

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**ALEX SANDRO GRITTI**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM TRANSFORMADOR  
MONOFÁSICO PARA OPERAR EM REDES DE 50 HERTZ**

**PATO BRANCO**

**2022**

**ALEX SANDRO GRITTI**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM TRANSFORMADOR  
MONOFÁSICO PARA OPERAR EM REDES DE 50 HERTZ**

**Design, Construction and Analysis of a Single-Phase Transformer to Operate in  
50 Hertz Power Grid**

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.

**ALEX SANDRO GRITTI**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM TRANSFORMADOR  
MONOFÁSICO PARA OPERAR EM REDES DE 50 HERTZ**

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.

Data de aprovação: 10 de novembro de 2022

---

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

---

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

**PATO BRANCO**

**2022**

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus familiares e amigos por sempre acreditarem no meu potencial e me apoiarem nos momentos mais difíceis ao longo de minha graduação.

Agradeço a minha professora orientadora Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes pela disponibilidade, confiança, e todo o conhecimento que comigo compartilhou tornando possível a realização deste trabalho.

E por fim agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todos os professores que de alguma forma contribuíram para meu crescimento acadêmico e profissional.

## EPÍGRAFE

Nossa maior fraqueza é a desistência. O caminho  
mais certo para o sucesso é sempre tentar  
apenas uma vez mais.  
(Thomas Alva Edison).

## RESUMO

GRITTI, Alex Sandro. **Projeto, Construção e Análise de um Transformador Monofásico para Operar em Redes de 50 Hertz**. 2022. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo mostrar o projeto e a construção de um transformador monofásico com formato de núcleo do tipo “E-I” e que vai operar em uma rede elétrica com frequência de 50 hertz. A fim de desenvolver e obter os conhecimentos necessários para tal projeto foi necessário o estudo de toda a teoria de transformadores, visando a parte teórica, construtiva e de análise de transformadores. Para o projeto foi elaborado um algoritmo computacional no *software* Matlab, onde o mesmo retorna à quantidade de materiais necessários para atender os requisitos estipulados, o algoritmo ainda retorna dados elétricos simulados do transformador, informações úteis para a comparação e validação dos resultados medidos na prática.

**Palavras-chave:** Transformador; Projeto; Construção; Análise; Frequência; Algoritmo.

## ABSTRACT

GRITTI, Alex Sandro. **Design, Construction and Analysis of a Single-Phase Transformer to Operate in 50 Hertz Power Grid**. 2022. 57 f. Graduation Conclusion Work - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2022.

This course conclusion work aims to show the design and construction of a single-phase transformer with “E-I” core format that will operate in a power grid with a frequency of 50 hertz. In order to develop and obtain the necessary knowledge for such a project, it was necessary to study the entire theory of transformers, aiming at the theoretical, constructive and analysis of transformers. For the project, a computational algorithm was developed in Matlab software, where it returns to the number of materials needed to meet the stipulated requirements, the algorithm still returns simulated electrical data from the transformer, useful information for the comparison and validation of the measured results in practice.

**Keywords:** Transformer; Design; Construction; Analysis; Frequency; Algorithm.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema elétrico de um transformador ideal.....	19
Figura 2 - Tipos de núcleo na construção de um transformador.....	22
Figura 3 - Enrolamentos concêntricos ou tubulares.....	23
Figura 4 - Enrolamento com bobinas alternadas .....	23
Figura 5 - Curva de Histerese.....	25
Figura 6 - Dimensões do núcleo .....	32
Figura 7 - Dimensionamento do carretel.....	34
Figura 8 - Lâminas de material MDF .....	34
Figura 9 - Montagem do carretel I.....	35
Figura 10 - Montagem do carretel II.....	36
Figura 11 - Resultado final do carretel .....	36
Figura 12 - Fios de cobre esmaltado .....	37
Figura 13 - Montagem dos enrolamentos I.....	37
Figura 14 - Enrolamento primário finalizado.....	38
Figura 15 - Secundário finalizado .....	38
Figura 16 - Lâminas de aço silício .....	39
Figura 17 - Parafusos do núcleo .....	40
Figura 18 - Resultado da implementação do transformador I.....	40
Figura 19 - Resultado da implementação do transformador II.....	41
Figura 20 - Bancada para a realização dos testes.....	44
Figura 21 - Esquema elétrico do teste de circuito aberto no secundário .....	45
Figura 22 - Ensaio de circuito aberto no secundário .....	46
Figura 23 - Esquema elétrico do teste com carga resistiva.....	47
Figura 24 - Ensaio com carga resistiva .....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos iniciais .....	31
Tabela 2 - Resultados construtivos .....	33
Tabela 3 - Resultados das simulações .....	42
Tabela 4 - Resultados do teste de continuidade .....	43
Tabela 5 - Resultados do teste de circuito aberto no secundário .....	46
Tabela 6 - Resultados do ensaio com carga resistiva .....	47
Tabela 7 - Custos.....	49
Tabela 8 - Comparação do núcleo de cada transformador.....	50
Tabela 9 - Comparação das características dos enrolamentos .....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Transformador .....</b>	<b>19</b>
2.1.1	Funcionamento .....	19
2.1.2	Núcleo .....	21
2.1.3	Enrolamentos .....	22
2.1.4	Perdas .....	24
2.1.5	Rendimento .....	26
<b>2.2</b>	<b>Dimensionamento .....</b>	<b>26</b>
2.2.1	Núcleo .....	26
2.2.2	Condutores .....	27
2.2.3	Enrolamentos .....	29
2.2.4	Janela do Núcleo .....	29
2.2.5	Quantidade de Condutores .....	30
2.2.6	Quantidade de Lâminas .....	30
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Projeto do transformador .....</b>	<b>31</b>
3.1.1	Carretel .....	33
3.1.2	Enrolamentos .....	37
3.1.3	Núcleo .....	39
3.1.4	Implementação e resultado final .....	40
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES, RESULTADOS E CUSTOS .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Simulações .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>43</b>
4.2.1	Teste de continuidade .....	43
4.2.2	Bancada .....	44
4.2.3	Ensaio de circuito aberto no secundário .....	45
4.2.4	Ensaio com carga resistiva .....	47
<b>4.3</b>	<b>Custos .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÕES .....</b>	<b>50</b>

<b>5.1</b>	<b>Dimensões e quantidade das lâminas .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2</b>	<b>Espiras e seção dos condutores.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3</b>	<b>Discussões .....</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>
	<b>APENDICE A .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma sociedade está ligado diretamente com o conforto que o ser humano consegue conquistar, esse fato fica mais evidente quando relacionamos a busca incessante por novas tecnologias com as necessidades encontradas em nosso dia a dia, desta forma o desenvolvimento também está diretamente relacionado com o consumo energético.

No mundo moderno o consumo energético teve relação direta com o desenvolvimento tecnológico da sociedade, essa relação é tão ativa que atualmente o uso de energia elétrica per capita de um país é parâmetro direto no cálculo de seu desenvolvimento. Com isso, o avanço tecnológico resulta em um expressivo aumento no consumo de energia elétrica em todo o planeta (PINTO, 2013).

Durante muitos anos, os campos de geração e conversão de energia elétrica não ocupavam um lugar de destaque na opinião pública e eram considerados campos sem muita prosperidade pelos engenheiros eletricitas, cientistas, professores e seus alunos. Mas com o expressivo aumento da demanda por energia no mundo e o esgotamento de algumas fontes não renováveis, cresce também a busca por novas fontes de energia, bem como métodos mais eficientes de sua conversão. Mas independentemente da fonte ou do método de geração, a energia do tipo elétrica é a forma de energia que possui maior facilidade para seu transporte, controle, utilização e conversão em outras formas, portanto provavelmente continuará sendo a forma de energia mais utilizada pelo homem, e assim também se torna um campo muito favorável para ser estudado e explorado (KOSOW, 1982).

Devido as exigências técnicas e econômicas, a maioria das grandes usinas de geração de energia elétrica estão situadas muito longe dos grandes centros de consumo, gerando assim a necessidade e o desafio de transportar grandes quantidades de energia por longos trechos. Um grande problema para este transporte de energia, é o fato de que transportar correntes elevadas levariam a necessidade de se utilizar condutores de grandes seções, para assim reduzir significativamente sua resistência, visto que as perdas por efeito Joule em um condutor variam proporcionalmente com sua resistência e com o quadrado da corrente que por ele circula. Então para se viabilizar economicamente e construtivamente a transmissão de energia elétrica, é necessário construir linhas que operam em tensões elevadas e conseqüentemente correntes reduzidas, pois se reduzirmos a corrente de uma linha

em 10 vezes, a lei de Joule nos diz que as perdas na mesma serão reduzidas em 100 vezes (MARTIGNONI, 1991).

Essa manobra de elevar os níveis de tensão é uma das grandes vantagens que a corrente alternada (CA) proporciona, onde com ela podemos elevar ou diminuir os níveis de tensão facilmente por meio de uma máquina elétrica estática de simples construção e alto rendimento, que é o transformador (MARTIGNONI, 1991).

Uma máquina elétrica é um dispositivo cujo funcionamento se baseia no princípio do eletromagnetismo e em particular na lei de indução de Faraday, esses dispositivos são divididos em dois grandes grupos, as máquinas rotativas e as estáticas. As máquinas elétricas rotativas são aquelas que conseguem converter uma forma de energia em outra, dentro dessa classe temos os motores, que são dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica e os geradores que convertem energia mecânica em energia elétrica. Já as máquinas elétricas estáticas, ou mais especificamente os transformadores, são dispositivos que alteram os níveis de tensão de uma rede de corrente alternada (MORA, 2003).

As três máquinas citadas anteriormente são fundamentais para o sistema elétrico do planeta, pois estão presentes nas etapas de geração, transmissão, distribuição e consumo da energia elétrica. Os motores estão mais concentrados nos centros de consumo de energia, nas residências eles estão presentes em refrigeradores, freezers, aspiradores de ar, processadores de alimentos, aparelhos de ar condicionado, ventiladores e muitos eletrodomésticos similares. E nas indústrias o uso de motores é ainda mais intenso, pois a maioria das máquinas industriais utiliza um motor elétrico para gerar a força motriz necessária para seu funcionamento (CHAPMAN, 2013).

Já os geradores e transformadores têm papel mais ativo na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Na maioria dos casos temos usinas com geradores que geram energia elétrica com tensões na casa de alguns milhares de volts, após isso um transformador eleva a tensão para centenas de milhares de volts, para que as perdas na linha de transmissão sejam minimizadas como citado anteriormente, e já perto dos centros de aproveitamento a tensão é reduzida para algumas dezenas de milhares de volts para sua distribuição, e ao final temos outro transformador que diminui a tensão elétrica para os níveis que os consumidores necessitam (MARTIGNONI, 1991).

Apesar do fato de que um transformador não é um dispositivo que converte formas de energia como as máquinas elétricas rotativas, seu funcionamento segue o mesmo princípio de acoplamento magnético, dessa forma muitas das equações e conclusões obtidas nos estudos de transformadores têm aplicabilidade para as máquinas elétricas rotativas (DEL TORO, 1994).

Como citado anteriormente o transformador é um dispositivo indispensável para os sistemas elétricos de potência, pois ele torna possível a geração elétrica na tensão mais econômica, a transmissão da energia elétrica na tensão mais econômica e a utilização da energia elétrica na tensão mais adequada de um ponto de vista técnico, econômico e de segurança para os consumidores (FITZGERALD, 2014). A invenção do transformador não só ajudou o aperfeiçoamento como também estabeleceu o predomínio dos sistemas de energia CA sobre os sistemas de corrente contínua (CC) a partir do século XIX. Isso se deve ao fato que o transformador permitiu, de forma simples, robusta e eficiente a transferência de energia elétrica de um circuito para o outro alterando as magnitudes de tensão e corrente (BIM, 2012).

Além de ser muito importante para os sistemas elétricos de potência como já citado, o transformador também é muito utilizado na eletrônica e em instrumentos elétricos de medidas, executando funções como o isolamento de dois circuitos, o casamento de impedâncias para que haja máxima transferência de potência de um circuito de entrada ao circuito acoplado, e a adequação de níveis de tensão e corrente, que é sua maior especialidade (FITZGERALD, 2014).

