéticas é descrita como K_e e a regulação de tensão percentual como α .

A constante das condições elétricas e magnéticas pode ser obtida conforme a equação 18.

$$K_e = 0.145 \cdot K_f^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot 10^{-4} \quad (18)$$

Onde K_f é a constante da forma de onda, nesse caso é utilizado os valores de um sinal puramente senoidal sem a presença de harmônicas, assim o sinal da rede elétrica em que o transformador será ligado é simulado. A variável f seria a frequência da rede elétrica que é dada em Hertz e B_m seria a indução magnética que deve ser escolhida para trabalhar no joelho da curva B-H para não ocorrer a saturação.

2.5.2 Dimensionamento dos Condutores

Os condutores têm o seu dimensionamento com base do cálculo da densidade de corrente (J) em $\frac{A}{cm^2}$, que é encontrada com a equação 19.

$$J = \frac{P_t \cdot 10^4}{K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p} \quad (19)$$

Onde devem ser definidos o fator de utilização da janela do núcleo (K_u) e A_p que é dado em cm^4 e seria o produto das áreas. Com a densidade de corrente (J) definida é possível calcular a área da seção transversal dos condutores em cm^2 que serão utilizados no transformador. Em um transformador monofásico de dois enrolamentos temos as equações 20 e 21, para o primário e secundário, respectivamente.

$$A_{wpb} = \frac{I_{in}}{J} \quad (20)$$

$$A_{wsb} = \frac{I_{out}}{J} \quad (21)$$

Onde as correntes de entrada e saída do transformador são utilizadas para os cálculos, I_{in} e I_{out} , respectivamente.

2.5.3 Dimensionamento dos Enrolamentos

Para o dimensionamento dos enrolamentos, ou seja, do número de voltas que as bobinas devem ter, utilizam-se as equações 22 para o primário e 23 para o secundário.

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} \quad (22)$$

$$N_s = \left(\frac{N_p \cdot V_{out}}{V_{in}} \right) \cdot (1 + \alpha) \quad (23)$$

O número de voltas no primário e secundário estão descritos como N_p e N_s , respectivamente, e as tensões de entrada (V_{in}) e saída (V_{out}).

2.5.4 Janela do Núcleo

Na construção de um transformador deve-se analisar se a janela do núcleo irá comportar os condutores projetados, assim uma forma de se verificar a viabilidade da construção do transformador é elaborando os cálculos descritos nas equações 24, 25 e 26.

$$Ku_p = \frac{N_p \cdot Awpbnovo}{Wa} \quad (24)$$

$$Ku_s = \frac{N_s \cdot Awsbnovo}{Wa} \quad (25)$$

$$Ku_{novo} = Ku_p + Ku_s \quad (26)$$

As constantes de utilização da janela dos enrolamentos primário e secundário são descritas como, Ku_p e Ku_s , respectivamente. As variáveis $Awpbnovo$ e $Awsbnovo$

devem ser ajustadas para áreas de fios comerciais e a variável W_a refere-se a área da janela do núcleo.

2.5.5 Quantidade de Lâminas

A quantidade de lâminas necessárias para a construção do transformador pode ser obtida dividindo a profundidade do núcleo projetado pela espessura das lâminas que serão adquiridas, dependendo de modelos e fornecedores.

2.5.6 Quantidade de condutores

Os condutores devem ser dimensionados para que seja possível a realização de todas as voltas projetadas nas equações 22 e 23, assim utilizam-se valores do perímetro mais externo da perna do núcleo onde as bobinas serão enroladas e se multiplica pelo número de voltas do primário e secundário.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feito um detalhamento de todo o processo para o projeto e implementação do transformador. Primeiramente são apresentados os requisitos que o transformador deve atingir e em seguida os valores obtidos no algoritmo, bem como as dimensões construtivas, as quantidades de materiais necessárias e também os valores de medidas elétricas. Posteriormente é descrito o processo de produção do carretel, dos enrolamentos e a montagem do núcleo. Assim o resultado final do protótipo é apresentado.

3.1 Projeto do transformador

O transformador foi projetado para atingir os requisitos apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos de projeto do transformador monofásico com núcleo tipo E-I.

Parâmetro	Valor
Método Construtivo do Núcleo	E-I
Material do Núcleo	Aço Silício
Tensão do Enrolamento Primário (V)	127
Tensão do Enrolamento Secundário (V)	100
Potência (W)	500
Frequência da Rede (Hz)	60
Corrente do Secundário (A)	5
Rendimento (%)	95
Regulação de Tensão (%)	5
Temperatura Máxima (°C)	55
Indução Magnética (T)	1,2
Fator de Utilização da Janela do Núcleo	0,4

Fonte: Autoria Própria (2022)

Com os requisitos iniciais definidos é necessário dimensionar as medidas das lâminas E-I que formam o núcleo, com base nas equações vistas no capítulo 2 e com os requisitos da tabela 1 obtém-se os valores apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Resultados para dimensionar as lâminas do núcleo.

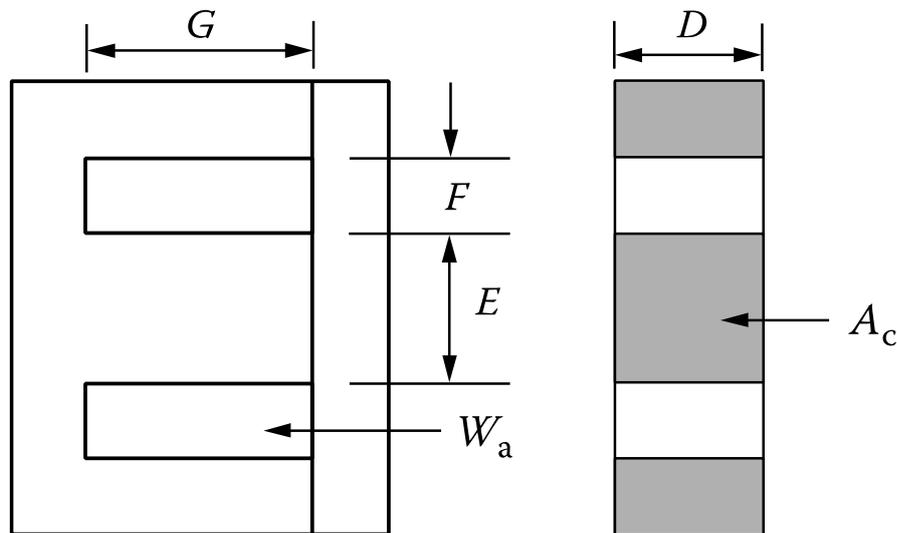
Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
K_e	1.4818	-	Constante Elétrica
K_g	69.2599	cm^5	Geometria do Núcleo

Fonte: Autoria Própria (2022)

Com os resultados da tabela 2 é feito o dimensionamento das lâminas E-I. O valor de K_g calculado deve ser maior ou igual ao K_g dos modelos de chapas comerciais. Assim com o modelo das lâminas definido pode-se verificar as dimensões construtivas atribuídas para esse modelo de lâmina.

