

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MATHEUS HENRIQUE LUBIAN**

**PROJETO E MONTAGEM DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM  
TENSÕES ATÍPICAS**

**PATO BRANCO**

**2023**

**MATHEUS HENRIQUE LUBIAN**

**PROJETO E MONTAGEM DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM  
TENSÕES ATÍPICAS**

**Design and assembly of a single-phase transformer with atypical voltages**

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).  
Orientador(a): Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes.

**PATO BRANCO**

**2023**



[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.

**MATHEUS HENRIQUE LUBIAN**

**PROJETO E MONTAGEM DE UM TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM  
TENSÕES ATÍPICAS**

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: 14 de junho de 2023

---

Alexandre B. J. Soares  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

---

Artur T. Hara  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

---

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal Do Paraná

**PATO BRANCO**

**2023**

Dedico este trabalho a meus pais e meu  
irmão sempre estiveram ao meu lado e aos meus  
amigos por toda a ajuda prestada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meu pai Clóvis e minha mãe Alda por todo o apoio prestado na minha vida.

Agradeço meu irmão João por todos os anos de companheirismo.

Agradeço também a minha orientadora Dra. Filomena, por toda a ajuda no trabalho de conclusão de curso e também por todo o ensinamento passado.

Agradeço aos membros da banca pelo tempo dedicado e pelos ensinamentos passados.

Agradeço a empresa JL Eletro Técnica pelo espaço cedido para a montagem do protótipo.

Agradeço a todos meus amigos de faculdade por todos esses anos de convivência, risadas e aprendizados compartilhados.

Por fim, agradeço a UTFPR e todos os colaboradores pelo ambiente e materiais disponibilizados.

## EPÍGRAFE

Good things come if you never stop.  
(Paulo Vilela).

## RESUMO

LUBIAN, Matheus Henrique. **Projeto e montagem de um transformador monofásico com tensões atípicas**. 2023. 45 f. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2023.

O presente trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto e montagem de um transformador monofásico com tensão atípica. Foi realizado inicialmente um estudo sobre transformadores, englobando características construtivas e de funcionamento, bem como métodos de projeto de um transformador monofásico. Para implementar o transformador realizou-se o desenvolvimento de um algoritmo em linguagem C, com intuito de projetar as características construtivas, definição de materiais utilizados e realizar simulações quanto aos resultados esperados. Por fim foi realizada a montagem e ensaios do transformador em laboratório, visando validar o protótipo em questão.

**Palavras-chave:** Transformador Monofásico; Algoritmo em C; Implementação; Projeto; Ensaio em Laboratório.

## ABSTRACT

LUBIAN, Matheus Henrique. **Design and assembly of a single-phase transformer with atypical voltages**. 2023. 45 p. Undergraduate thesis – Electrical Engineering Program, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2023.

The present undergraduate thesis presents the design and assembly of a single-phase transformer with atypical voltage. Initially, a study on transformers was conducted, encompassing construction and operating characteristics, as well as methods for designing a single-phase transformer. To implement the transformer, an algorithm was developed in the C language to design the construction characteristics, define the materials used, and perform simulations regarding the expected results. Finally, the transformer was assembled and tested in the laboratory to validate the prototype in question.

**Keywords:** Single-phase transformer; C Algorithm; Implementation; Design; Laboratory testing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arranjos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente. ....	20
Figura 2: Disposição de enrolamentos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico, (b) enrolamento alternado.....	21
Figura 3: Diagrama esquemático de um transformador monofásico com o secundário sem carga.....	23
Figura 4: Diagrama esquemático de um transformador monofásico com o secundário com carga. ....	24
Figura 5: Arranjos e dimensões das lâminas do núcleo EI. ....	27
Figura 6: Dimensões das lâminas do núcleo EI.....	32
Figura 7: Carretel utilizado. ....	32
Figura 8: Fios de cobre utilizados, (a) AWG 17 e (b) AWG 25. ....	33
Figura 9: Enrolamento da bobina primária.....	34
Figura 10: Bobinas finalizadas. ....	34
Figura 11: Lâminas no formato EI.....	35
Figura 12: Montagem das lâminas do núcleo. ....	35
Figura 13: Transformador finalizado.....	36
Figura 14: Megômetro com escala mínima de 100 V disponibilizado pelo laboratório.....	38
Figura 15: Esquema elétrico para o ensaio a vazio. ....	40
Figura 16: Realização do ensaio a vazio. ....	40
Figura 17: Esquema elétrico para os ensaios com carga. ....	41
Figura 18: Ensaio com uma carga de 5W. ....	42
Figura 19: Ensaio com uma carga de 10W.....	42
Figura 20: Ensaio com uma carga resistiva. ....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Especificações de projeto do transformador. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2 – Especificações de projeto do transformador. ....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 3 – Resultados da simulação do projeto. ....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 4 – Resultados do teste de continuidade. ....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 5 – Resultados da simulação do projeto. ....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 6 – Resultados dos ensaios com cada tipo de carga. ....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 7 – Custos dos materiais do transformador. ....</b>	<b>45</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FEM	Força Eletromotriz
FMM	Força Magneto motriz