Com toda a importância do transformador destacada anteriormente, o trabalho proposto baseia-se na elaboração de um estudo prévio sobre aspectos construtivos de um transformador e na elaboração do projeto e construção de um transformador monofásico. A motivação principal para o tema escolhido foi a oportunidade em estudar a construção de um dispositivo que é tão importante para os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, importância essa que só aumenta com o fato de que o consumo energético do planeta vem crescendo significativamente ao longo dos anos. Além da contribuição científica que o projeto e a construção desse transformador trarão, esse trabalho também tem como objetivo resolver um problema prático que ocorre quando há necessidade de se usar um aparelho elétrico que tem uma tensão nominal diferente da tensão da rede, esse problema ocorre porque existem diferentes padrões na distribuição de eletricidade pelo mundo.

Dessa forma o trabalho visa resolver o problema de quem está viajando ou foi morar em um lugar onde a tensão fornecida pela concessionária é diferente daquela que seus equipamentos elétricos necessitam, e também daqueles que importam produtos e acabam tendo o mesmo problema de incompatibilidade com a tensão do equipamento e da rede elétrica disponível. Mais especificamente, esse transformador fará a adequação de equipamentos com a tensão nominal de 100 volts, que é a tensão utilizada no Japão, para redes com a tensão de 127 volts, que é um padrão muito utilizado em países das Américas, como por exemplo o Brasil. Além disso o transformador vai ser projetado para operar em redes de 50 hertz, que é um dos padrões de frequência adotados no Japão (BORGES, 2020).



## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a elaboração do projeto e a construção de um transformador monofásico.

## 1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral é necessário:

- Estudar os aspectos construtivos de um transformador;
- Desenvolver um algoritmo computacional para projetar o transformador;
- Projetar os parâmetros e adquirir os materiais necessários;
- Realizar a construção e montagem do transformador;
- Realizar testes para a validação do projeto.

## 1.3 Estrutura Geral

Este trabalho de conclusão de curso está organizado em:

- Capítulo 1: Inicialmente é feita uma introdução aos transformadores, onde é descrito a importância desses dispositivos para o mundo em que vivemos e também uma explicação sobre os requisitos estipulados para que o transformador a ser construído opere.
- Capítulo 2: Toda a teoria dos transformadores será discutida nesse capítulo, e a fundamentação teórica será elaborada. Será visto o funcionamento dos transformadores, como são construídos, suas perdas, e a elaboração do projeto.
- Capítulo 3: Destinado a mostrar o passo a passo da construção do transformador.
- Capítulo 4: Mostra todos os testes realizados e uma análise para verificar se o transformador atingiu os requisitos esperados.
- Capítulo 5: Realiza-se uma comparação entre o transformador de 50 hertz projetado e implementado nesse trabalho com um transformador de 60 hertz de outro trabalho de conclusão de curso (PINTO, 2022).
- Capítulo 6: As conclusões do trabalho são apresentadas nesse capítulo, onde os resultados são discutidos e analisados. Algumas sugestões para trabalhos futuros também são apresentadas.

- Apêndice A: É feita a demonstração das partes principais do algoritmo criado para o projeto.

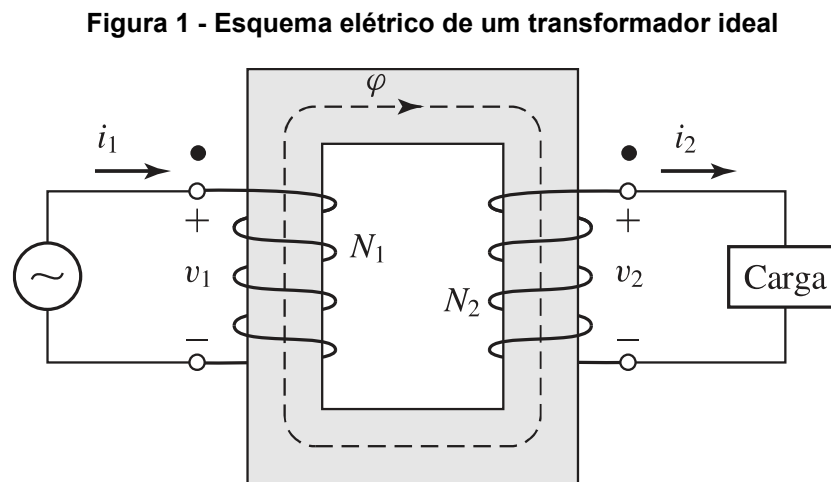
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Transformador

Um transformador é um dispositivo que tem a capacidade de elevar ou rebaixar um nível de tensão alternada, bem como a sua corrente, porém a frequência do sinal não é alterada. São construídos com dois ou mais enrolamentos, no caso de um transformador de dois enrolamentos pode-se descrever um como primário e o outro como secundário, onde o primário é conectado a fonte de corrente alternada e o secundário é conectado a carga. Esses dispositivos podem ser utilizados em diversas áreas da Engenharia Elétrica (BIM, 2012).

De maneira didática os transformadores são estudados na sua versão ideal, ou seja, onde as perdas, as resistências elétricas nos enrolamentos e as dispersões magnéticas são nulas, facilitando assim os cálculos (MARTIGNONI, 1969), porém no projeto de um transformador real é necessário levar em consideração todas essas características para um correto dimensionamento.

A Figura 1 mostra o esquema elétrico de um transformador ideal.



Fonte: Fitzgerald, (2014).

#### 2.1.1 Funcionamento

O transformador pode ter o seu funcionamento explicado com base nas leis de Faraday-Neumann-Lenz, onde ao aplicar uma variação no fluxo magnético através de um enrolamento de material condutor, uma corrente elétrica induzida vai surgir no outro enrolamento, ou seja, ao aplicar uma tensão elétrica alternada ( $v_1$ ) no

enrolamento primário um fluxo magnético ( $\varphi$ ) vai percorrer o material ferromagnético chamado de núcleo, e assim quando esse fluxo magnético ( $\varphi$ ) passar pelo enrolamento secundário a corrente elétrica ( $i_2$ ) será induzida, conforme mostra a Figura 1.

A lei de Faraday descreve que a tensão induzida ( $e_{ind}$ ) em uma bobina é igual a variação de fluxo concatenado ( $\lambda$ ) no tempo que passa através de cada espira da bobina, conforme a equação 1.

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

Uma bobina é constituída por  $N$  espiras, logo para um correto dimensionamento do fluxo concatenado ( $\lambda$ ) a fim de encontrar a tensão induzida ( $e_{ind}$ ) na bobina, deve-se elaborar uma somatória do fluxo individual ( $\phi_i$ ) de cada espira, conforme a equação 2.

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

Devido cada fluxo individual possuir certa discrepância em seus valores, é necessário utilizar um valor médio ( $\phi_{med}$ ) para minimizar os erros, conforme a equação 3.

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

Assim é possível reescrever a lei de Faraday conforme a equação 4.

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

Os transformadores possuem uma relação de transformação, essa característica é um coeficiente que mostra o quanto a tensão será elevada ou rebaixada dependendo do seu uso. A relação de transformação pode ser encontrada

dividindo a tensão no primário ( $V_{prim}$ ) pela tensão no secundário ( $V_{sec}$ ) ou ainda dividindo o número de espiras do primário ( $N_{prim}$ ) pelo número de espiras do secundário ( $N_{sec}$ ).

A relação de transformação ( $a$ ) nos diz o quanto o transformador eleva ou rebaixa a tensão, pois para saber a tensão do secundário basta dividir a tensão do primário por essa relação, que é descrita conforme a equação 5.

$$a = \frac{V_{prim}}{V_{sec}} = \frac{N_{prim}}{N_{sec}} \quad (5)$$

### 2.1.2 Núcleo

O transformador utiliza um material ferromagnético chamado de núcleo, o funcionamento de um transformador requer apenas de um fluxo variável no tempo e que seja mútuo entre as bobinas, esse efeito é garantido pelo acoplamento magnético que o núcleo faz. Esse acoplamento se torna muito eficiente quando o núcleo é de ferro ou de algum material ferromagnético, pois por possuir alta permeabilidade magnética a maior parte do fluxo magnético produzido pelas bobinas fica confinado no núcleo, enlaçando assim ambos os enrolamentos. A eficiência do transformador pode ainda ser aumentada quando o núcleo seccionado em finas chapas desse material ferromagnético que são empilhadas com o isolamento de uma fina camada que pode ser de oxido, esmalte ou verniz, garantindo assim uma expressiva redução nas perdas causadas por correntes parasitas no núcleo (FITZGERALD, 2014).

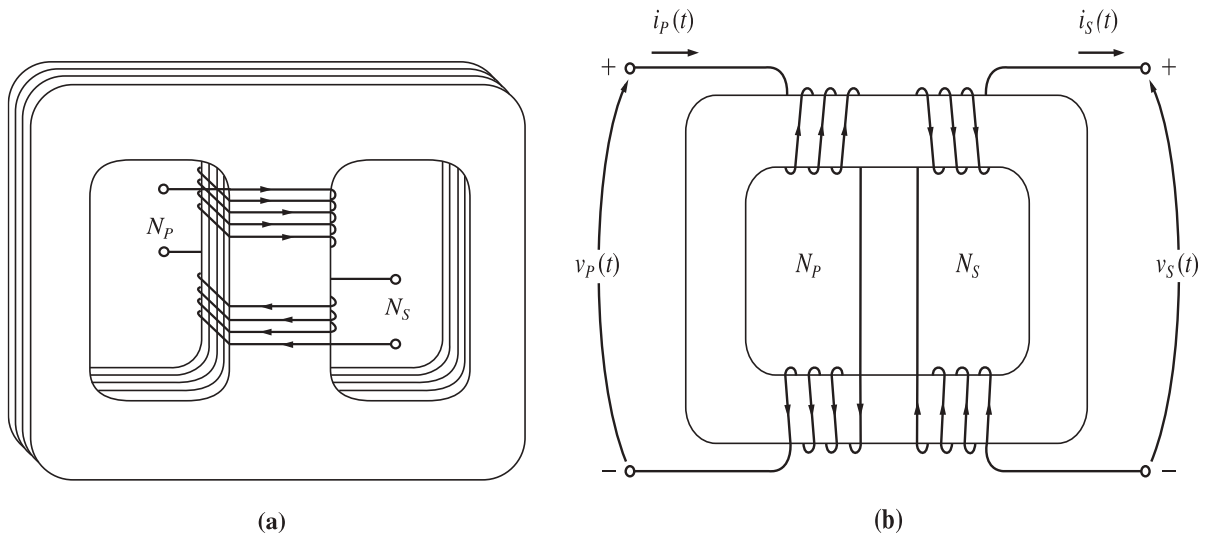
Os dois principais tipos de construção de um transformador são o tipo núcleo envolvido e o tipo núcleo envolvente:

- Núcleo envolvido: os enrolamentos envolvem as duas pernas do núcleo como mostra a Figura 2.b, na configuração típica cada perna no núcleo é envolvida por metade das espiras de cada bobina, esse tipo de transformador é preferido em aplicações de alta tensão, pois facilita a solução do problema de isolamento.
- Núcleo envolvente: o núcleo é colocado ao redor das bobinas, e os dois enrolamentos envolvem apenas uma perna do núcleo como ilustrado na Figura 2.a, esse tipo de transformador é mais usado em transformadores de potência, pois esse tipo de núcleo proporciona uma

melhor proteção mecânica para núcleos expostos a correntes elevadas (DEL TORO, 1994).

A Figura 2 mostra como são construídos os diferentes tipos de núcleo.

**Figura 2 - Tipos de núcleo na construção de um transformador.**



Fonte: Chapman, (2013).