As dimensões apresentadas na tabela 3 são referentes às medidas exemplificadas na figura 3.

Figura 3 - Medidas das lâminas do núcleo.



Fonte: (MCLYMAN, 2011).

Com base nas especificações do transformador e nas metas de rendimento, elevação de temperatura e regulação de tensão utilizam-se as equações apresentadas no capítulo 2, para criar um algoritmo em linguagem computacional que será executado no software computacional MATLAB. O algoritmo obtém o cálculo dos parâmetros construtivos das bobinas, do núcleo e de alguns parâmetros elétricos para o projeto do transformador. As principais partes do algoritmo são apresentadas no Apêndice A.

Os resultados obtidos nas simulações elaboradas estão dispostos na tabela

3.

Tabela 3 - Resultados obtidos no algoritmo.

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
K_e	Constante das condições elétricas	1,4818	-
K_g	Constante da geometria do núcleo	69,2599	-
D	Dimensão D da lâmina	4,445	cm
E	Dimensão E da lâmina	4,445	cm
F	Dimensão F da lâmina	2,223	cm
G	Dimensão G da lâmina	6,668	cm
N_p	Número de espiras do primário	211,6528	-
N_s	Número de espiras do secundário	174,9885	-
J	Densidade de corrente	288,5588	A
A_{wgp}	Fio primário	16	$\frac{cm^2}{AWG}$
A_{wgs}	Fio secundário	15	AWG
d_{iamp}	Diâmetro fio primário	0,1370	cm
d_{iams}	Diâmetro fio secundário	0,1530	cm
K_{unovo}	Constante total de utilização da janela do núcleo	0,3817	-
Q_{lam}	Quantidade de lâminas	89	un.
Q_{fiop}	Quantidade de fio primário	154,76	m
Q_{fios}	Quantidade de fio secundário	119	m

Fonte: Autoria própria (2022)

Com as medidas e as quantidades projetadas foi possível adquirir todo o material necessário para a montagem do transformador, que pode ser visto na figura

4.

Figura 4 - Material necessário para a implementação do transformador.



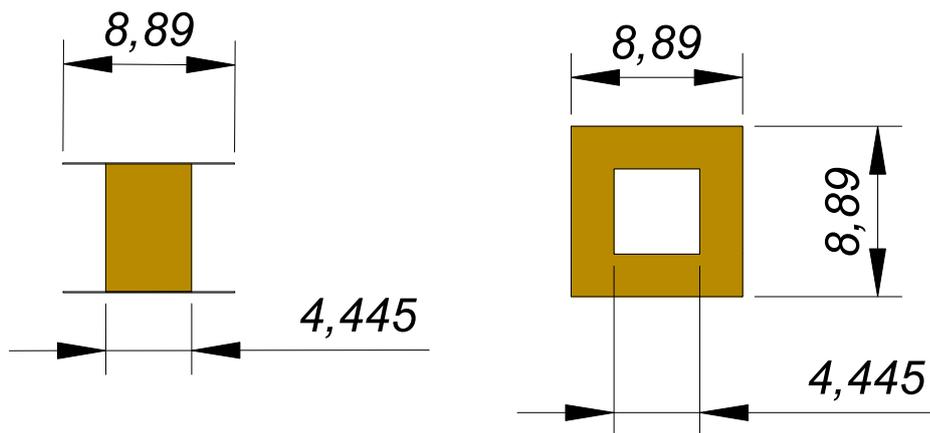
Fonte: Autoria própria (2022)

3.2 Carretel

Para elaborar a montagem do transformador primeiramente é necessário que se tenha um carretel. É nele onde as bobinas serão enroladas para que não se tenha um contato direto com o material ferromagnético. Devido as lâminas projetadas não possuírem medidas comerciais se fez necessário a fabricação de um carretel com chapas de material MDF que foram escolhidas devido ao seu baixo custo e fácil manuseio.

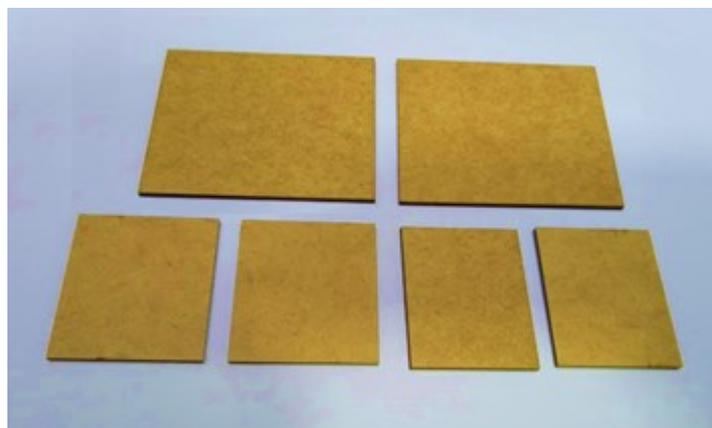
O dimensionamento das peças que formam o carretel é realizado com base nas medidas das lâminas focando a coluna central e na janela do núcleo para que seja possível o encaixe. O dimensionamento e as peças utilizadas inicialmente estão dispostos nas figuras 5 e 6.

Figura 5 - Projeto do carretel.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 6 – Chapas de MDF adquiridas.

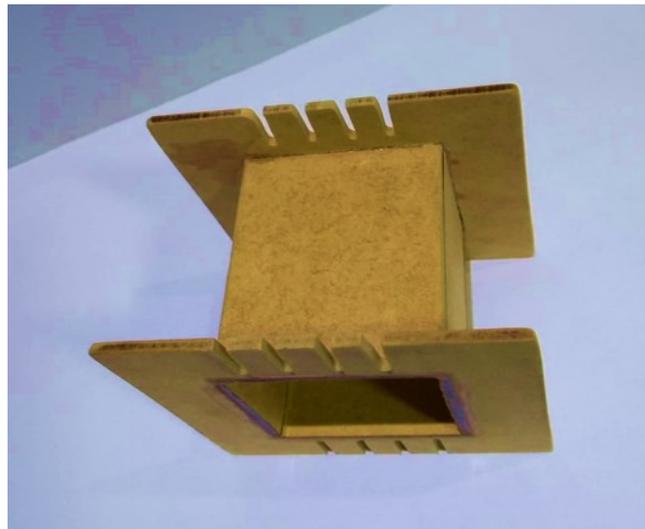


Fonte: Autoria própria (2022)

Durante a montagem foram utilizados alguns materiais como: serra para corte das chapas de MDF, lixa para o acabamento e a adequação de medidas, cola para a junção das peças e uma régua. Alguns cortes foram feitos nas chapas de MDF para que os fios do enrolamento ficassem separados.