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Regulação de tensão
$a$	Relação de transformação
$A_c$	Área do núcleo
$A_p$	Produto das áreas do núcleo
$A_{wgs}$	Condutor do enrolamento secundário
$A_{wp}$	Secção transversal do condutor do enrolamento primário
$A_{ws}$	Secção transversal do condutor do enrolamento secundário
$A_{wpn}$	Área real do condutor do enrolamento primário
$A_{wsn}$	Área real do condutor do enrolamento secundário
$B_m$	Indução magnética máxima
$C_p$	Comprimento do condutor do enrolamento primário
$C_s$	Comprimento do condutor do enrolamento secundário
$D$	Profundidade do núcleo
$E$	Largura da perna central do núcleo
$e_{ind}$	Tensão induzida
$E_{lam}$	Espessura individual de cada lâmina
$\phi$	Fluxo médio por espira
$\phi_{DP}$	Fluxo de dispersão primário
$\phi_{DS}$	Fluxo de dispersão secundário
$\phi_M$	Fluxo mútuo
$\phi_p$	Fluxo no enrolamento primário
$\phi_s$	Fluxo no enrolamento secundário
$f$	Frequência da rede elétrica
$F$	Espaçamento entre as pernas do núcleo
$G$	Comprimento da perna do núcleo
$I_1$	Corrente de ensaio no primário
$I_2$	Corrente de ensaio no secundário
$I_{in}$	Corrente de entrada do transformador
$I_o$	Corrente de saída do transformador
$i_p$	Corrente no enrolamento primário

$i_s$	Corrente no enrolamento secundário
$J$	Densidade de corrente
$K_e$	Constante das condições eletromagnéticas
$K_g$	Constante da geometria do núcleo
$K_f$	Constante da forma de onda
$K_u$	Fator de utilização da janela do núcleo
$K_{un}$	Novo fator de utilização da janela do núcleo
$K_{up}$	Fator de utilização do enrolamento primário
$K_{us}$	Fator de utilização do enrolamento secundário
$\lambda$	Fluxo concatenado
$l$	Comprimento da bobina
$MLT$	Comprimento médio da espira
$n$	Rendimento
$N$	Número de espiras de uma bobina
$N_p$	Número de espiras no enrolamento primário
$N_s$	Número de espiras no enrolamento secundário
$P_{cu}$	Perdas no cobre
$P_{fe}$	Perdas no ferro
$P_{in}$	Potência de entrada do transformador
$P_o$	Potência de saída do transformador
$P_t$	Potência total do transformador
$\rho$	Resistividade do cobre
$Q_{lam}$	Quantidade de lâminas
$R_p$	Resistência do enrolamento primário
$R_s$	Resistência do enrolamento secundário
$S$	Área da secção transversal do condutor
$T_m$	Temperatura máxima de operação
$V_1$	Tensão de ensaio no primário
$V_2$	Tensão de ensaio no secundário
$V_{2n}$	Tensão no secundário a plena carga
$V_{2vz}$	Tensão no secundário a vazio
$V_{in}$	Tensão de entrada do transformador

$V_o$	Tensão de saída do transformador
$V_p$	Tensão no enrolamento primário
$V_s$	Tensão no enrolamento secundário
$W_a$	Área da janela do núcleo
<i>WattsporKg</i>	Perdas por unidade de massa
<i>Wtfe</i>	Peso do núcleo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	18
1.1.2 Objetivos específicos .....	18
<b>1.2 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>18</b>
<b>2. O TRANSFORMADOR .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Aspectos Construtivos .....</b>	<b>19</b>
2.1.1 Núcleo .....	20
2.1.2 Enrolamentos .....	21
<b>2.2 Funcionamento .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 Perdas .....</b>	<b>24</b>
2.3.1 Perdas no Cobre .....	25
2.3.2 Perdas no Ferro .....	25
2.3.3 Rendimento.....	26
<b>2.4 Dimensionamento do Transformador .....</b>	<b>26</b>
2.4.1 Dimensionamento do Núcleo .....	27
2.4.2 Dimensionamento dos Condutores .....	28
2.4.3 Dimensionamento dos Enrolamentos .....	28
2.4.4 Dimensionamento da Janela do Núcleo.....	29
2.4.5 Dimensionamento da Quantidade de Lâminas .....	29
2.4.6 Dimensionamento do Comprimento dos Condutores.....	30
<b>3. DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Projeto do Transformador.....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 Montagem do Transformador .....</b>	<b>32</b>

<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Simulação de Projeto.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Ensaio do transformador.....</b>	<b>38</b>
4.2.1 Ensaio de Continuidade .....	39
4.2.2 Ensaio a Vazio .....	39
4.2.3 Ensaio com Carga.....	41
4.2.4 Regulação de tensão e rendimento .....	44
4.2.5 Custos .....	45
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro sistema de geração de energia elétrica desenvolvido por Thomas Edison (1882) era um sistema de corrente contínua (CC) de 120 V. Por conta da baixa tensão, demandava altas correntes, gerando grandes perdas e uma baixa eficiência, o qual impossibilitava a transmissão a grandes distâncias (MARTIGNONI, 1991). Essas perdas elevadas obrigavam a criação de usinas de pequeno porte mais próximas as áreas consumidoras, porém tal condição acabara se tornando inviável e ineficiente (CHAPMAN, 2013).