### 2.1.3 Enrolamentos

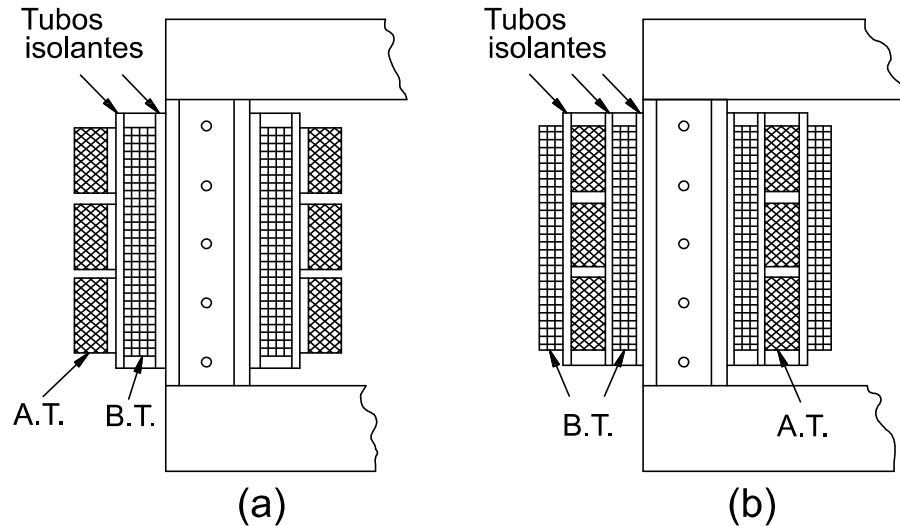
Ao elaborar um projeto de transformador é necessária uma atenção especial aos enrolamentos, pois esse componente é um dos mais importantes do dispositivo, a vida útil de um transformador está diretamente ligada aos seus enrolamentos (SALUSTIANO, 2012).

Os enrolamentos podem ser compostos por qualquer material condutor, a maioria dos transformadores utilizam fios de alumínio ou de cobre, esses condutores têm o formato normalmente de seção circular ou retangular dependendo da escolha do projetista. Cada enrolamento tem uma certa quantidade de voltas, e essa característica afeta diretamente na relação de transformação do transformador conforme visto na equação 5 (MORA, 2008).

A Figura 3 mostra a construção na forma concêntrica, onde os enrolamentos de alta tensão (A.T.) e baixa tensão (B.T.) são enrolados na mesma coluna e são separados por um material isolante, assim os enrolamentos tomam a forma apresentada na Figura 3.a.

A fim de diminuir consideravelmente a dispersão pode-se subdividir a fase de baixa tensão (B.T.) em dois solenoides conforme apresentado na Figura 3.b.

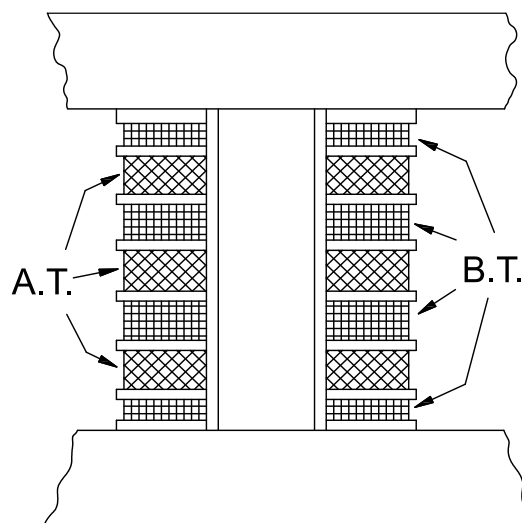
**Figura 3 - Enrolamentos concêntricos ou tubulares**



Fonte: Martignoni, (1969).

A Figura 4 mostra a construção na forma alternada, onde os enrolamentos são construídos com várias bobinas de comprimento axial pequeno (discos), onde os enrolamentos de alta tensão (A.T.) e baixa tensão (B.T.) são sobrepostos alternadamente. Esse método de construção é particularmente utilizado quando o núcleo é do tipo envolvente (MARTIGNONI, 1969).

**Figura 4 - Enrolamento com bobinas alternadas**



Fonte: Martignoni, (1969).

#### 2.1.4 Perdas

Ao estudar um transformador muitas vezes as perdas são desconsideradas por se tratar de um modelo ideal, porém ao projetar e implementar um transformador real deve-se levar em consideração as perdas que podem ocorrer em seu funcionamento, essas perdas estão divididas em **perdas no núcleo/ferro** e **perdas no cobre**, que ocorrem no material ferromagnético e nos condutores dos enrolamentos, respectivamente.

As **perdas no cobre** ( $P_{cu}$ ) ocorrem nos condutores que constituem os enrolamentos, surgem devido ao aquecimento resistivo e são proporcionais ao quadrado da corrente que circula no enrolamento. A equação 6 descreve as perdas no cobre em watts ( $W$ ).

$$P_{cu} = I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{S_a} = I^2 \cdot R \quad (6)$$

Na equação 6 as variáveis são descritas da seguinte forma:  $\rho$  é a resistividade do material condutor em ohms vezes metros ( $\Omega \cdot m$ ),  $l$  é o comprimento dos condutores em metros ( $m$ ),  $I$  a corrente que passa pelo condutor em amperes ( $A$ ), e  $S_a$  é a área da seção transversal do condutor em metros quadrados ( $m^2$ ). Com o valor das perdas em watts no cobre ( $P_{cu}$ ) e o valor da potência de saída do transformador ( $P_{out}$ ) também em watts, a regulação de tensão do transformador ( $\alpha$ ) pode ser encontrada, essa medida é dada em percentual (%) e representa a variação de tensão do transformador em plena carga em relação a sua tensão em vazio, essa relação é dada conforme a equação 7.

$$\alpha = \frac{P_{cu}}{P_{out}} \quad (7)$$

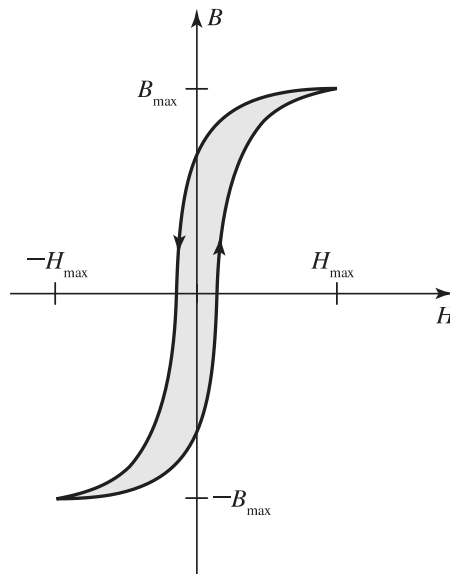
As **perdas no núcleo/ferro** ocorrem devido a indução de correntes parasitas e também pela histerese magnética. As correntes parasitas surgem devido ao material ferromagnético estar sujeito a uma variação de fluxo, assim correntes muito intensas serão induzidas no material causando então uma oposição ao fluxo magnético, assim constituindo as perdas de potência. Uma forma de minimizar essas perdas é construir



o núcleo com finas lâminas isoladas como citado anteriormente, visando assim minimizar ao máximo o caminho condutor que as correntes parasitas podem percorrer.

A histerese magnética ocorre toda vez que o núcleo começa o ciclo de magnetização, assim uma parte da energia é utilizada para realinhar os momentos magnéticos do material, a Figura 5 demonstra esse efeito graficamente onde podemos ver o ciclo de magnetização.

**Figura 5 - Curva de Histerese**



**Fonte: Fitzgerald, (2014).**

Esse efeito pode ser reduzido ao utilizar um material de alta permeabilidade magnética (MARTIGNONI, 1991). A equação 8 descreve as perdas no núcleo/ferro ( $P_{fe}$ ).

$$P_{fe} = K \cdot f^M \cdot B_m^N \cdot W_{tfe} \quad (8)$$

Onde  $W_{tfe}$  representa a massa do núcleo em quilogramas ( $Kg$ ), os coeficientes  $K$ ,  $M$  e  $N$  dependem diretamente do material em que o núcleo foi construído (valores disponibilizados pelo fabricante do material no *datasheet*),  $f$  é a frequência em hertz ( $Hz$ ) do sinal que vai alimentar o transformador, e  $B_m$  é a densidade do fluxo magnético em tesla ( $T$ ).

As perdas no núcleo/ferro, compreendem tanto a parcela ocasionada por correntes parasitas como as perdas por histerese magnética.

### 2.1.5 Rendimento

O rendimento de um transformador é definido pela relação entre a potência elétrica de saída ( $P_{out}$ ) e a potência de entrada ( $P_{in}$ ), no qual as perdas totais do transformador estão englobadas na potência de entrada.

A equação 9 demonstra essa relação, onde o rendimento ( $\eta$ ) é dado de maneira percentual (%), e  $P_{perdas}$  representa a soma das perdas citadas no item 2.1.4, ou seja, as perdas no cobre e as perdas no núcleo/ferro.

$$\eta = 100\% \times \frac{P_{out}}{P_{in}} = 100\% \times \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{perdas}} \quad (9)$$

## 2.2 Dimensionamento

Como existem diferentes formas de dimensionar um transformador e com base nas teorias estudadas no item 2.1 pode-se escolher os melhores métodos de implementação visando diminuir perdas e a facilidade na montagem. Para elaborar o projeto descrito nesse trabalho serão utilizadas lâminas de aço silício no formato “E-I”, onde os condutores de cobre esmaltado que constituem os enrolamentos tem seção circular e serão enrolados de forma concêntrica. O núcleo será do tipo envolvente, onde os enrolamentos primário e secundário serão enrolados na perna central do mesmo.

### 2.2.1 Núcleo

Visando um dimensionamento correto do núcleo do transformador é necessário levar em consideração os requisitos inicialmente estipulados para que o transformador atinja, primeiramente deve-se encontrar a constante das condições elétricas e magnéticas ( $K_e$ ), conforme a equação 10.

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

Com ela os valores de variáveis elétricas e magnéticas serão unificados para facilitar os cálculos. As variáveis que constituem a equação 10 são descritas abaixo:

- $K_f$ : diz respeito a forma de onda do sinal elétrico que será ligado ao transformador, onde o mesmo será puramente senoidal e sem a presença de harmônicas, simulando a rede elétrica trabalhando na forma esperada.
- $f$ : representa a frequência da rede em que o transformador será ligado e é dada em hertz ( $Hz$ ).
- $B_m$ : representa a indução magnética (ou como também chamado, a densidade de fluxo magnético citada na equação 8), esse valor é definido de acordo com o material a ser utilizado, cada fornecedor estipula os valores ideais de indução magnética que o material é melhor utilizado, pois se utilizarmos um valor muito baixo de indução magnética, o material está sendo subaproveitado e se usarmos uma indução muito alta o material vai saturar como mostrado anteriormente na Figura 5.

Com a constante das condições elétricas e magnéticas definida, é necessário definir a constante de geometria do núcleo ( $K_g$ ) conforme a equação 11.

$$K_g = \frac{P_t}{2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100} \quad (11)$$

Essa constante será importante para encontrar e dimensionar as lâminas com valores comerciais que vão constituir o núcleo.

- $P_t$ : representa a soma da potência de entrada ( $P_{in}$ ) com a potência de saída ( $P_{out}$ ) e é dada em watts ( $W$ ).
- A constante das condições elétricas e magnéticas  $K_e$ , é descrita conforme a equação 10.
- Deve ser estipulada uma regulação de tensão que é esperada que o transformador opere, na equação essa característica é representada pela variável  $\alpha$ .

### 2.2.2 Condutores

O dimensionamento da área da seção transversal dos condutores ocorre com base na densidade de corrente ( $J$ ), essa variável leva em consideração fatores

elétricos e geométricos pois o transformador deve suportar a potência para que foi projetado e todas as espiras devem caber na janela do núcleo. A equação 12 demonstra como a densidade de corrente ( $J$ ) é encontrada.

$$J = \frac{P_t \cdot 10^4}{K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p} \quad (12)$$

Algumas das variáveis utilizadas na equação 12 já foram descritas anteriormente ao obter os valores da constante das condições elétricas e magnéticas ( $K_e$ ) e da constante de geometria do núcleo ( $K_g$ ), equações 10 e 11, respectivamente.

- A variável  $K_u$  refere-se ao fator de utilização da janela do núcleo, e representa o quanto a área da janela ( $Wa$ ) será utilizada pelos condutores.
- Com as dimensões das lâminas definidas conforme os valores comerciais, é necessário utilizar o valor para o produto das áreas, representado pela variável  $A_p$ , valor obtido no *datasheet* das lâminas a serem utilizadas.