A montagem do carretel finalizado pode ser vista na figura 7.

Figura 7 - Carretel finalizado.

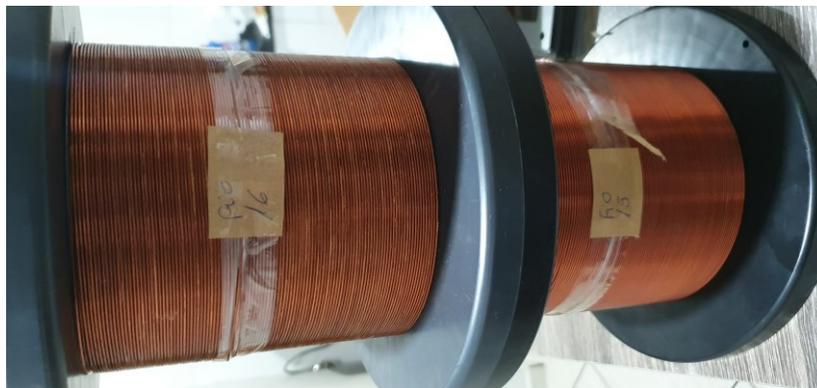


Fonte: Autoria própria (2022)

3.3 Enrolamentos

Para a construção dos enrolamentos foi necessário a utilização de fios de cobre esmaltado, fita de poliéster, fita crepe, fita isolante e papel isolante. Os fios utilizados estão dispostos na figura 8.

Figura 8 – Fios de cobre esmaltado adquiridos.

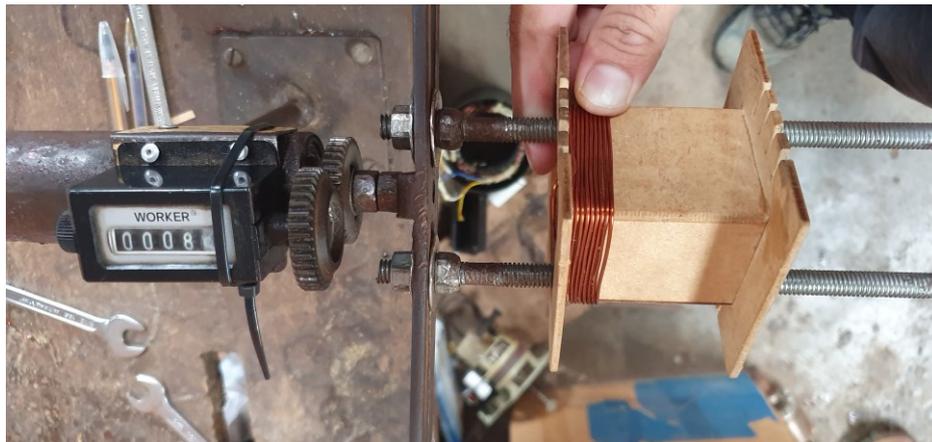


Fonte: Autoria própria (2022)

O enrolamento das bobinas foi elaborado com a utilização de uma “bobinadeira” manual cedida pela empresa JL Elétro Técnica na cidade de Francisco Beltrão – PR, que gentilmente liberou o seu uso.

O carretel é fixado na “bobinadeira” manual e a cada volta é feito um incremento no contador analógico existente como mostrado na figura 9.

Figura 9 - Processo de construção dos enrolamentos.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Para a bobina primária do transformador foi utilizado o fio AWG 16 e foram efetuadas 212 voltas. Ao fim das voltas necessárias foi passada uma camada de fita de poliéster para isolar a bobina, como verificado na figura 10.

Figura 10 – Primário finalizado.



Fonte: Aatoria própria (2022)

O processo foi repetido para a bobina secundária do transformador, porém foi utilizado o fio AWG 15 e foram efetuadas 175 voltas. Mais uma camada de fita de poliéster foi passada e finalizada com papel isolante como mostra a figura 11.

Figura 11 - Secundário finalizado.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.4 Núcleo

O núcleo do transformador projetado utiliza lâminas de material aço silício, onde as mesmas têm o formato E-I, como observado na figura 12.

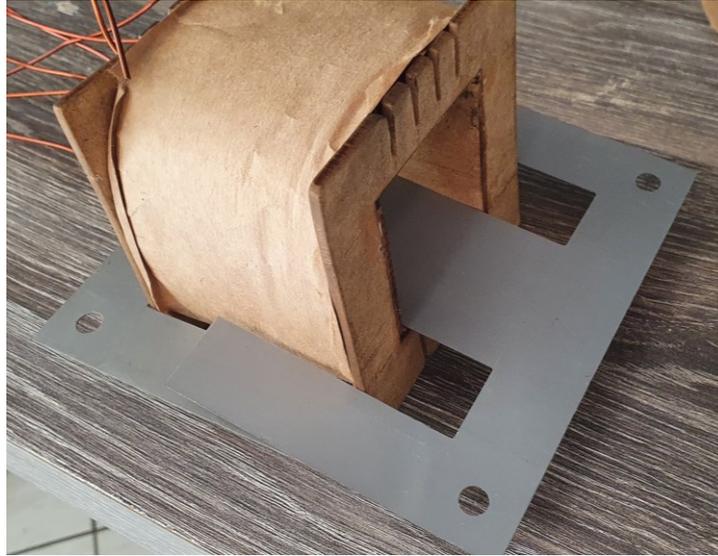
Figura 12 - Lâminas E-I adquiridas.



Fonte: Autoria própria (2022)

Foram utilizadas 89 lâminas para a montagem do núcleo. Cada lâmina E deve ser colocada ao contrário uma das outras e entre elas uma chapa I. Esse processo deve se repetir até que todas as lâminas sejam colocadas, como mostram as figuras 13 e 14.

Figura 13 - Processo de montagem do núcleo I.