Em paralelo Nikola Tesla (1887) desenvolveu um projeto de geração e transmissão em corrente alternada (AC), o qual se mostrou mais eficiente que o sistema CC. Entretanto para poder transmitir essa energia sem grandes perdas fez-se necessário a elevação da tensão de transmissão, neste momento é onde se torna indispensável a utilização de transformadores (MARTIGNONI, 1991). Segundo Bim (2012) a elevação da tensão de transmissão reduz as correntes e por consequência a secção dos cabos, diminuindo também as perdas provocadas pelo efeito joule, uma vez que estas são proporcionais ao quadrado da corrente transmitida na linha.

A eletricidade é de suma importância para o desenvolvimento humano, existindo uma demanda crescente de energia elétrica devido ao constante desenvolvimento. A necessidade de geração, transmissão e distribuição de energia se amplia em larga escala, demandando a transformação desta em diferentes níveis de tensão. Portanto é essencial uma análise de estudos de desempenho destes equipamentos em diversas condições de funcionamento, para garantir um melhor funcionamento e qualidade da energia entregue ao consumidor (VASCONCELLOS, 2013).

Segundo Toro (1994) os transformadores são usuais em sistemas de medição, sendo utilizados para adequar os níveis de tensão e corrente aos dispositivos de medição, também são amplamente utilizados em sistemas eletrônicos para isolamento de circuitos e casamento de impedâncias. Outra aplicação dos transformadores é em sistemas de comunicação. Porém a principal utilização de transformadores é em sistemas de geração e transmissão de energia, adequando os níveis de tensão conforme a necessidade da aplicação.

## **1.1 Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo calcular, simular e implementar um transformador monofásico com tensões atípicas, além de realizar testes e medições no mesmo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Estudar e revisar a teoria de transformadores monofásicos;
2. Escrever um algoritmo de projeto e cálculo para um transformador monofásico;
3. Levantar os materiais para a confecção do núcleo e enrolamentos e adquirir os mesmos;
4. Montar o transformador;
5. Realizar testes e medições elétricas.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

O trabalho está organizado conforme a sequência a seguir:

- No capítulo 1 são apresentados os objetivos do projeto e a estrutura do trabalho desenvolvido;
- No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre transformadores monofásicos;
- No capítulo 3 são apresentados os aspectos construtivos de cada parte do transformador, bem como seu funcionamento e um método de projeto de um transformador monofásico;
- No capítulo 4 é feito o projeto e a montagem do protótipo;
- No capítulo 5 é realizada a simulação de projeto e os ensaios em laboratório do protótipo desenvolvido;
- No capítulo 6 é realizada a conclusão desse projeto.

## **2. O TRANSFORMADOR**

Segundo Fitzgerald (2014) um transformador é constituído por dois ou mais enrolamentos que são acoplados através de um fluxo magnético comum. Ainda pode-se dizer que o transformador é um dispositivo que converte por meio de um campo magnético a energia elétrica de corrente alternada com uma determinada frequência e um nível de tensão, em energia elétrica de corrente alternada na mesma frequência, porém com outro nível de tensão (CHAPMAN, 2013). Ao aplicar uma tensão alternada em um dos enrolamentos do transformador, denominado enrolamento primário, é gerado um fluxo magnético alternado onde a amplitude é dependente da tensão aplicada, frequência e o número de espiras desse enrolamento. Parte desse fluxo magnético, que se denomina fluxo mútuo, flui pelo enrolamento secundário, induzindo tensões que dependem da frequência, do número de espiras e da magnitude desse fluxo. É possível obter praticamente qualquer relação de transformação ao adequar o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário (FITZGERALD, 2014).

O presente trabalho tem o intuito de comprovar esta afirmativa empregando os valores atípicos de tensão. Define-se como valores típicos de tensão para transformadores monofásicos de baixa tensão, os valores de tensões padrão comercialmente encontrados, tanto no primário quanto no secundário, tais como 440 V, 380 V, 220 V, 127 V, 24 V, 12 V. Partindo destes valores definidos como típicos, define-se como atípico qualquer outro valor de tensão diferente dos valores de tensão comerciais.