Definida a densidade de corrente ( $J$ ) pode-se encontrar as seções transversais dos condutores, a área da seção transversal do fio que vai compor o enrolamento primário é representada pela variável  $A_{prim}$ , e a área da seção transversal do condutor que irá compor o enrolamento secundário é representada pela variável  $A_{sec}$ , representadas pela equações 13 e 14, respectivamente.

$$A_{prim} = \frac{I_{in}}{J} \quad (13)$$

$$A_{sec} = \frac{I_{out}}{J} \quad (14)$$

Para um correto dimensionamento dos condutores é utilizada uma relação entre as correntes de entrada ( $I_{in}$ ) e saída ( $I_{out}$ ) do transformador e a densidade de corrente, para escolha do fio é utilizado um condutor comercial que tenha uma área igual ou maior ao valor calculado com base nas equações 13 e 14.

### 2.2.3 Enrolamentos

O número de voltas de cada enrolamento pode ser obtido através das equações 15 e 16, onde são utilizadas características elétricas e geométricas.

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} \quad (15)$$

$$N_s = \left( \frac{N_p \cdot V_{out}}{V_{in}} \right) \cdot (1 + \alpha) \quad (16)$$

Onde  $N_p$  é a quantidade de espiras do primário,  $N_s$  é a quantidade de espiras do secundário,  $V_{in}$  é a tensão de entrada (do primário),  $V_{out}$  é a tensão de saída (do secundário), e  $A_c$  é a área do núcleo/ferro. A regulação de tensão ( $\alpha$ ) do transformador tem influência direta no número de voltas do enrolamento secundário conforme mostra a equação 16.

### 2.2.4 Janela do Núcleo

Após a bitola dos fios e quantidade de espiras serem calculadas é necessário recalculá-lo o fator de utilização da janela ( $Ku_{novo}$ ), levando em conta os valores comerciais de seção transversal dos fios que foram escolhidos, essa etapa é importante para verificar se a janela do núcleo irá comportar todas as espiras que foram projetadas, para verificar essa condição é necessário calcular o fator de utilização para o primário ( $Ku_p$ ) e para o secundário ( $Ku_s$ ) individualmente como mostra as equações 17 e 18, respectivamente, e após isso é possível encontrar o fator de utilização geral do transformador somando os fatores de utilização do primário e do secundário, como mostra a equação 19.

$$Ku_p = \frac{N_p \cdot Aw_{pbnovo}}{W_a} \quad (17)$$

$$Ku_s = \frac{N_s \cdot Aw_{sbnovo}}{W_a} \quad (18)$$

$$Ku_{novo} = Ku_p + Ku_s \quad (19)$$

A variável  $Awpb_{novo}$  representa a área da seção transversal do condutor comercial a ser utilizado no primário, e a variável  $Awsb_{novo}$  corresponde a área da seção transversal do condutor comercial do secundário.

#### 2.2.5 Quantidade de Condutores

Uma vez projetado o número de voltas e a seção transversal dos condutores dos enrolamentos primário e secundário é necessário calcular o comprimento necessário de fio para se construir cada enrolamento, para realizar esse cálculo é utilizado o perímetro externo do carretel multiplicado pelo número total de voltas de cada enrolamento.

#### 2.2.6 Quantidade de Lâminas

Para calcular a quantidade de lâminas que serão necessárias para implementar o núcleo basta pegar a profundidade do núcleo e dividir pela espessura da lâmina comercial escolhida, para essa etapa o *datasheet* do fabricante das lâminas é de grande importância pois um dimensionamento incorreto pode impactar na falta de lâminas para compor o núcleo, ou na sobra de material que acaba se tornando desperdício.

### 3 DESENVOLVIMENTO

O processo para o projeto de um transformador deve primeiramente partir dos requisitos que o mesmo precisa atingir, assim após elaborar um algoritmo para simular e calcular as dimensões dos materiais necessários é feita a sua implementação. Com o algoritmo também é possível obter informações da operação que o transformador vai atingir. Esse capítulo descreve os resultados das simulações e as etapas da implementação.

#### 3.1 Projeto do transformador

O transformador deve atingir os requisitos descritos na Tabela 1.

**Tabela 1 - Requisitos iniciais**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Formato do Núcleo	E-I
Material do Núcleo	Aço Silício
Tensão no Primário (V)	127
Tensão no Secundário (V)	100
Potência (W)	500
Frequência da Rede (Hz)	50
Forma de onda da Rede	Senoidal
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

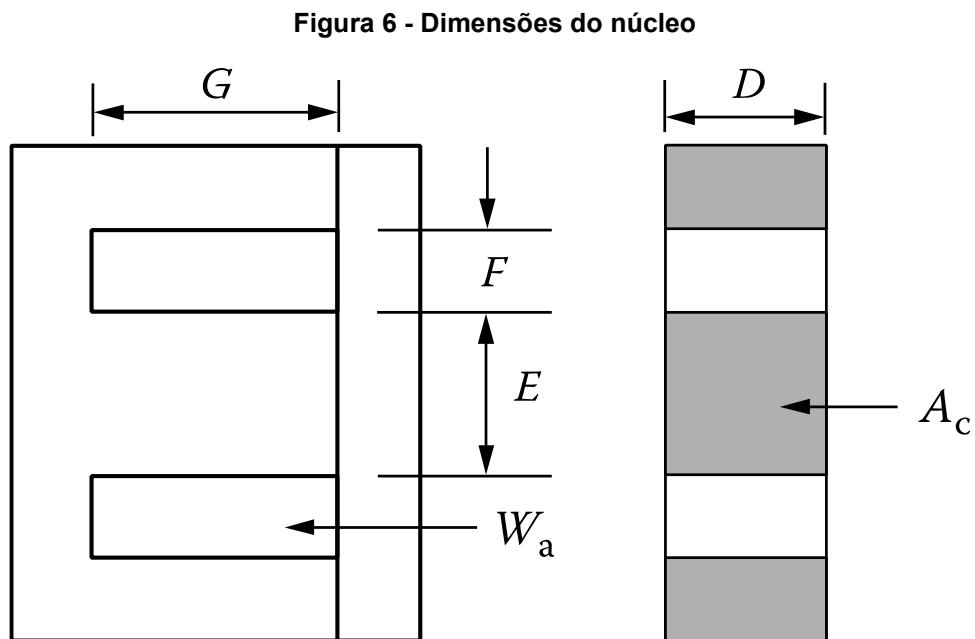
**Fonte: Autoria própria (2022).**

A maioria dos transformadores comerciais costuma ter um rendimento bem elevado, em média ele varia de 94% a 96% (NÚCLEO ATS, 2022). Para nosso projeto estipulamos um rendimento de 95%, para que o protótipo esteja dentro dos padrões comerciais.

A regulação de tensão varia muito com a aplicação do transformador, pois ela deve ser estipulada baseando-se no quanto a carga é sensível à variações de tensão, para nosso projeto estipulamos o valor de 5%, vale ressaltar que quando essa carga for predominantemente indutiva ou resistiva a tensão nos terminais do secundário será menor do que a tensão de circuito aberto, e quando a carga for predominantemente capacitiva a tensão no secundário será maior do que a tensão de circuito aberto (PINTO, 2022).

Definidos os requisitos iniciais é necessário efetuar a simulação no algoritmo desenvolvido para obter as dimensões das lâminas “E-I” comerciais que devem ser adquiridas, o algoritmo dimensiona essas características com base na teoria e nas equações descritas no capítulo 2.2.

Na Figura 6 pode ser observada a geometria do núcleo.



Fonte: Mcllyman (2011).

Com os valores dos requisitos iniciais introduzidos no algoritmo são feitas simulações para obter valores construtivos, como o número de espiras nos enrolamentos, a seção transversal dos condutores, a quantidade e o tamanho das lâminas que constituirão o núcleo.



O algoritmo desenvolvido foi executado no *software* MATLAB® e a Tabela 2 demonstra os resultados da simulação.

**Tabela 2 - Resultados construtivos**

<b>Símbolo</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
D	Dimensão D da lâmina	5,7150	cm
E	Dimensão E da lâmina	5,7150	cm
F	Dimensão F da lâmina	2,8580	cm
G	Dimensão G da lâmina	8,5730	cm
$N_p$	Número de espiras do primário	153,6440	-
$N_s$	Número de espiras do secundário	127,0285	-
$A_{wgp}$	Fio primário	13	AWG
$A_{wgs}$	Fio secundário	12	AWG
$Q_{lam}$	Quantidade de lâminas	115	un.
$Q_{fiop}$	Quantidade de fio primário	71	m
$Q_{fios}$	Quantidade de fio secundário	59	m

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Após esse dimensionamento foi possível fazer a compra dos materiais necessários para implementar o transformador, como chapas de material MDF para a construção do carretel, os fios que constituem os enrolamentos, as lâminas de material ferromagnético (aço silício) para construir o núcleo, entre outros componentes.

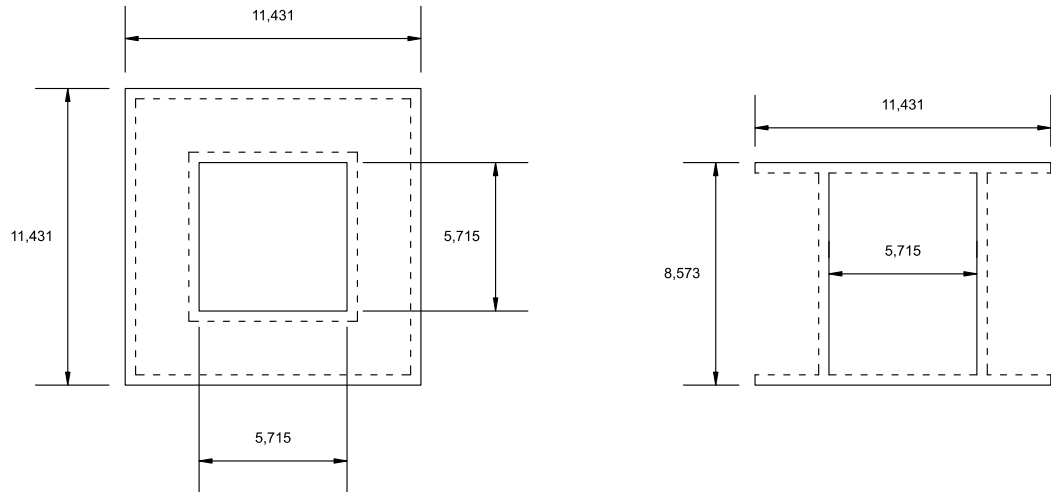
### 3.1.1 Carretel

Para elaborar a montagem do transformador foi necessária a construção de um carretel, esse componente permite que os enrolamentos sejam enrolados sem o contato direto com o núcleo, facilitando a montagem pois assim os fios podem ser enrolados antes de se empilhar as chapas que compõem o núcleo.

O dimensionamento começa levando em consideração as dimensões das lâminas que constituem o núcleo, onde os valores estão disponíveis no *datasheet* disponibilizado pelo fornecedor. O algoritmo retorna esses valores conforme o modelo da lâmina dimensionada.

A Figura 7 demonstra o dimensionamento, o carretel deve ter dimensões conforme as lâminas para que a perna central do núcleo tenha o encaixe correto.

**Figura 7 - Dimensionamento do carretel**

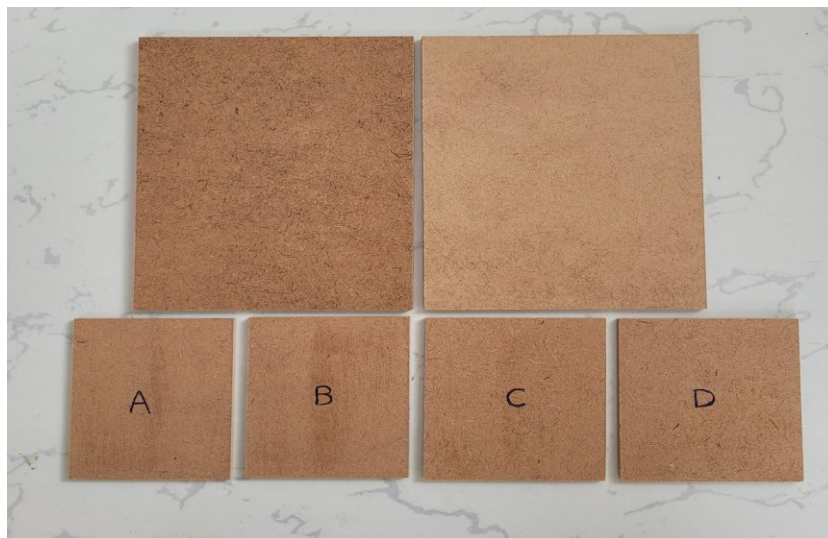


**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Com as dimensões definidas foi necessária a compra de chapas de MDF, o material foi escolhido por ser isolante, pela facilidade em se realizar cortes e também no caso de algum problema no momento do encaixe das lâminas pode ser feita a utilização de uma lixa para facilitar esse processo. As chapas foram cortadas com a utilização de uma serra conforme as medidas apresentadas na Figura 7.