Fonte: Autoria própria (2022)

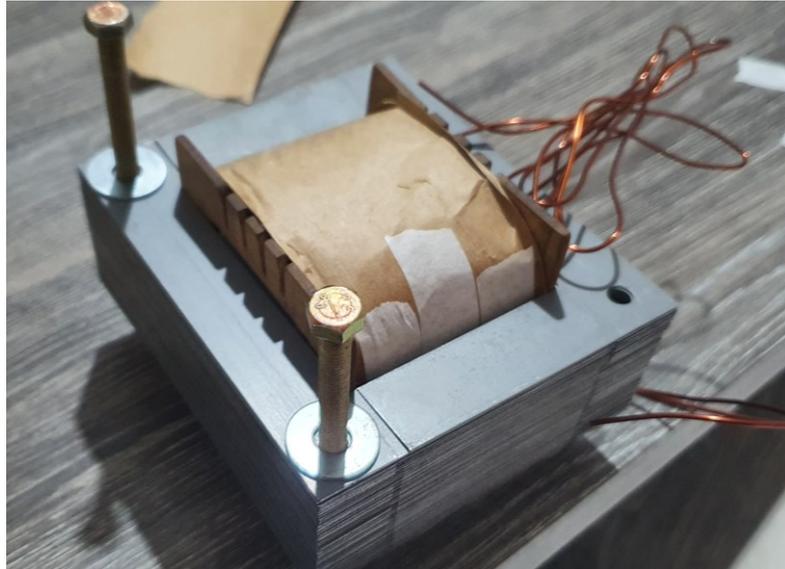
Figura 14 - Processo de montagem do núcleo II.



Fonte: Autoria própria (2022)

Após todas as lâminas serem encaixadas foram anexados 4 parafusos para que as lâminas permaneçam bem fixadas e com distância mínima entre elas, como mostrado na figura 15.

Figura 15 - Processo de montagem do núcleo III.



Fonte: Autoria própria (2022)

3.5 Resultado final da montagem

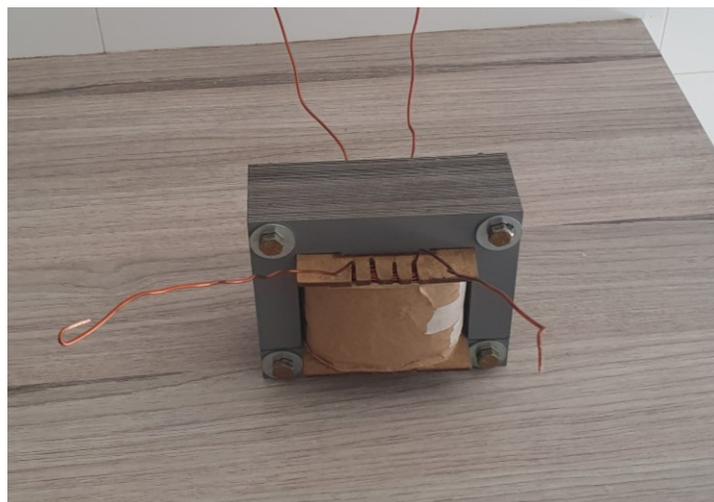
O transformador finalizado pode ser verificado nas figuras 16 e 17, onde são mostradas a entrada e a saída de cada bobina, e as lâminas bem fixadas formando o núcleo.

Figura 16 - Resultado final do transformador, vista lateral.



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 17 - Resultado final do transformador, vista frontal.



Fonte: Autoria própria (2022)

4 RESULTADOS

O capítulo a seguir apresenta os resultados dos testes e simulações elaborados no transformador implementado. Os testes foram realizados na sala I001 – Laboratório de Máquinas Elétricas do Bloco I na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco.

4.1 Simulação

O algoritmo criado possibilitou a aquisição de alguns dados por simulação referente ao funcionamento que o transformador atingiria. A simulação retornou os seguintes resultados, conforme verificado na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados da simulação com o algoritmo elaborado.

Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
R_p	0,7141	Ω	Resistência do Fio Primário
R_s	0,4672	Ω	Resistência do Fio Secundário
P_{cu}	23,9458	W	Perdas Totais no Cobre
α_{calc}	4,79	%	Regulação
P_{fe}	2,8178	W	Perdas Totais no Ferro
P_{soma}	26,7636	W	Perdas Totais
$Rend_{calc}$	94,92	%	Rendimento

Fonte: Autoria própria (2022)

Verifica-se que na simulação o transformador atingiu satisfatoriamente os valores de regulação e rendimento, porém deve-se levar em conta que quando implementado os valores medidos e os cálculos podem divergir, devido que os materiais foram adquiridos de fabricantes diferentes daqueles que disponibilizaram datasheets para a elaboração dos cálculos.

Este trabalho de conclusão de curso visa apresentar alguns testes e medições para comprovar o bom funcionamento do transformador. Medições utilizando todos os possíveis testes não serão apresentados devido a limitação de tempo, falta de instrumentação com escala adequada e riscos envolvidos. Além disso, no curso de Engenharia Elétrica existem as disciplinas de análise de circuitos e máquinas elétricas que cobrem em profundidade os testes não apresentados aqui, por exemplo, o levantamento do circuito equivalente de um transformador e sua análise.

4.2 Ensaio de continuidade

Para verificar possíveis curto circuitos entre as bobinas do transformador e também entre as bobinas e o núcleo foi executado um teste de continuidade, conforme verificado na tabela 5. Este teste também permite verificar se durante o processo de bobinagem ocorreu algum rompimento do fio.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de continuidade.

	Primário	Secundário	Carcaça
Primário	Contínuo	Não contínuo	Não contínuo
Secundário	Não contínuo	Contínuo	Não contínuo

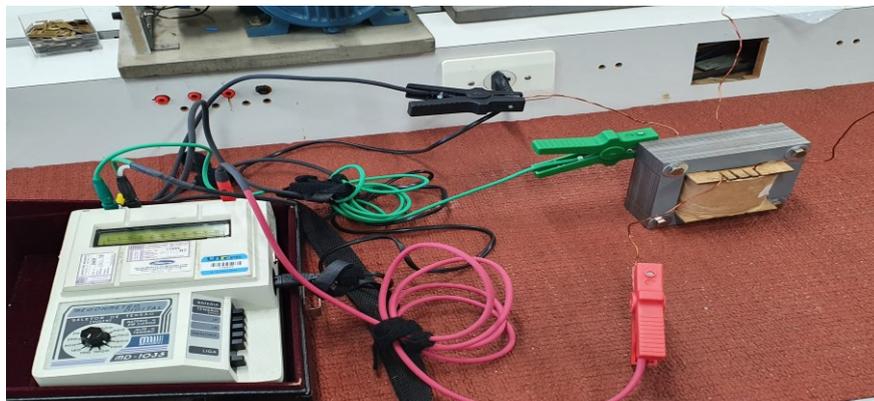
Fonte: Aatoria própria (2022)

O teste mostrou que não há curto circuito entre as bobinas e também com o núcleo. Não houve nenhum rompimento dos fios e o isolamento está como o esperado.