Um transformador reduz ou eleva um nível de tensão sem afetar a potência entregue a carga. A tensão e corrente são inversamente proporcionais nos terminais do transformador, ou seja, quando a tensão se eleva a corrente diminui e quando a tensão é reduzida, essa corrente aumenta, portanto, a potência original é mantida em qualquer trecho da transmissão de energia (CHAPMAN, 2013).

### **2.1 Aspectos Construtivos**

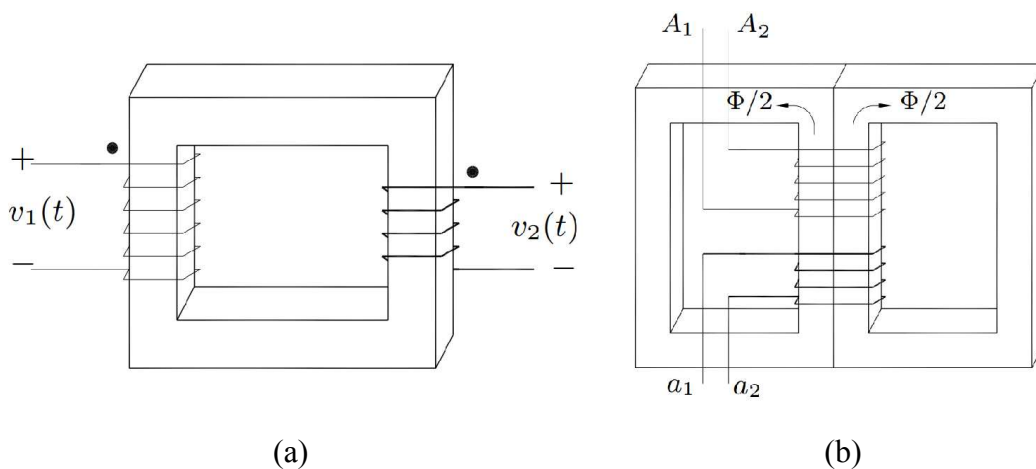
Para que haja o funcionamento de um transformador basta que exista um fluxo

mútuo entre dois enrolamentos, porém para aumentar a eficiência se utiliza um núcleo de material ferromagnético, sendo o material mais utilizado o aço-silício. O aço-silício tem as propriedades desejáveis de baixo custo e baixas perdas no núcleo, além de apresentar uma alta permeabilidade em densidades de fluxo elevadas. Ao utilizar este tipo de núcleo, o fluxo é delimitado pelo material, o qual enlaça ambos os enrolamentos (FITZGERALD, 2014)

### 2.1.1 Núcleo

Segundo Fitzgerald (2014), os núcleos dos transformadores são geralmente constituídos de várias chapas delgadas sobrepostas em uma pilha, sendo que os arranjos dos transformadores podem se dar de duas formas, núcleo envolvido e núcleo envolvente.

- Núcleo envolvido: Representado na Figura 1.a, consiste em um bloco retangular de aço laminado simples, onde os enrolamentos envolvem os dois lados do retângulo.
- Núcleo envolvente: Representado na Figura 1.b, consiste em um núcleo laminado de três pernas, onde os enrolamentos envolvem a perna central desse núcleo. (CHAPMAN, 2013).



**Figura 1: Arranjos de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente.**

**Fonte: (BIM, 2012).**

O transformador de núcleo envolvido (Figura 1.a) possui a vantagem de

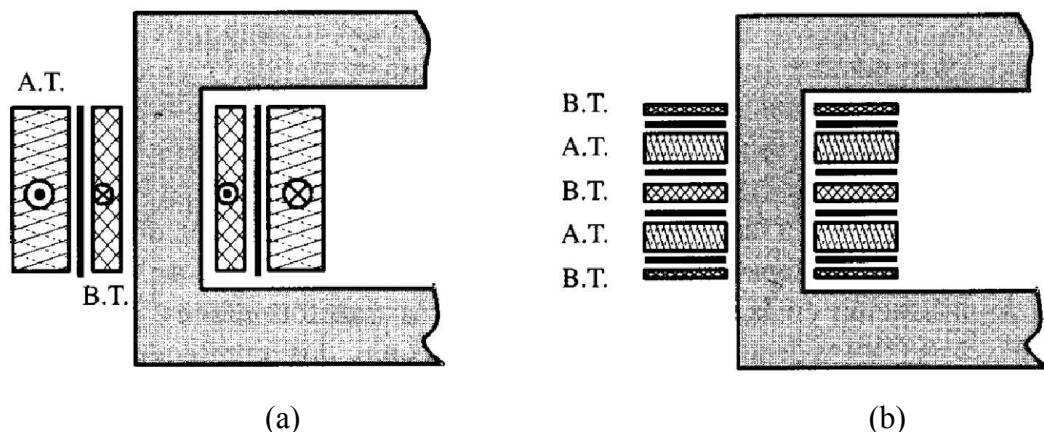
utilizar menor quantidade de cobre, já o núcleo envolvente (Figura 1.b) utiliza uma menor quantidade de material ferromagnético se comparado ao núcleo envolvido (BIM, 2012).