O resultado dos cortes das lâminas de MDF está demonstrado na Figura 8.

**Figura 8 - Lâminas de material MDF**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

A montagem das lâminas de material MDF foi feita com a utilização de cola para madeira, foi cortado um pedaço de madeira com as mesmas dimensões do núcleo visando facilitar a montagem do carretel e para mais tarde dar mais firmeza para o carretel na hora de se enrolar os fios, para a colagem das chapas também foram utilizadas cintas plásticas para manter um aperto entre as partes até que a cola secasse, como podemos ver na Figura 9.

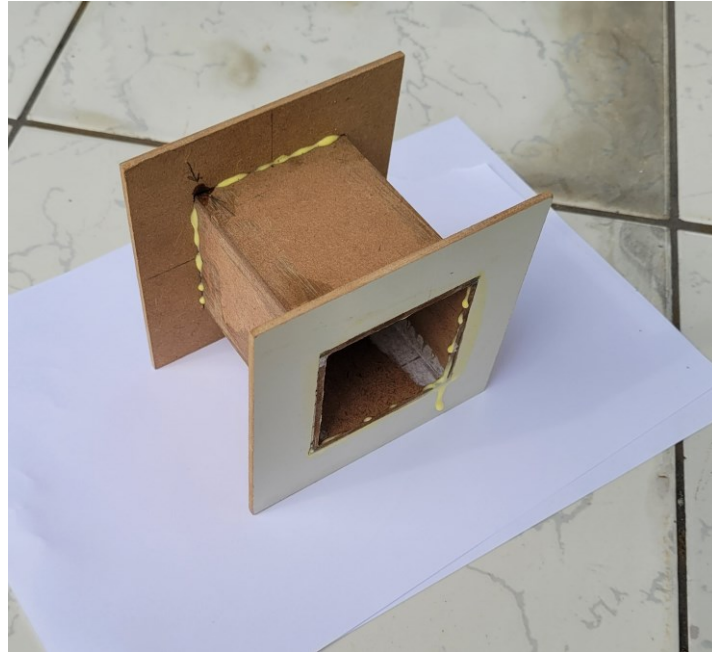
**Figura 9 - Montagem do carretel I**



Fonte: Autoria própria, (2022).

Após montar todas as peças foi necessário aguardar a secagem completa para não ocorrer problemas na hora de enrolar os fios, conforme a Figura 10.

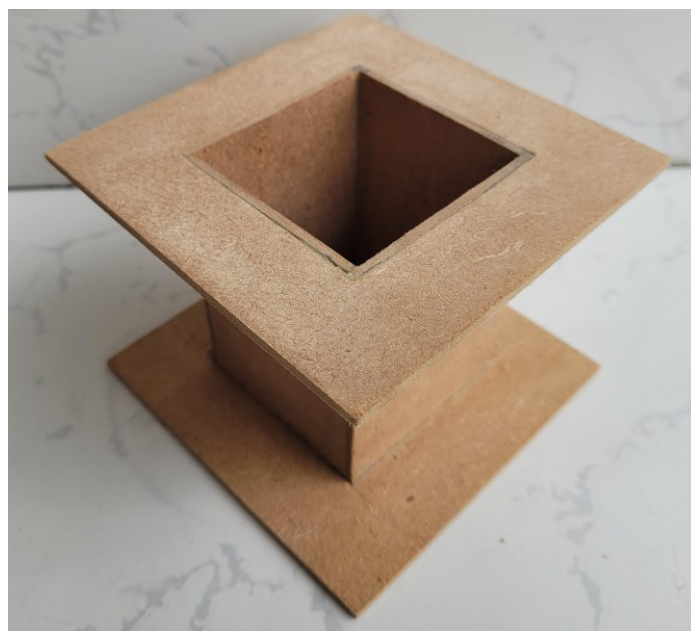
**Figura 10 - Montagem do carretel II**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Após todo o processo de montagem, secagem e testes para verificar a sua resistência o resultado final do carretel pode ser verificado na Figura 11.

**Figura 11 - Resultado final do carretel**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

### 3.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos foram construídos com fios de cobre esmaltado, devido o transformador possuir dois enrolamentos foram utilizadas duas seções transversais diferentes, conforme Figura 12.

**Figura 12 - Fios de cobre esmaltado**

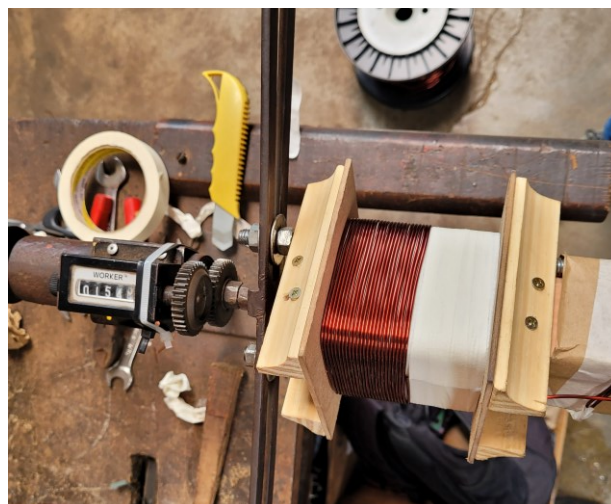


**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Para facilitar a montagem foi utilizada uma “bobinadeira” manual que gentilmente foi cedida pela empresa JL Eléctro Técnica na cidade de Francisco Beltrão - PR. O carretel é fixado na “bobinadeira” por meio de parafusos, e para não ocorrer nenhum problema na montagem foram utilizadas cantoneiras de madeira para garantir que o carretel não desmontasse ou entortasse.

A cada volta de fio que é enrolado no carretel uma volta é incrementada no contador analógico conforme a Figura 13.

**Figura 13 - Montagem dos enrolamentos I**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

O enrolamento primário conta com 154 voltas e fio 13 AWG, ao final das voltas necessárias para constituir o enrolamento primário foi passada uma fita isolante a fim de prevenir qualquer problema de isolação no fio de cobre esmaltado. A Figura 14 demonstra a finalização do enrolamento primário.

**Figura 14 - Enrolamento primário finalizado**



Fonte: Autoria própria, (2022).

O mesmo processo foi realizado para a construção do enrolamento secundário, porém foram feitas 128 voltas com fio 12 AWG, ao final das voltas uma nova camada de fita isolante foi passada para melhorar o acabamento e prevenir qualquer problema de isolação, conforme a Figura 15.

**Figura 15 - Secundário finalizado**

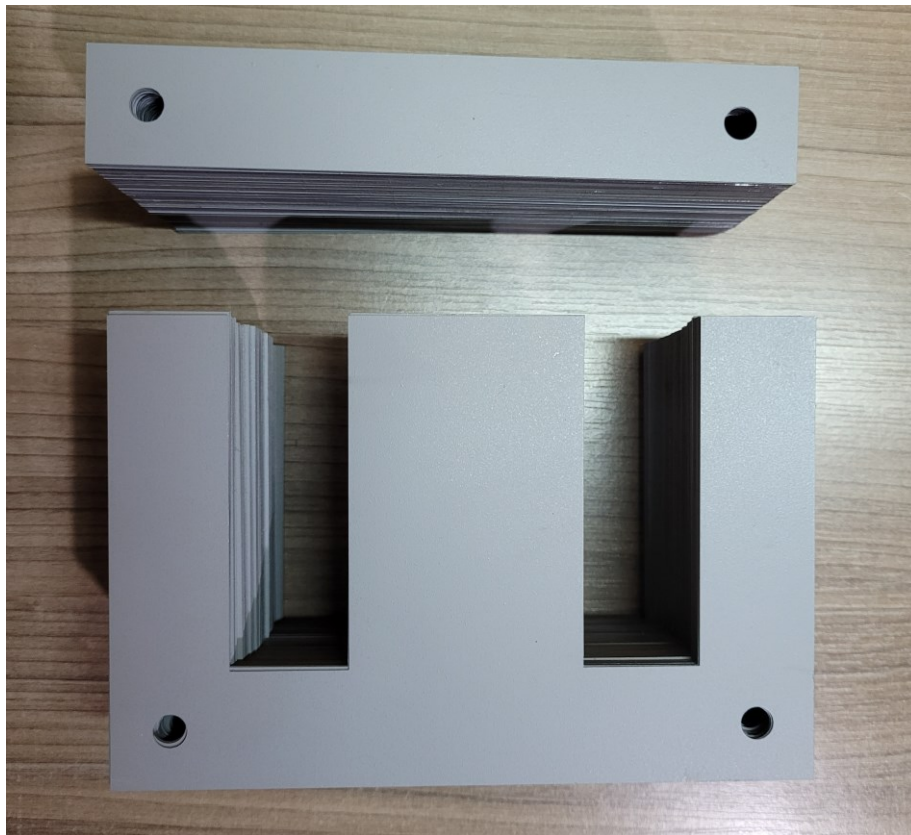


Fonte: Autoria própria, (2022).

### 3.1.3 Núcleo

Para a construção do núcleo foram utilizadas 115 lâminas de aço silício, onde foram utilizadas lâminas no formato “E-I”. A montagem começa colocando uma lâmina “E” e logo após outra de mesmo formato ao contrário e assim sucessivamente, é aconselhável que durante essa montagem as lâminas de formato “I” já sejam encaixadas para facilitar a montagem e evitar riscos na sua camada de tinta isolante. A Figura 16 mostra as lâminas adquiridas.

**Figura 16 - Lâminas de aço silício**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Após todo o processo de montagem descrito acima, foram utilizados parafusos, conforme a Figura 17, para melhorar a fixação e diminuir ao máximo a distância entre as lâminas e a vibração do transformador.

**Figura 17 - Parafusos do núcleo**

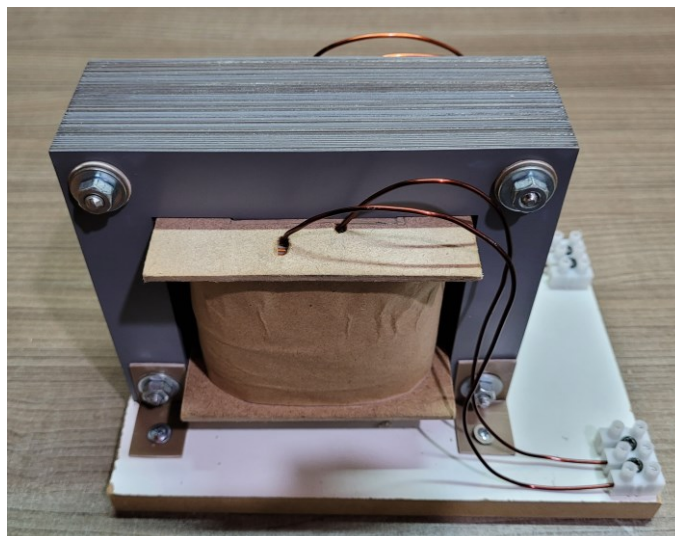


Fonte: Autoria própria, (2022).

#### 3.1.4 Implementação e resultado final

O resultado final da implementação do transformador está demonstrado na Figura 18 e Figura 19, foram utilizados terminais elétricos para facilitar os testes e melhorar o acabamento.