4.3 Ensaio de resistência de isolamento (Megohmetro)

Foi realizado um teste para verificar a resistência de isolamento entre as bobinas e a carcaça do transformador. O equipamento utilizado é o Megohmetro Digital modelo MD-1035, sua utilização pode ser verificada na figura 18, bem como as suas ligações. Segundo a NBR 5356-11 que trata da especificação dos transformadores de potência secos, este ensaio não constitui critério para aprovação ou rejeição do transformador.

Figura 18 – Ensaio de resistência de isolamento.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Os resultados dos testes podem ser verificados na tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência de isolamento.

Terminais	Guard	Tensão (V)	R (Ω)
1º e 2º	Carcaça	127/100	>440G
1º e Núcleo	Desligado	127	2,2k
2º e Núcleo	Desligado	100	2k

Fonte: Autoria própria (2022)

O teste mostrou que a resistência de isolamento entre as bobinas é extremamente alta, fator importante para que não ocorra curto circuitos no transformador, verificou-se também que a resistência de isolamento entre as bobinas e o núcleo também está em um valor adequado. Esses valores podem ser monitorados periodicamente para acompanhar sua alteração.

Na tabela 7 é possível verificar uma relação das resistências medidas no tempo para verificar se estão dentro da faixa de isolação admitida.

Tabela 7 - Condições de isolamento em um transformador.

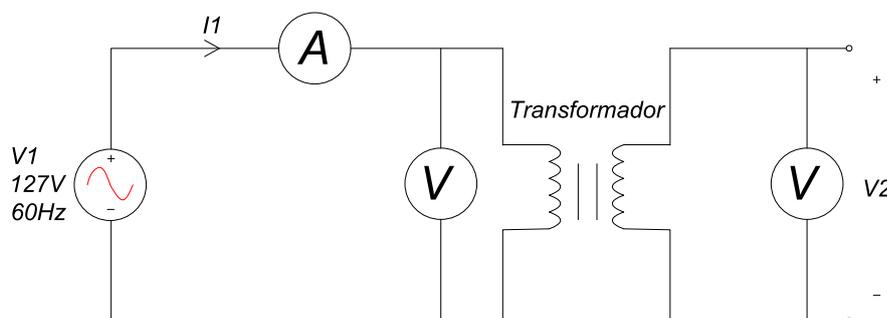
Condições de Isolamento	Índice de Absorção ($\frac{R_{1min}}{R_{10min}}$)
Pobre	< 1,0
Duvidoso	1,0 a 1,4
Aceitável	1,4 a 1,6
Bom	>1,6

Fonte: GT A2.05 (2013)

4.4 Ensaio em vazio

Nesse teste foram utilizados um Varivolt, Multímetros e o cabeamento para ligação. Com o secundário em aberto pode-se verificar se o transformador está fazendo a transformação corretamente. O esquema elétrico disposto na figura 19 foi seguido.

Figura 19 – Esquema elétrico para o ensaio em vazio.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na tabela 8 pode-se verificar os resultados obtidos.

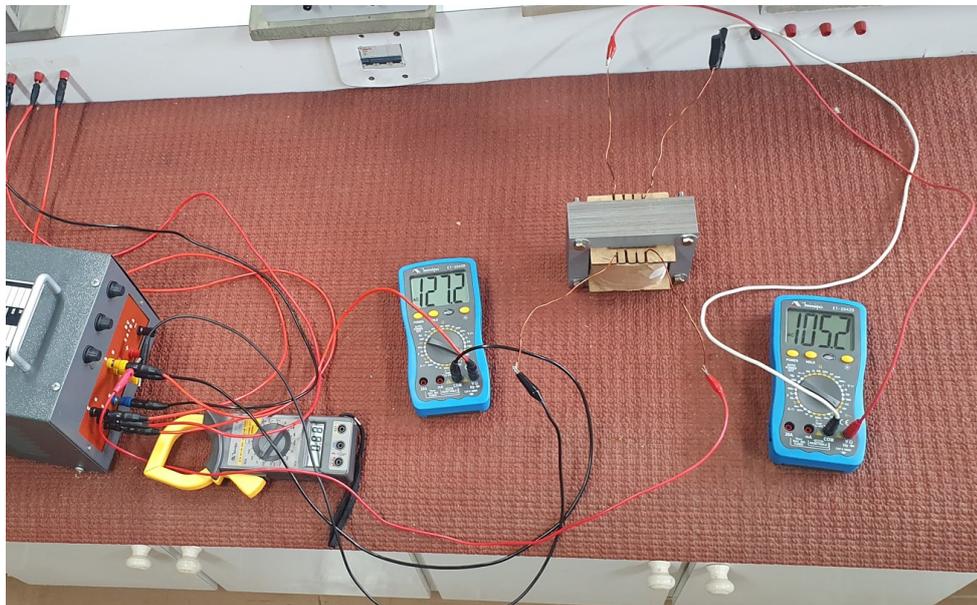
Tabela 8 - Resultados do ensaio à vazio.

V1 (V)	V2 (V)	I1 (A)
127,1	105,2	0,88

Fonte: Autoria própria (2022)

A tensão de saída no secundário de 105,2 V está igual ao projetado uma vez que se utilizou uma regulação de tensão de 4,79%. Esta tensão secundária de 105 V é maior que a tensão secundária projetada de 100 V, porém essa diferença é algo benéfico pois em plena carga a tensão diminui, assim o transformador conseguiria entregar a tensão nominal mesmo em plena carga. A figura 20 mostra o ensaio, bem como a comprovação dos valores obtidos e do bom funcionamento do protótipo de transformador.

Figura 20 - Ensaio à vazio.



Fonte: Autoria própria (2022)

4.5 Ensaio com carga indutiva

Para simular uma carga indutiva foram feitos testes com um motor de indução monofásico. Como não havia um motor com tensão de 100 Volts no laboratório foi utilizado um motor com tensão de 110 Volts, a placa do motor pode ser verificada na figura 21 bem como suas especificações.

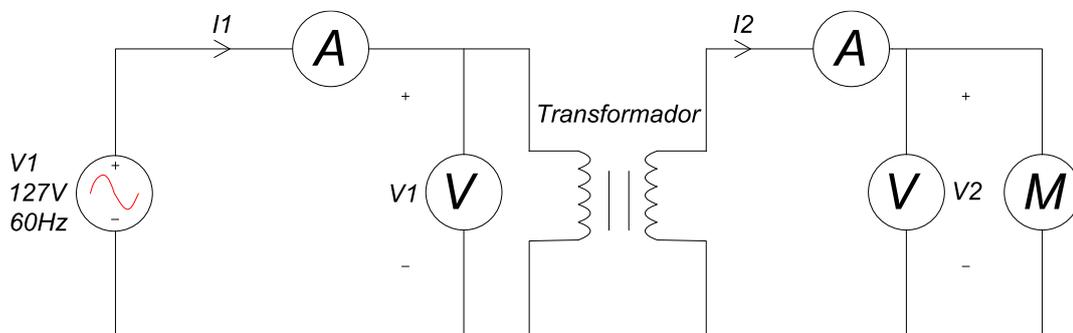
Figura 21 - Placa de dados do motor de indução monofásico.