### 2.1.2 Enrolamentos

Os enrolamentos, ou bobinas de um transformador são constituídos de um material condutor esmaltado, geralmente cobre ou alumínio, sendo isoladas entre si por um papel isolante. A vida útil do transformador está diretamente relacionada a vida útil de suas bobinas, portanto os condutores que a constituem devem suportar diversos esforços, tais como a temperatura, transitórios da rede, níveis de curto circuito e tensão a quais o transformador será aplicado (SALUSTIANO, 2012).

Os enrolamentos podem ser dispostos de duas formas, enrolamento concêntrico ou enrolamento alternado.

- Enrolamento concêntrico: Representado na Figura 2.a, o condutor é disposto em uma camada sobreposta a outra, alinhados de forma centralizada, divididos pelo material isolante.
- Enrolamento alternado: Representado na Figura 2.b, o condutor é disposto em uma camada ao lado da outra, por exemplo, o primário de um lado e o secundário de outro, de forma com que a bobina se suceda alternadamente pelo núcleo, não havendo sobreposição (SALUSTIANO, 2012).



**Figura 2: Disposição de enrolamentos de transformadores: (a) enrolamento concêntrico, (b) enrolamento alternado.**

Fonte: (MORA, 2003).

## 2.2 Funcionamento

Segundo Chapman (2013) a Lei de Faraday constitui a base de funcionamento de um transformador. A Lei de Faraday afirma que se houver um fluxo através de uma espira de um fio condutor, então será induzida uma tensão diretamente proporcional a taxa de variação do fluxo em relação ao tempo.

Através da Lei de Faraday tem-se:

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

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

Sendo  $\lambda$  a soma do fluxo que passa por cada espira da bobina, tem-se:

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

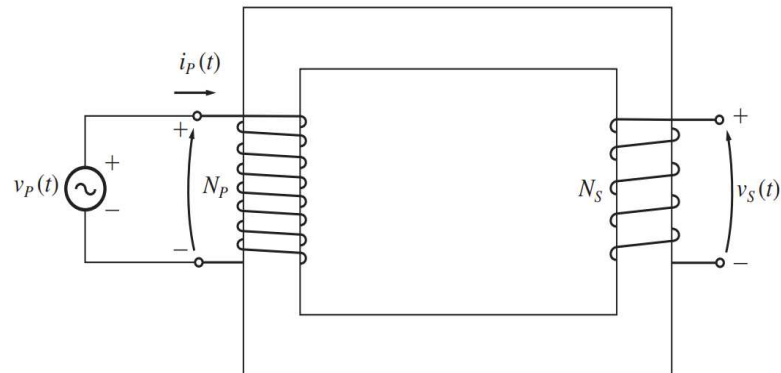
O fluxo que passa através de uma espira é ligeiramente diferente do fluxo das outras espiras, porém é possível definir um fluxo médio e, em uma bobina de N espiras, é possível dizer que o fluxo médio por espira é:

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

Portanto substituindo as Equações (3) em (1), a Lei de Faraday pode ser descrita por:

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

A Figura 3 mostra um diagrama esquemático de um transformador monofásico sem nenhuma carga aplicada ao seu secundário.



**Figura 3: Diagrama esquemático de um transformador monofásico com o secundário sem carga.**

**Fonte: (CHAPMAN, 2013).**

Assumindo que a tensão da fonte na Figura 3 é  $V_p(t)$ , e isolando o fluxo médio do enrolamento primário na Equação (4) obtém-se a seguinte Equação:

$$\underline{\phi}_p = \frac{1}{N_p} \int V_p(t) \cdot dt \quad (5)$$

Portanto o fluxo médio do enrolamento primário é inversamente proporcional ao número de espiras do enrolamento primário e depende diretamente da tensão aplicada.

O fluxo médio é subdividido em duas partes, o fluxo mútuo ( $\phi_M$ ), que percorre o caminho magnético do núcleo englobando a bobina do secundário e retornando ao primário e, o fluxo de dispersão primário ( $\phi_{DP}$ ), que ocorre quando parte do fluxo deixa o núcleo e não atinge a bobina secundária.