**Figura 18 - Resultado da implementação do transformador I**

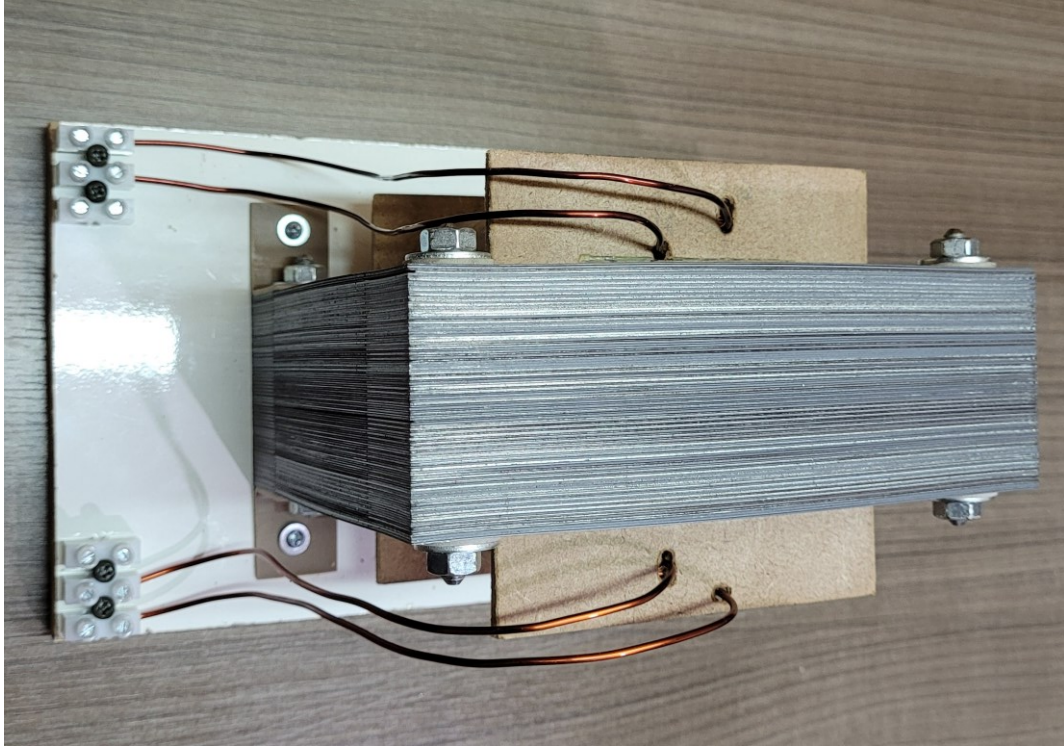


Fonte: Autoria própria, (2022).



Uma base de madeira foi implementada para melhorar o acabamento e impedir o contato do núcleo ferromagnético com qualquer superfície que possa interferir nos resultados.

**Figura 19 - Resultado da implementação do transformador II**



Fonte: Autoria própria, (2022).

## 4 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E CUSTOS

Nesse capítulo são demonstradas as simulações e testes feitos para validar o protótipo implementado. As simulações foram feitas diretamente no algoritmo e os testes foram elaborados no laboratório de Máquinas Elétricas do Bloco I (sala I001) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Pato Branco.

### 4.1 Simulações

Foram feitas simulações para validar o correto dimensionamento do transformador, o próprio algoritmo retorna valores de operação que o mesmo deve atingir e se o dimensionamento está dentro do aceitável com base nos requisitos iniciais, os resultados podem ser verificados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Resultados das simulações**

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Descrição</b>
$\alpha_{calc}$	2,21	%	Regulação
$Rend_{calc}$	96,99	%	Rendimento
$Tr_{calc}$	13,56	°C	Elevação de temperatura
$Ku_{novo}$	30	%	Fator de utilização da janela

Fonte: Autoria própria, (2022).

Com base nos resultados verificados na Tabela 3 pode-se afirmar que o transformador foi projetado corretamente, uma comparação com os requisitos iniciais descritos na Tabela 1 mostra uma regulação de tensão de 2,21%, resultado menor que o estipulado inicialmente de 5%, essa característica idealmente tem de ser nula mas como se trata de um transformador real esse valor não pode ser nulo, logo uma regulação menor que a estipulada inicialmente é uma característica benéfica. O rendimento do transformador de 96,99% se mostra maior que o estipulado no início do projeto que era de 95%, outra característica que sai melhor que o esperado. A elevação de temperatura 13,56 °C é menor que a meta de 55 °C indicando que o transformador terá melhor desempenho e sofrerá menos aquecimento. O fator de utilização de janela 30% é menor que a meta 40% mostrando que os enrolamentos caberão na janela do núcleo.

Inicialmente com as simulações feitas verifica-se o correto dimensionamento do transformador, porém deve-se levar em consideração que os resultados dos testes

podem vir a divergir do esperado por se tratar de medições reais, onde até os equipamentos de medição podem causar certa discrepância de valores, logo certa diferença é esperada.

O intuito deste trabalho de conclusão de curso é demonstrar os conhecimentos obtidos durante a graduação para implementar e realizar testes em um protótipo real visando comprovar o seu bom funcionamento. Um transformador possui vários testes possíveis, porém devido ao tempo escasso e principalmente a falta de alguns equipamentos e uma instrumentação de medidas elétricas com escala adequada e precisa alguns testes não foram elaborados, como por exemplo, o levantamento do circuito equivalente e a sua análise, porém esses testes são amplamente discutidos em disciplinas de análise de circuitos e máquinas elétricas realizadas no curso de Engenharia Elétrica.

## 4.2 Resultados

Para a realização dos testes e medições primeiramente foi criado um roteiro, onde o transformador foi testado para verificar erros na sua construção, inicialmente foi feito o teste de continuidade, e posteriormente foi montada uma bancada para operar em 50 hertz.

### 4.2.1 Teste de continuidade

O teste de continuidade é importante para verificar se durante a implementação os fios de cobre esmaltado que constituem os enrolamentos não sofreram nenhuma avaria na sua isolação causando algum curto circuito interno no transformador. Este teste também permite verificar o rompimento do fio.

**Tabela 4 - Resultados do teste de continuidade**

<b>Teste</b>	<b>Continuidade</b>
Primário com Primário	Sim
Primário com Secundário	Não
Primário com Carcaça	Não
Secundário com Secundário	Sim
Secundário com Carcaça	Não

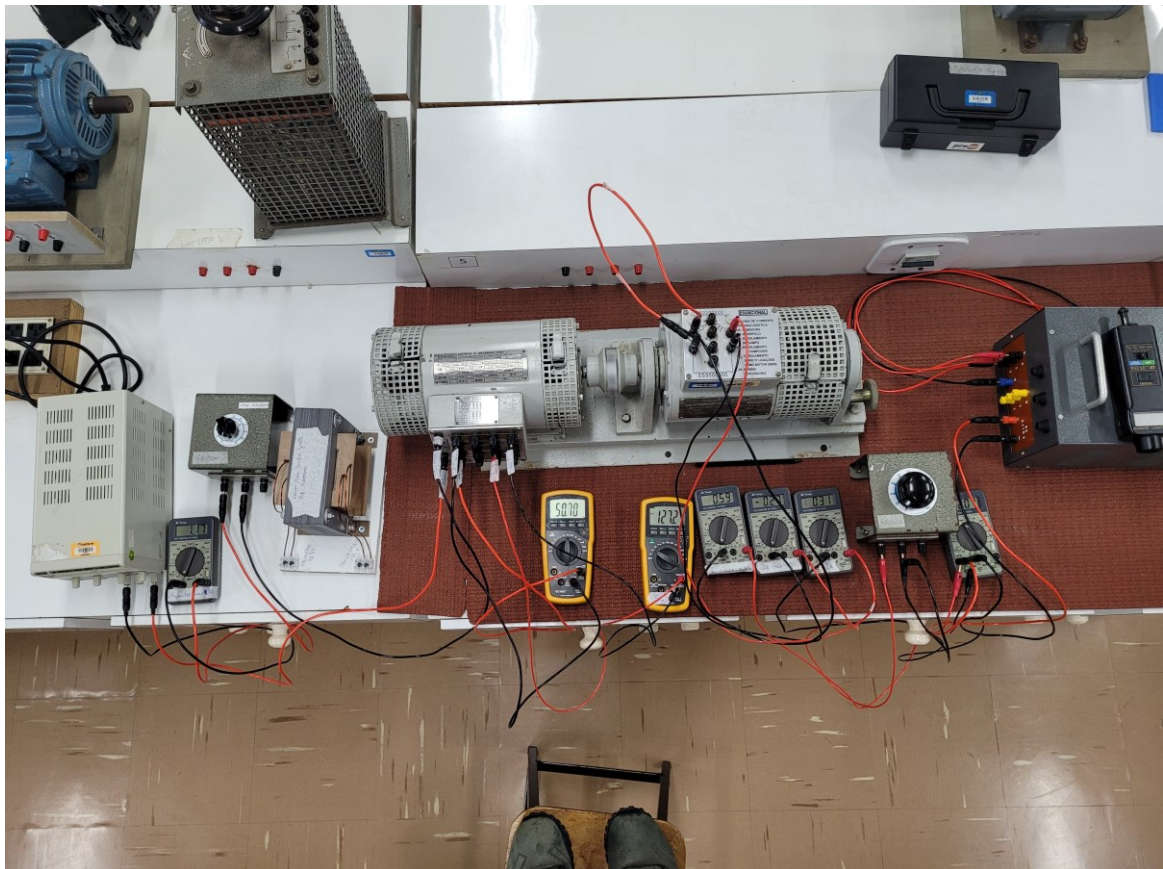
**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Com base na Tabela 4 verifica-se que não há curto circuito entre os enrolamentos bem como os enrolamentos e o núcleo, logo a isolamento do fio e do carretel estão dentro do esperado. Observa-se também que não ocorreu rompimento dos fios.

#### 4.2.2 Bancada

No laboratório de Máquinas Elétricas do Bloco I (sala I001) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Pato Branco existem vários equipamentos didáticos para realização de testes, devido a rede disponível no laboratório operar em 60 hertz foi necessária a ligação de equipamentos em bancada para obter uma rede operando em 50 hertz, conforme a Figura 20.

**Figura 20 - Bancada para a realização dos testes**



**Fonte: Autoria própria, (2022).**

Para se conseguir uma onda senoidal pura e com frequência de 50 hertz foi necessário utilizar os seguintes equipamentos: um motor de corrente contínua (CC), um gerador síncrono, duas fontes CC e dois reostatos. O procedimento consistiu em controlar a velocidade do motor CC até se obter uma frequência de 50 hertz no

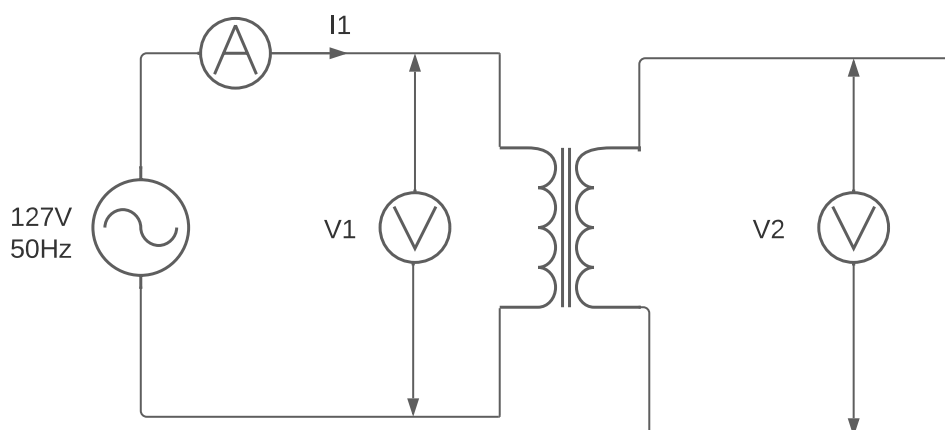
gerador síncrono, esse ajuste era feito controlando a tensão da fonte CC que alimentava o motor CC, e o ajuste fino era feito alterando a resistência do reostato ligado em série com motor CC e a fonte CC. Após conseguirmos regular a velocidade do conjunto de modo que a frequência no gerador síncrono era de 50 hertz, foi necessário ajustar a tensão e corrente no enrolamento de campo do gerador síncrono de modo a se obter uma tensão de 127 volts no enrolamento de armadura, esse ajuste foi feito com a outra fonte CC que alimentava o enrolamento de campo do gerador síncrono, e o ajuste fino foi feito variando a resistência do reostato ligado em série com o enrolamento de campo do gerador síncrono e a fonte CC. Na Figura 20 podemos ver o conjunto de equipamentos montados e ajustados para se obter uma rede de 127 volts com frequência de 50 hertz no enrolamento de armadura do gerador síncrono.