Fonte: Autoria própria (2022)

O esquema elétrico disposto na figura 22 foi seguido.

Figura 22 - Esquema elétrico do ensaio com carga indutiva.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados dos testes podem ser verificados na tabela 9.

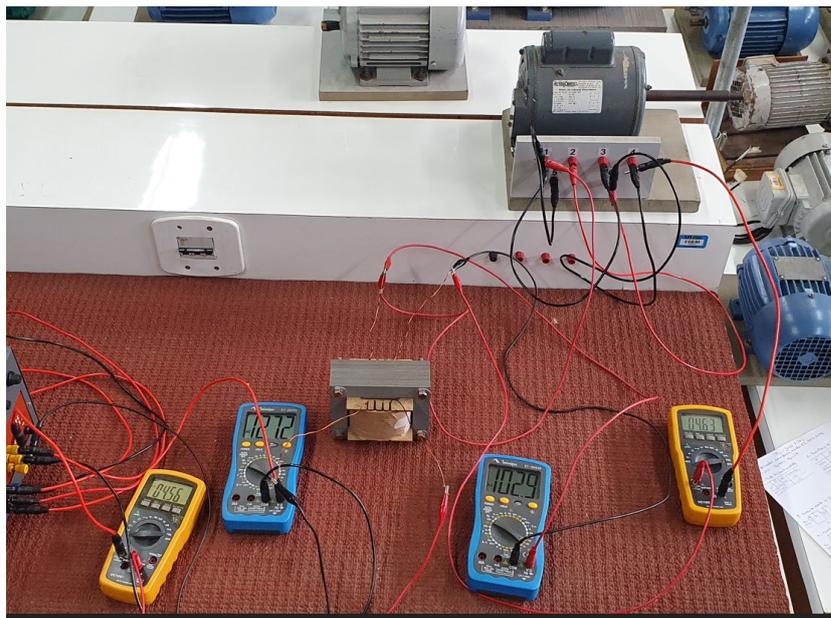
Tabela 9 - Resultados do ensaio com carga indutiva.

V1 (V)	I1(A)	V2(V)	I2(A)	N(Rpm)
127,2	4,56	102,9	4,63	1792

Fonte: Autoria própria (2022)

Com base nos resultados o transformador conseguiu manter o motor rodando dentro de suas especificações de placa, verificou-se uma rotação maior que a da placa devido que o motor estava rodando em vazio. Na figura 23 o teste realizado é mostrado bem como a validação dos resultados encontrados e do bom funcionamento do transformador. Verifica-se que a tensão no secundário do transformador tem uma certa diminuição em carga.

Figura 23 - Ensaio com carga indutiva.



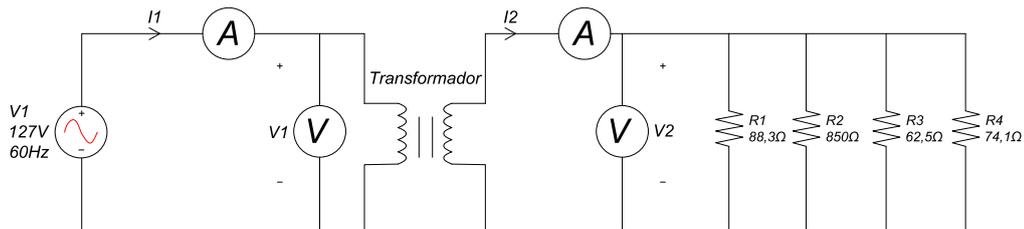
Fonte: Autoria própria (2022)

Seja um transformador alimentado com sua tensão nominal primária (MORA, 2008). Em vazio o secundário proporciona uma tensão V_{2o} . Quando se conecta uma carga no secundário, o transformador deixa de fornecer V_{2o} e passa a fornecer uma tensão V_2 . Isto acontece devido a impedância interna do transformador. Se a carga conectada ao secundário for indutiva então $V_2 < V_{2o}$. Se a carga conectada ao secundário for capacitiva então $V_2 > V_{2o}$. Este fenômeno foi verificado para a carga indutiva onde $V_2 = 102,9 \text{ V} < V_{2o} = 105,2 \text{ V}$.

4.6 Ensaio com carga resistiva

Para o teste com carga resistiva foram utilizados reostatos que foram conectados no secundário do transformador, seguindo o esquema elétrico disposto na figura 24.

Figura 24 – Esquema elétrico do ensaio com carga resistiva.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio com carga resistiva.

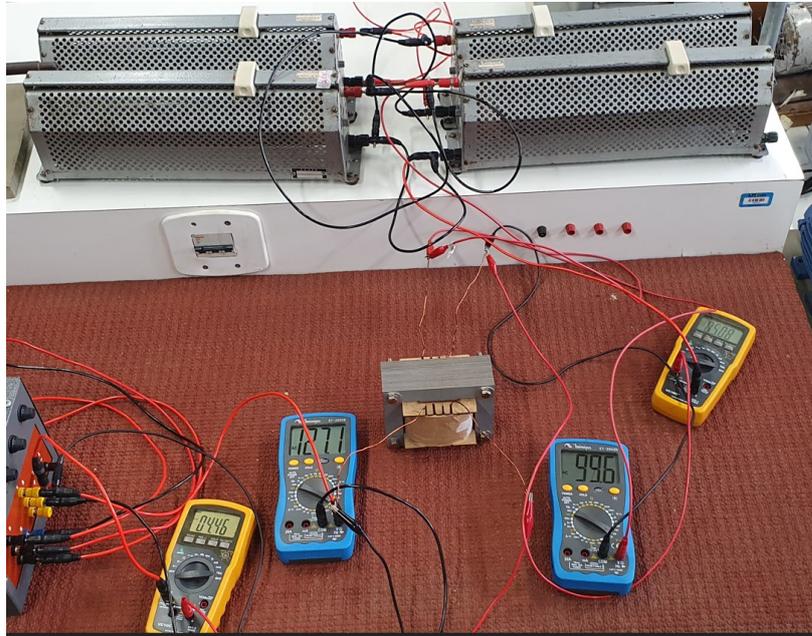
V1 (V)	I1 (A)	V2 (V)	I2 (A)
127,1	4,46	99,6	5,08

Fonte: Autoria própria (2022)

O transformador funcionando próximo da plena carga atinge o valor de corrente projetado e também consegue manter a tensão de secundário projetada, mostrando assim o seu correto funcionamento.