A mesma analogia é válida para os demais enrolamentos do transformador, portanto:

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

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

Reescrevendo a Lei de Faraday e considerando o fluxo de dispersão tem-se:

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

Como o fluxo mútuo é muito maior que o fluxo de dispersão, a tensão induzida é dada por:

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

Analogamente para a bobina secundária:

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

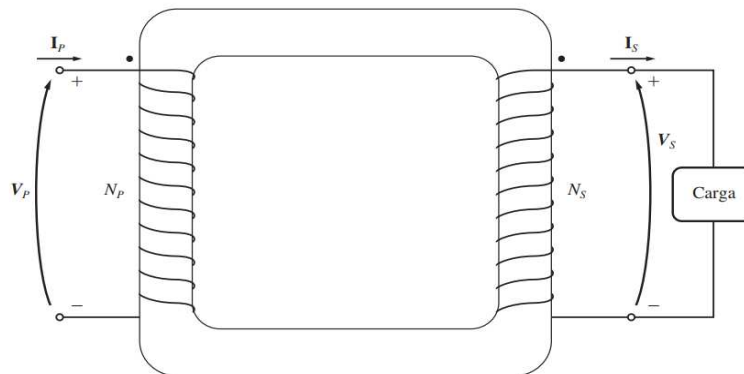
$$V_s(t) = N_s \left( \frac{d\phi_M}{dt} \right) \quad (11)$$

Dividindo (9) por (11), obtém-se a Equação da relação de transformação, dada por:

$$a = \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (12)$$

Em que  $a$  é definida como a relação de espiras ou relação de transformação do transformador.

Quando é introduzida uma carga no secundário, como apresentado na Figura 4, surge uma FMM dada por  $N_s i_s$ .



**Figura 4: Diagrama esquemático de um transformador monofásico com o secundário com carga.**

**Fonte: (CHAPMAN, 2013).**

### 2.3 Perdas

Os transformadores ideais apresentam a potência no primário igual a potência no secundário, ou seja, sem perdas, entretanto em um transformador real o mesmo não é válido, já que parte da potência é dissipada no núcleo e nos enrolamentos cujo são denominadas perdas no ferro e perdas no cobre.



### 2.3.1 Perdas no Cobre

Segundo Chapman (2013) são perdas resistivas que ocorrem nos enrolamentos do transformador, sendo conhecidas também como perdas por efeito joule.

As perdas no cobre são dadas por:

$$P_{cu} = R_p i_p^2 + R_s i_s^2 \quad (13)$$

Onde  $R_p$  e  $R_s$  são as resistências primárias e secundárias e  $i_p$  e  $i_s$  são as correntes correspondentes em cada bobina.

Segundo Martignoni (1991), também é possível obter uma Equação para as perdas no cobre em termos de elementos físicos, como o peso do cobre e a perda específica do material, dada por:

$$P_{cu} = R i^2 + i^2 \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (14)$$

Onde  $i$  é a corrente que flui pelo enrolamento,  $\rho$  é a resistividade do cobre,  $l$  o comprimento da bobina e  $S$  a área da secção transversal do condutor.

É através das perdas no cobre que se calcula a regulação de tensão do transformador, a qual é expressa por:

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

Sendo  $P_{cu}$  as perdas no cobre e  $P_o$  a potência de saída do transformador.

### 2.3.2 Perdas no Ferro

Também denominadas perdas no núcleo, as perdas no ferro ocorrem de duas formas, através das correntes parasitas ou por histerese magnética (MARTIGNONI, 1991).

As perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault ocorrem devido a correntes induzidas no núcleo, tais correntes aparecem através de uma variação de fluxo em uma massa metálica, gerando uma FEM na própria massa metálica. Segundo a Lei de Lenz essa FEM se opõe ao fluxo que a produz, causando uma perda

de potência. Para evitar as perdas por correntes parasitas é necessário utilizar lâminas de ferro finas e isoladas entre si para a construção do núcleo.

As perdas por histerese magnética ocorrem toda vez que o material ferromagnético percorre o ciclo de magnetização, associadas a reorganização dos momentos magnéticos do material. As perdas por histerese podem ser reduzidas se utilizado material de alta permeabilidade (MARTIGNONI, 1991).

As perdas no ferro podem ser calculadas através da Equação:

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

Onde  $Wtfe$  é o peso do núcleo e  $WattsporKg$  são as perdas por unidade de massa, as quais são definidas por:

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

Em que  $K, M, N$  são coeficientes do material do núcleo.

### 2.3.3 Rendimento

Considerando as perdas, outro ponto envolvido é o rendimento do transformador, sendo diretamente relacionado com as perdas através da Equação:

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

Onde  $P_o$  é a potência de saída do transformador e  $P_{fe}$  e  $P_{cu}$  são as perdas no ferro e no cobre respectivamente.

## 2.4 Dimensionamento do Transformador

Em todo e qualquer projeto de transformadores devem ser definidas algumas dimensões nas quais o transformador irá ser construído, tais como dimensões do núcleo e dimensões das bobinas.

Neste projeto será abordado um dos diversos métodos de dimensionamento para um transformador com lâminas de aço silício no formato E-I, de núcleo envolvente e enrolamentos concêntricos, através da metodologia que dimensiona o transformador utilizando a geometria do núcleo.