#### 4.2.3 Ensaio de circuito aberto no secundário

Esse teste permite mostrar se o transformador está realizando a transformação de maneira satisfatória, os bornes do enrolamento secundário são deixados em aberto e a fonte é ligada no enrolamento primário, a tensão deve seguir uma relação de transformação de  $a = 1,27$ .

O esquema elétrico do teste realizado está disposto na Figura 21, foram utilizados amperímetros e multímetros para medir as grandezas elétricas, bem como o cabeamento adequado para realizar os testes.

**Figura 21 - Esquema elétrico do teste de circuito aberto no secundário**



Fonte: Autoria própria, (2022).

Os resultados do teste estão dispostos na Tabela 5, onde é possível verificar uma tensão de saída no secundário de 105,8 volts, que está dentro do esperado conforme a regulação de tensão que o transformador opera e foi projetado. O transformador foi projetado para entregar 100 volts no secundário, porém essa discrepância de 5,8 volts na tensão de saída é algo normal e esperado, se tornando algo benéfico pois com uma corrente de plena carga passando pelo enrolamento secundário a tensão tende a diminuir, logo o transformador entregaria uma tensão bem próxima dos 100 volts quando estivesse em plena carga (com uma corrente de cinco amperes no secundário).

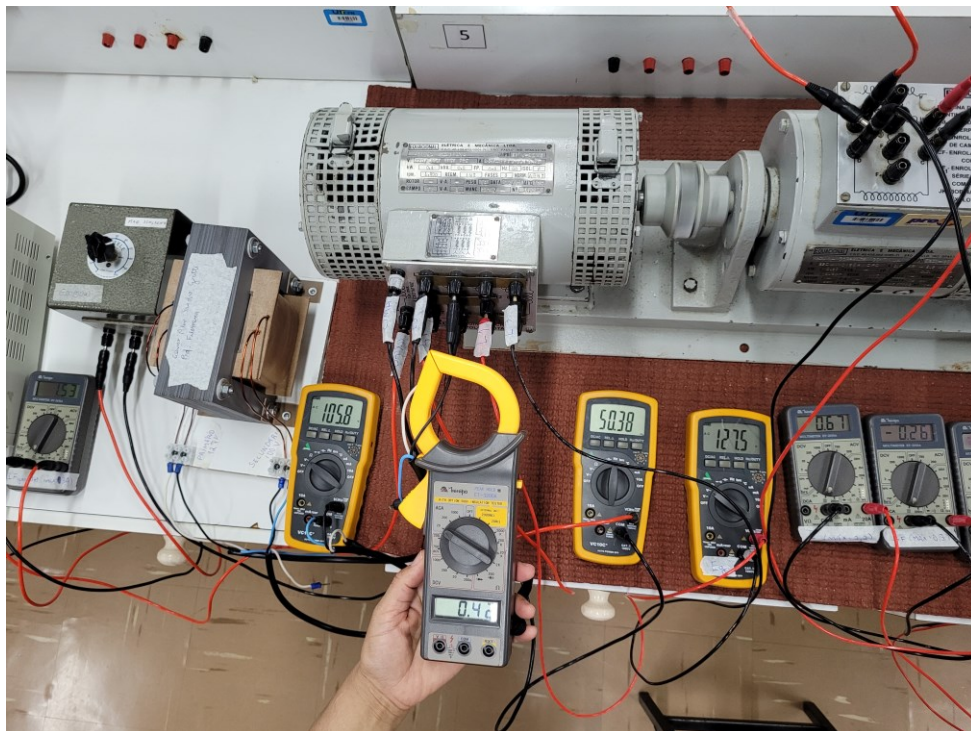
**Tabela 5 - Resultados do teste de circuito aberto no secundário**

Parâmetro	Valor
Tensão no primário $V_1(V)$	127,5
Corrente no primário $I_1(A)$	0,42
Tensão no secundário $V_2(V)$	105,8

Fonte: Autoria própria, (2022).

O teste pode ser comprovado conforme a Figura 22.

**Figura 22 - Ensaio de circuito aberto no secundário**



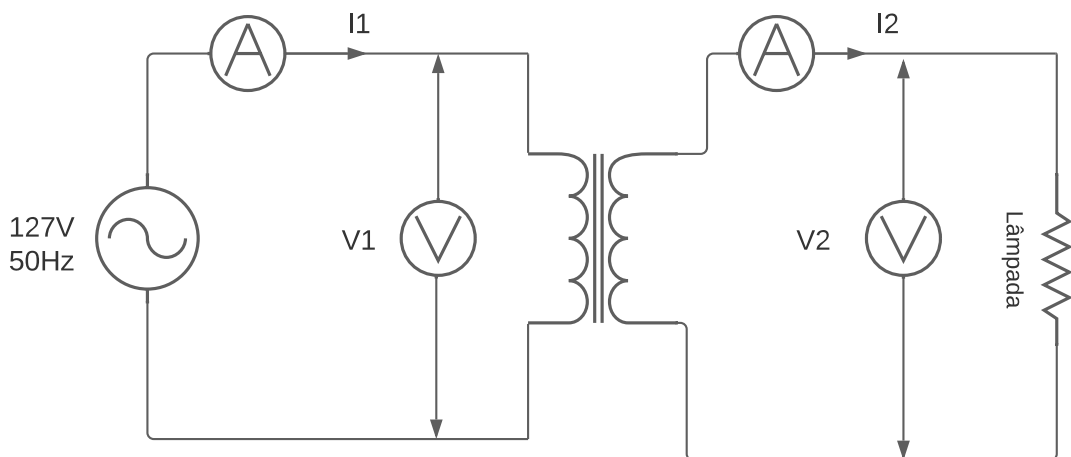
Fonte: Autoria própria, (2022).

#### 4.2.4 Ensaio com carga resistiva

Para realizar o teste com carga resistiva foi utilizada uma lâmpada com potência de 100 watts e tensão de operação em 127 volts, esse dispositivo foi escolhido devido a sua baixa corrente de operação, pois ao ligar uma carga que demandasse uma corrente maior os equipamentos que foram ligados para obter a rede em 50 hertz também demandariam uma alta corrente, ultrapassando limites do motor CC e do gerador síncrono utilizado.

O esquema elétrico do teste realizado está disposto na Figura 23, foram utilizados amperímetros e multímetros para medir as grandezas elétricas, bem como o cabeamento adequado para realizar os testes, e a carga é uma lâmpada.

**Figura 23 - Esquema elétrico do teste com carga resistiva**



Fonte: Autoria própria, (2022).

Na Tabela 6 é possível verificar os resultados de como o transformador se comportou ao ligar uma carga resistiva.

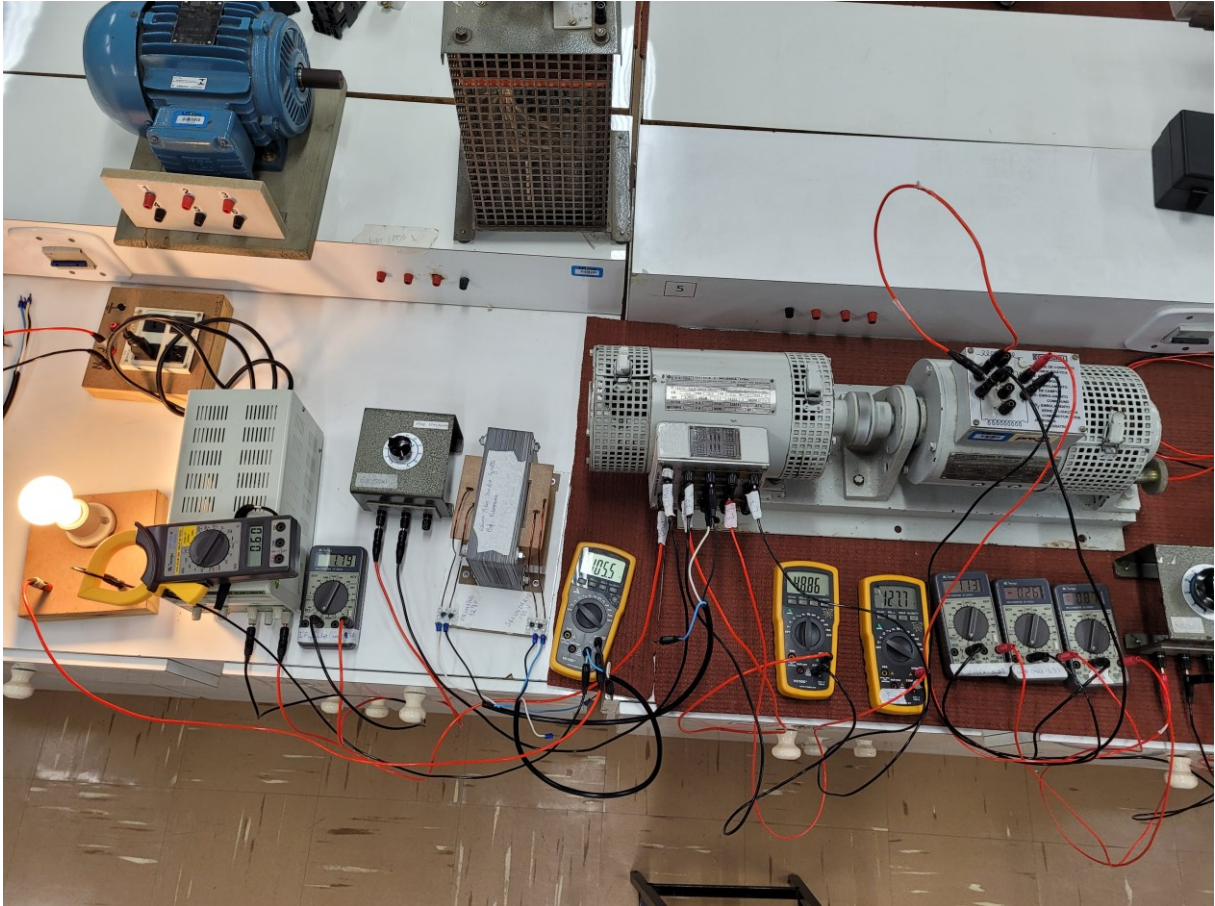
**Tabela 6 - Resultados do ensaio com carga resistiva**

Parâmetro	Valor
Tensão no primário $V_1(V)$	127,7
Corrente no primário $I_1(A)$	0,7
Tensão no secundário $V_2(V)$	105,5
Corrente no secundário $I_2(A)$	0,6

Fonte: Autoria própria, (2022).

A Figura 24 mostra os equipamentos montados para o ensaio com a lâmpada ligada no secundário do transformador bem como as medições realizadas.

**Figura 24 - Ensaio com carga resistiva**



**Fonte: Aatoria própria, (2022).**

Para comprovar de maneira satisfatória a operação do transformador seria necessário fazer que a carga ligada ao mesmo atingisse a corrente de plena carga estipulada no secundário, porém devido as limitações dos equipamentos disponíveis na bancada que fornece a rede de 50 hertz infelizmente esse procedimento não foi possível, porém com base nas simulações disponíveis no algoritmo o transformador não teria problemas para operar em plena carga.



### 4.3 Custos

A implementação do transformador demandou a compra de equipamentos e materiais necessários para a sua construção, a Tabela 7 tem a relação dos itens necessários, valores e fornecedores.

**Tabela 7 - Custos**

<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Fornecedor</b>
Lâminas de Aço Silício	R\$ 625,00	Flessak
Fios de Cobre Esmaltado	R\$ 327,00	Eletromatel
Conectores	R\$ 18,20	Flessak
Parafusos e Arruelas	R\$ 7,20	Paiol Materiais de Construção
Fita	R\$ 5,25	Livraria Fonte Nova
Lixas	R\$ 6,00	Paiol Materiais de Construção
Cola	R\$ 7,00	Paiol Materiais de Construção
Chapas de MDF	R\$ 15,00	Andará Moveis
Papel isolante	R\$ 4,20	Papelaria Fonte Nova
<b>Total</b>	<b>R\$ 1.014,85</b>	-

Fonte: Autoria própria, (2022).