O teste realizado pode ser verificado na figura 25, bem como os resultados encontrados.

Figura 25 - Ensaio com carga resistiva.



Fonte: Autoria própria (2022)

4.7 Perdas no ferro

O teste de perdas no ferro é feito deixando o secundário em aberto e aplicando a tensão nominal no primário. Foi utilizado um alicate Wattmetro para as medidas de potência, os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 11.

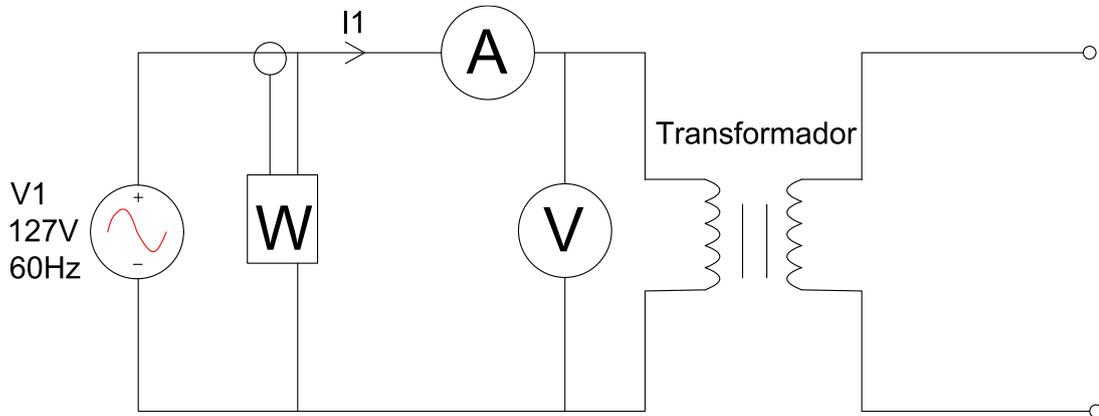
Tabela 11 - Resultados do ensaio de perdas no ferro.

V1(V)	I1(A)	P_{fe} (W)	FP
126,9	0,816	80	0,533

Fonte: Autoria própria (2022)

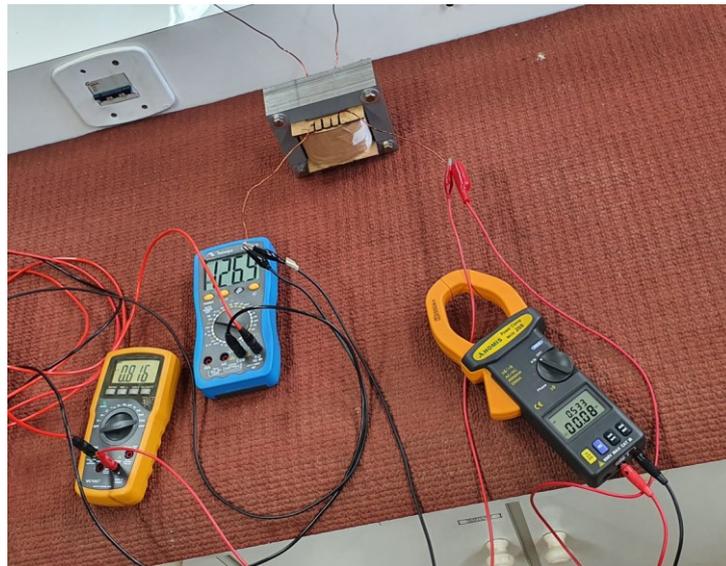
O esquema elétrico disposto na figura 26 mostra as ligações efetuadas e na figura 27 são demonstrados os valores obtidos na prática.

Figura 26 – Esquema elétrico para o ensaio de perdas no ferro



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 27 - Ensaio para determinar as perdas no ferro



Fonte: Autoria própria (2022)

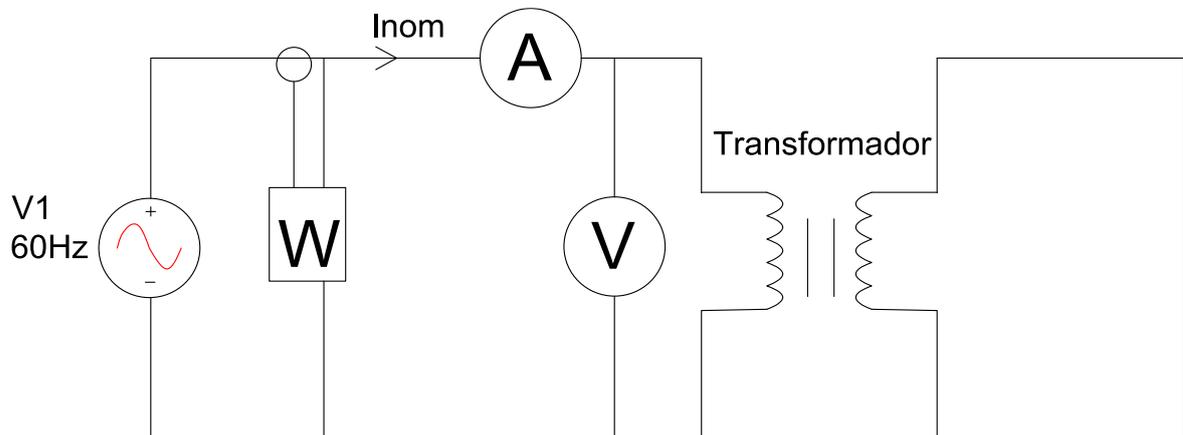
As perdas no ferro medidas (80 W) são diferentes das perdas no ferro calculadas (2,8 W) já que para construir o transformador não foi mantido o fabricante. O fabricante das lâminas do datasheet utilizado não foi o mesmo fabricante que vendeu as lâminas de aço utilizadas para montar o transformador, devido a isso as especificações utilizadas divergem das especificações do material utilizado, causando então a diferença nas perdas no ferro.

Para minimizar as perdas no ferro seria necessário ser utilizado lâminas de material aço silício com grão orientado (GO), porém visando diminuir custos foram utilizados laminas de aço silício grão não-orientado (GNO).

4.8 Perdas no Cobre

O teste de perdas no cobre é feito curto circuitando o secundário do transformador e incrementando a tensão do primário até que a corrente do primário seja a nominal, foi utilizado um alicate Wattmetro para medir a potência. O esquema de ligação utilizado está disposto na figura 28.

Figura 28 - Esquema elétrico para o ensaio de perdas no cobre.



Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de perdas no cobre.