### 2.4.1 Dimensionamento do Núcleo

Inicialmente definem-se alguns valores iniciais de projeto, tais como tensão e corrente nominal, regulação de tensão, frequência de operação e o rendimento esperado. Na sequência calcula-se a potência total do transformador e posteriormente a constante de geometria do núcleo, dada por:

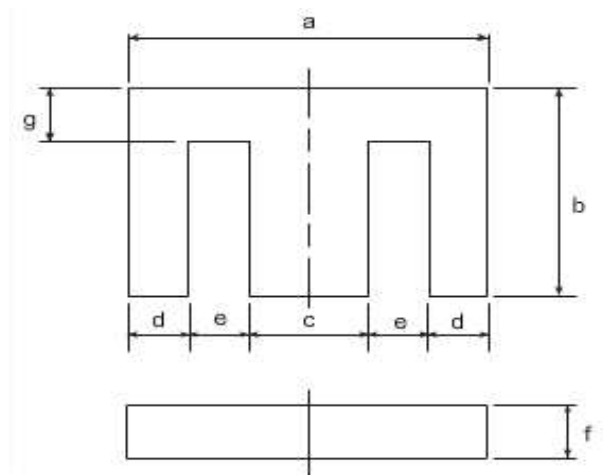
$$K_g = \frac{P_t}{2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100} \quad (19)$$

Onde  $P_t$  é a potência total,  $\alpha$  é a regulação de tensão e  $K_e$  é a constante das condições eletromagnéticas do transformador, calculada por:

$$K_e = 0,145 \cdot K_f^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot 10^{-4} \quad (20)$$

Sendo  $K_f$  a constante da forma de onda,  $f$  a frequência da rede elétrica e  $B_m$  a indução magnética máxima que gera o fluxo mútuo.

Com  $K_g$  calculado é possível obter as dimensões das lâminas do núcleo, as quais são apresentadas na Figura 5.



**Figura 5: Arranjos e dimensões das lâminas do núcleo EI.**

**Fonte: (Instituto Newton Braga, 2022).**

Conforme demonstrado na Figura 5, as lâminas devem ser construídas de forma que a largura da barra central ( $c$ ) seja duas vezes maior que as barras laterais ( $d$ ), para que não haja dispersão e variação na densidade do fluxo magnético. O espaçamento entre as pernas ( $e$ ) deve possuir o mesmo comprimento da largura das barras laterais, para que se aproveite a máxima potência do transformador utilizando as bobinas no tamanho ideal. A largura da barra I ( $f$ ) deverá ter o mesmo tamanho das barras laterais (FRAGOSO, 2010).

### 2.4.2 Dimensionamento dos Condutores

A secção transversal do condutor do enrolamento primário é dada por:

$$A_{wp} = \frac{I_{in}}{J} \quad (21)$$

Onde  $I_{in}$  é a corrente de entrada, ou seja, do enrolamento primário e  $J$  é a densidade de corrente que flui pelos enrolamentos.

Analogamente para o enrolamento secundário tem-se:

$$A_{ws} = \frac{I_o}{J} \quad (22)$$

Sendo  $I_o$  a corrente no secundário do transformador.

A densidade de corrente por sua vez é expressa em função de diversas variáveis de projeto, tais como a frequência ( $f$ ), a indução máxima ( $B_m$ ), potência total do transformador ( $P_t$ ), fator de forma da onda ( $K_f$ ) fator de utilização da janela do núcleo ( $K_u$ ) e o produto das áreas do núcleo ( $A_p$ ).

A Equação da densidade de corrente é dada por:

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

Substituindo (23) em (21) e (22) obtém-se a área ideal dos condutores a serem utilizados, porém deve-se selecionar o condutor com a área mais próxima comercialmente disponível.

### 2.4.3 Dimensionamento dos Enrolamentos

O dimensionamento dos enrolamentos consiste em calcular quantas voltas cada bobina terá. O cálculo do número de espiras do enrolamento primário é dado pela seguinte Equação:

$$N_p = \frac{V_{in} \cdot 10^4}{K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c} \quad (24)$$

Onde  $A_c$  é a área do núcleo e  $V_{in}$  é a tensão de entrada do transformador.

Com o número de espiras do primário definido, calcula-se o número de espiras do secundário, através da Equação:

$$N_s = \frac{V_o \cdot N_p}{V_{in}} \cdot (1 + \alpha) \quad (25)$$

Em que  $V_o$  é a tensão de saída e  $\alpha$  é a regulação do transformador.

#### 2.4.4 Dimensionamento da Janela do Núcleo

O fator de utilização da janela definido inicialmente traz uma aproximação do percentual da janela que será utilizada, porém como a secção do condutor não é exatamente a calculada, sendo aproximado para o valor comercial mais próximo, se faz necessário recalculer a utilização da janela do núcleo. O novo fator de utilização da janela é dado por:

$$K_{un} = K_{up} + K_{us} \quad (26)$$

Onde  $K_{up}$  e  $K_{us}$  representam respectivamente os fatores de utilização do primário e secundário, calculados por:

$$K_{up} = \frac{N_p \cdot A_{wppn}}{W_a} \quad (27)$$

$$K_{us} = \frac{N_s \cdot A_{wsn}}{W_a} \quad (28)$$

Sendo  $A_{wppn}$  e  $A_{wsn}$  as áreas reais dos condutores do primário e secundário, ou seja, a área do condutor comercial, e  $W_a$  a área da janela do núcleo.