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÕES

Será apresentada uma análise comparativa entre o transformador projetado para operar em uma rede de 50 hertz implementado neste trabalho e o transformador projetado para operar em uma rede de 60 hertz implementado por (PINTO, 2022). Os dois transformadores foram projetados para uma tensão de 127 volts na entrada, 100 volts na saída, e uma corrente de saída de cinco amperes.

### 5.1 Dimensões e quantidade das lâminas

Os dois protótipos em questão utilizaram a metodologia que leva em consideração a geometria do núcleo para projetar as características construtivas do transformador, portanto ao rearranjar as variáveis das equações 10 e 11 podemos representar a constante de geometria do núcleo em função da frequência elétrica como mostra a equação 20.

$$K_g = \frac{P_t}{K_f^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot \alpha \cdot 29 \cdot 10^{-4}} \quad (20)$$

Dessa forma vemos que ao diminuirmos a frequência a constante de geometria do núcleo aumenta, ou seja, precisamos de um núcleo que tenha uma área maior, logo as chapas terão que ter dimensões maiores, e como essa metodologia de projeto dimensiona a profundidade do núcleo (medida “D” da Figura 6 ) com a mesma medida da largura da perna central (medida “E” da Figura 6), a quantidade de chapas também aumenta visto que ambos os protótipos utilizaram chapas com espessura de 0,5 mm. Na Tabela 8 podemos ver com mais detalhes a diferença nas dimensões e na quantidade de chapas dos dois transformadores implementados.

**Tabela 8 - Comparação do núcleo de cada transformador**

Parâmetro	Transformador em 60	Transformador em 50
	Hz	Hz
D (cm)	4,445	5,715
E (cm)	4,445	5,715
F (cm)	2,223	2,858
G (cm)	6,668	8,573
Quantidade de chapas	89	115

Fonte: Autoria própria, (2022).

## 5.2 Espiras e seção dos condutores

Para se calcular a quantidade de espiras no enrolamento primário é utilizada a equação 15 apresentada anteriormente, podemos reescrevê-la isolando a densidade do fluxo magnético ( $B_m$ ), como mostra a equação 21.

$$B_m = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot N_p \cdot f \cdot A_c} \quad (21)$$

Analisando a equação 21 podemos notar que os parâmetros que mudam de um transformador para o outro são a frequência elétrica que diminui de 60 para 50 hertz (-16,7%), e como citado no item 5.1 a área do núcleo aumenta, esse aumento é de 18,77 para 31,028 cm<sup>2</sup> (+65,3%), ou seja, o produto dessas duas grandezas aumenta em 37,8% do transformador de 60 hertz para o transformador de 50 hertz, dessa forma a quantidade de espiras no primário do transformador de 50 hertz deve diminuir também em 37,8% para que a densidade de fluxo magnético seja a mesma para os dois transformadores visto ambos utilizam aço silício em seu núcleo. Já a quantidade de espiras para o enrolamento secundário segue a equação 16 apresentada anteriormente, nela podemos notar que o único parâmetro que é alterado é a quantidade de espiras do primário, portanto da mesma forma como no primário, a quantidade de espiras do secundário do transformador de 50 hertz deve ser diminuída em 37,8% em relação a quantidade de espiras do secundário do transformador de 60 hertz.

O cálculo da seção transversal dos fios do primário e secundário seguem as equações 13 e 14, podemos reescrever essas equações substituindo a densidade de corrente apresentada na equação 12, com isso obtemos a equação 22 que corresponde a área da seção do fio a ser utilizado no primário, e a equação 23 que representa a área da seção do fio a ser utilizado no secundário do transformador.

$$A_{prim} = \frac{I_{in} \cdot K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p}{P_t \cdot 10^4} \quad (22)$$

$$A_{sec} = \frac{I_{out} \cdot K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p}{P_t \cdot 10^4} \quad (23)$$

Analisando as equações 22 e 23 podemos notar que os únicos parâmetros que variam do transformador de 60 hertz para o transformador de 50 hertz são a frequência, que como citado anteriormente reduz 16,7% e o produto das áreas ( $A_p$ ) que muda de 278,145 para 760,064 cm<sup>4</sup> (+173,3%), dessa forma a área da seção dos fios do transformador projetado para operar em 50 hertz devem aumentar em 127,7% em relação a área da seção dos fios do transformador de 60 hertz.

A Tabela 9 faz um comparativo entre a quantidade de espiras e a bitola dos condutores dos dois protótipos.

**Tabela 9 - Comparação das características dos enrolamentos**

<b>Descrição</b>	<b>Transformador em 60 Hz</b>	<b>Transformador em 50 Hz</b>
Espiras do primário	212	154
Espiras do secundário	174	128
Fio do primário (AWG)	16	13
Fio do secundário (AWG)	15	12

**Fonte: Autoria própria, (2022).**

### **5.3 Discussões**

O protótipo do transformador projetado e implementado neste trabalho teve seu bom funcionamento comprovado nos testes realizados. A tensão secundária de circuito aberto acima de 100 volts se torna benéfica pois a resposta do secundário é influenciada pelo tipo de carga que é conectada ao transformador, onde a carga pode ser puramente ou predominantemente resistiva, indutiva ou capacitiva. Outro ponto que vale ressaltar é que a eficiência do transformador implementado neste trabalho (96,99%) foi maior do que a eficiência do transformador projetado para trabalhar em 60 hertz (94,92%), isso se deve ao fato de que as perdas no ferro/núcleo diminuem quando a frequência é diminuída, como podemos ver na equação 8.

## 6 CONCLUSÃO

O projeto proposto visa dimensionar e implementar um transformador monofásico real para operar em uma rede de 50 hertz, com base nos conhecimentos já obtidos durante a graduação e seguindo algumas bibliografias citadas, pode-se obter a fundamentação teórica necessária, e após esse estudo prévio foi feita a elaboração de um algoritmo no *software* MATLAB® para o dimensionamento e simulações do transformador monofásico.

Na etapa de implementação existiram alguns desafios, como por exemplo a compra de materiais, pois a chapa de aço silício que foi dimensionada só foi encontrada em um fornecedor cuja venda mínima era de 100 kg, sendo assim inviabilizava a compra devido ao seu alto custo. O contato de um engenheiro que trabalha na empresa Flessak possibilitou o corte das lâminas nas medidas e quantidades exatas, esse tipo de serviço não ocorre para clientes externos e só foi possível devido a ajuda desse engenheiro que trabalha na empresa.

A confecção do carretel também foi um desafio pois os cortes das chapas de MDF foram feitas com uma serra manual, logo era necessário muito cuidado para manter as medidas projetadas e elaborar uma colagem adequada das chapas.

Os enrolamentos foram dimensionados com fios de seções transversais elevadas, logo era necessário manter uma certa firmeza ao enrolar para que todas as voltas necessárias coubessem no carretel, uma forma de solucionar esse problema foi utilizar uma madeira dentro do carretel com as medidas do núcleo e fixar cantoneiras de madeira para sustentar as laterais, assim precavendo qualquer risco de o carretel desmontar. Para a passagem dos fios dos enrolamentos foram feitos furos ao invés de criar fendas nas bordas, esse procedimento permite que a integridade estrutural do carretel seja menos afetada. A cada camada de fios completa no carretel era aplicada uma camada de fita crepe para manter uma superfície plana para a camada seguinte, essa medida permitiu que os fios não escorregassem e criassem fendas ou inconformidades nos enrolamentos, causando problemas.

Os testes realizados no transformador são necessários para validar a sua operação e o correto dimensionamento, os testes foram feitos no laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde todos os testes atingiram os valores satisfatórios mostrando o sucesso do protótipo.

Alguns testes que levariam o transformador a sua corrente de plena carga não foram possíveis serem feitos devido à baixa potência do motor CC e o gerador síncrono, que apenas com uma lâmpada de corrente bem baixa ligada já estavam no limite de sua operação, causando aquecimentos e sobrecorrentes.

A implementação de um transformador permite ao graduando obter e revalidar vários conhecimentos em diferentes áreas da Engenharia Elétrica, pois são várias etapas e diferentes métodos para elaborar esse projeto. Foram utilizados conceitos de Análise de Circuitos Elétricos, Eletromagnetismo, Máquinas Elétricas, Instrumentos e Medidas Elétricas, Instalações Elétricas, entre outras, mostrando a importância dessas disciplinas na formação do graduando, e como um projeto prático pode abordar essa grande quantidade de disciplinas.

## REFERÊNCIAS

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2012. 547 p.

BORGES, Roberto C. de Mello. Voltagem, plug e códigos de países do mundo. **Instituto de Informática UFRGS**, Porto Alegre - RS, 05 de outubro de 2020. Disponível em: <<https://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Voltagem.Codigos.2020.10.05.html>>. Acesso em: 15 de maio de 2022.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Editora Amgh Ltda, 2013. 684 p.

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

FITZGERALD, A. E.. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: Editora Amgh Ltda, 2014. 708 p.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1982. 667 p.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Editora Globo S.A., 1991. 307 p.

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

MORA, Jesús Fraile. **Máquinas Elétricas**. 5. ed. Madrid: McGraw Hill, 2003. 757 p.  
OHKI, Yoshimichi. News From Japan. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 38, n. 2, p. 37-40, 18 February 2022.

PINTO, João Victor Araujo. **Medidas Elétricas em um Transformador Monofásico**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PINTO, Milton de Oliveira. **Energia Elétrica: Geração, Transmissão e Sistemas**.

TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO. **Núcleo ATS**, 2022. Disponível em: <<https://nucleoats.ind.br/transformadores-eletricos/>>. Acesso em: 22/11/2022.

## APENDICE A

```

clear all;
close all;
clc;
format long;

% Projeto de um transformador monofásico de 500 VA, operando em 50Hz e usando
% geometria do núcleo e lâminas no formato EI

Vin = 127;      % tensão de entrada em volts
Vo = 100;      % tensão de saída em volts
Io = 5;        % corrente de saída em amperes
Po = Vo*Io;    % potência de saída em watts
f = 50;        % frequência elétrica em hertz
rend = 0.95;   % meta de rendimento
alfa = 0.05;  % meta de regulação de tensão do transformador
Bm = 1.2;     % indução magnética em tesla
Ku = 0.4;     % constante de utilização da janela
Tr = 55;      % meta de aumento de temperatura em graus celsius
Kf = 4.44;    % constante de forma da onda senoidal

% Primeiro passo: Calcular a potência total em watts
Pt = Po*((1/rend)+1); % potência total em watts

% Segundo passo: Calcular as condições elétricas
Ke = 0.145*Kf*Kf*f*f*Bm*Bm*10^-4; % constante elétrica

% Terceiro passo: Calcular a geometria do núcleo
Kgcalc = Pt/(2*Ke*alfa*100) % constante de geometria do núcleo cm^5

% Quarto passo: Escolher a lâmina EI com Kg >= Kg calculado

% Calcular a quantidade de espiras do primário
Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*f*Ac) % número de espiras do primário

% Calcular a densidade de corrente

% Calcular a corrente de entrada

% Calcular a área do fio sem revestimento do primário

% Selecionar fio primário (fio de cobre esmaltado)
Awgp = 13; % bitola do fio do primário em AWG
diamp = 0.19; % diâmetro do fio do primário em cm
Awpbnovo = 0.02626; % área do fio sem revestimento do primário em cm^2
Awp = 0.02836; % área do encapado do primário em cm^2
microohmsporcmp = 65.6;

% Calcular a resistência do primário

% Calcular as perdas do cobre no primário

% Calcular o número de espiras no secundário
Vs = Vo;
Ns = ((Np*Vs)/Vin)*(1+alfa) % número de voltas do secundário

% Calcular a área do fio sem revestimento no secundário

% Selecionar fio secundário
Awgs = 12;
diams = 0.2130;
Awsbnovo = 0.03308; % em cm^2
Aws = 0.03564;
microohmsporcms = 52.1;

% Calcular a resistência do secundário

% Calcular as perdas do cobre no secundário

% Calcular as perdas totais no cobre

% Calcular a regulação de tensão do transformador

```



```
% Calcular os Watts por Quilograma  
% Calcular as perdas no ferro em Watts  
% Calcular a perda total  
% Calcular a perda por unidade de área  
% Calcular a elevação de temperatura em graus célsius  
% Calcular a utilização total da janela
```