V_1 (V)	I_1 (A)	P_{cu} (W)
6,2	4,19	20

Fonte: Autoria própria (2022)

As perdas no cobre calculadas (23,9 W) não diferem muito das perdas no cobre medidas (20 W), mostrando assim o correto dimensionamento e também a utilização de materiais de boa qualidade.

4.9 Custos

Para implementar o transformador foi necessária a compra de alguns materiais. A relação de materiais, valores e fornecedores é descrita na tabela 13.

Tabela 13 - Custos totais para a implementação do transformador.

Item	Valor	Fornecedor
Lâminas de Aço Silício	R\$ 125,00	Transformadores Lider
Fios de Cobre Esmaltado	R\$ 200,00	Patoeste
Parafusos e Arruelas	R\$ 5,00	Casa dos Parafusos
Fitas	R\$ 10,00	-
Lixa	R\$ 2,00	Casa da Construção
Cola	R\$ 7,00	Papelaria Fonte Nova
Placas de MDF	R\$ 15,00	Papelaria Fonte Nova
Total	R\$ 364,00	-

Fonte: Autoria própria (2022)

5 CONCLUSÃO

Foram propostos o projeto e a implementação de um transformador monofásico para atingir requisitos específicos de operação. O projeto foi realizado seguindo as bibliografias citadas onde toda a fundamentação teórica foi revisada e aplicada. Foi necessário também revisar os conceitos de programação em linguagem computacional para a criação de um algoritmo para o software Matlab.

Após os levantamentos dos conceitos referentes à transformadores e programação o algoritmo foi criado para a obtenção dos parâmetros e simulação de sua operação. O algoritmo permitiu ainda calcular a quantidade dos materiais necessários para implementar o transformador.

Na etapa de implementação foi necessário buscar fornecedores para a compra dos materiais necessários e realizar pesquisas referente as técnicas para implementar da melhor forma um transformador. Todas as etapas da construção do protótipo foram explicadas passo a passo.

Para projetos futuros uma sugestão seria primeiramente que na construção do carretel o perímetro da janela seja ampliado em 5% do tamanho da espessura de cada lâmina para que a janela do carretel seja maior, assim quando se alocar as lâminas para constituir o núcleo não haverá o risco do carretel se romper. Outra sugestão é a utilização de um “bobinadeira” que tracione o fio, pois para projetos em que as bobinas tenham uma grande quantidade de voltas e uma secção do fio maior a construção manual deixa de ser usual.

Após a implementação do transformador, o protótipo precisou passar por uma validação para comprovar o seu correto funcionamento, onde foram feitos vários testes no laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Com os testes foi possível comprovar que os valores estipulados foram atingidos, mostrando assim o sucesso do projeto.

Assim o projeto do transformador se mostrou muito satisfatório pois possibilitou visitar conhecimentos obtidos em vários períodos do curso de graduação em Engenharia Elétrica, e os testes comprovaram o correto funcionamento do transformador implementado.

REFERÊNCIAS

CHAPMAN, Stephen. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. [Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2013. 9788580552072. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580552072/>. Acesso em: 10 abr. 2022.

UMANS, Stephen. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. [Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2014. 9788580553741. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788580553741/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

Edson Bim. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. [Barueri – SP]: Grupo GEN, 2018. 9788595154629. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788595154629/>. Acesso em: 02 mai. 2022.

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

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

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

MCLYMAN, Colonel Wm. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 4ª. Ed. CRC Press, 2011.

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

SALUSTIANO, R. **Análise Técnica de transformadores para redes de média tensão**, [Itajubá, Minas Gerais], 2012. Disponível em:

<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1235>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356-11 – Transformadores de Potência**. Rio de Janeiro, 14 set. 2016.

GT A2.05. **Guia de manutenção para transformadores de potência**. CIGRE Brasil, 2013

APÊNDICE A -ALGORITMO

```

clear all;
close all;
clc

%requisitos iniciais

Vin = 127;                %tensao do primario (volts)
Vo = 100;                %tensao do secundario (volts)
Io = 5;                  %corrente do secundario (Amperes)
Po = Vo*Io;              % potencia de saida (Wats)
Freq = 60;               %frequencia (Hz)
rend = 0.95;              %rendimento (%)
alfa = 0.05;             %regulacao de tensao
Bm = 1.2;                %inducaao magnetica (T)
Ku = 0.4;                %fator de utilizacao da janela do nucleo
Tr = 55;                 %meta de elevacao de tempertura (°C)
Kf = 4.44;               %fator de forma para onda

%primeiro passo, calcular a potencia total

Pt = Po*((1/rend)+1); %potencia total (W)

%segundo passo, calcular as condicoes eletricas

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

%terceiro passo, calcular a geometrica do nucleo

Kg = Pt/(2*Ke*alfa*100); %geometria do nucleo (cm^5)

%quarto passo, com Kg escolher a lamina com kg >= ao calculado

%Escolher a lâmina EI-175

%calcular o numero de espiras do primario
Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*Freq*Ac);
%calcular a densidade de corrente
%calcular a corrente de entrada, a corrente do primario em amperes
%calcular a area do fio nu do primario, sem revestimento

%Dimensionamento do condutor e numero de voltas no primário

%Para o primario sera usado o fio awg 16
Awgp = 16;
diamp = 0.1370; %diametro em cm
Awpbnovo = 0.01307; %cm²
uohmsporcmp = 131.8; %uohmporcm
Awp = 0.01473; %cm², area com revestimento
%calcular a resistencia primaria
%calcular as perdas no cobre do primario
%vamos calcular o numero de voltas do enrolamento secundario

```

```

Vs = Vo;
Ns = ((Np*Vs)/Vin)*(1+alfa); % numero de voltas dos enrolamento secundario
%calcular a area do fio nu para o enrolamento secundario

%%Dimensionamento do condutor e numero de voltas no secundário

%Para o secundário sera usado o fio awg 15
Awgs = 15;
diams = 0.1530; %diamentro do fio secundario em cm
Awsbnovo = 0.01651; %area do fio nu primario em cm², sem revestimento
Aws = 0.01837; %cm²
%calcular a resistencia do enrolamento secundario
Rs = MLT*Ns*uohmsporcms*10^-6; %resistencia do enrolamento secundario em ohms
%calcular as perdas no cobre do enrolamento secundario
%calcular as perdas totais no cobre
%calcular a regulção de tensao do transformador
%calcular os wats por kg
K = 0.0005570;
M= 1.68;
N = 1.86;
wattsporkg = (K)*(Freq^M)*(Bm^N);
%calcular as perdas no ferro
%calcular a perda total
%calcular o rendimento
%calcular a perda por unidade de area
%calcular a elevacao de temperatura em graus celsius

%calcular a utilizacao total da janela

```