#### 2.4.5 Dimensionamento da Quantidade de Lâminas

A quantidade de lâminas a ser utilizada é calculada pela Equação:

$$Q_{lam} = \frac{D}{E_{lam}} \quad (29)$$

Onde  $D$  é a profundidade do núcleo e  $E_{lam}$  a espessura individual de cada lâmina.

### 2.4.6 Dimensionamento do Comprimento dos Condutores

O cálculo do comprimento dos condutores de cada bobina é dado pelas Equações:

$$C_p = MLT \cdot N_p \quad (30)$$

$$C_s = MLT \cdot N_s \quad (31)$$

Em que  $MLT$  é o comprimento médio da espira.

## 3. DESENVOLVIMENTO

O Capítulo 3 apresenta as especificações, os cálculos e os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido utilizando o método de projeto e as Equações apresentadas no Capítulo 2.4, bem como os materiais utilizados e o processo de montagem do transformador.

### 3.1 Projeto do Transformador

Inicialmente definem-se as especificações de projeto, as quais são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Especificações de projeto do transformador.**

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Tensão no primário	$V_{in}$	70	V
Tensão no secundário	$V_o$	10	V
Corrente no secundário	$I_o$	1	A
Frequência da rede elétrica	$f$	60	Hz
Rendimento	$\eta$	95	%
Regulação de tensão	$\alpha$	5	%
Indução magnética máxima	$B_m$	1,2	T

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Temperatura máxima de operação	$T_m$	55	°C
Fator de utilização da janela	$K_u$	0,4	-
Fator de forma da onda senoidal	$K_f$	4,44	-

**Fonte: (Autoria própria).**

Utilizando os valores definidos na Tabela 1 e aplicando-os ao algoritmo desenvolvido no software MATLAB® obtém-se o restante dos parâmetros construtivos necessários para a construção do transformador.

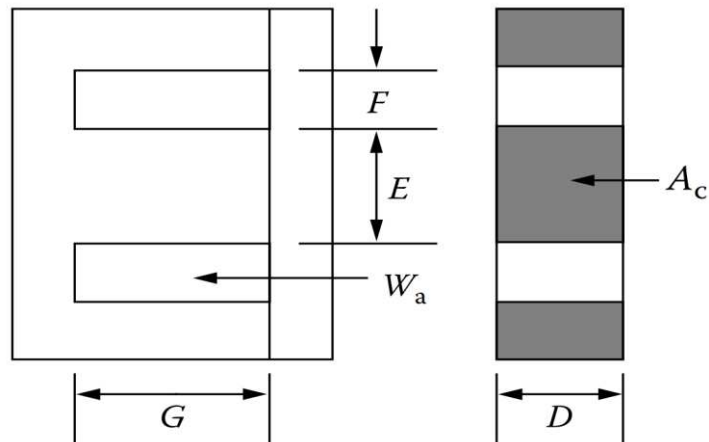
O algoritmo foi desenvolvido em linguagem C para MATLAB® seguindo o método de projeto utilizando a geometria do núcleo. Os passos principais do algoritmo são apresentados no apêndice A e os parâmetros calculados são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Especificações de projeto do transformador.**

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Medida D da lâmina	$D$	2,233	cm
Medida E da lâmina	$E$	2,223	cm
Medida F da lâmina	$F$	1,111	cm
Medida G da lâmina	$G$	3,333	cm
Número de espiras no primário	$N_p$	467	-
Número de espiras no secundário	$N_s$	70	-
Condutor do enrolamento primário	$A_{wgp}$	25	AWG
Condutor do enrolamento secundário	$A_{wgs}$	17	AWG
Fator de utilização da janela calculado	$K_u$	0,40	-

**Fonte: (Autoria própria).**

Para uma melhor compreensão, as dimensões das lâminas do núcleo são apresentadas na Figura 6.



**Figura 6: Dimensões das lâminas do núcleo EI.**

Fonte: (MCLYMAN, 2011).

Para adquirir os materiais é necessário o cálculo da quantidade de lâminas e de fio para cada enrolamento. Utilizando a Equação (30) calcula-se a quantidade de lâminas, tal que o resultado obtido foi  $Q_{lam} = 45$ . A quantidade de fio é encontrada através das Equações (31) e (32), onde  $C_p = 60,71 m$  e  $C_s = 11,19 m$ .

### 3.2 Montagem do Transformador

Para dar início a montagem do transformador fez-se necessário adquirir um carretel, tendo em vista que foi encontrado um carretel do tamanho necessário comercialmente. O carretel plástico utilizado é mostrado na Figura 7.



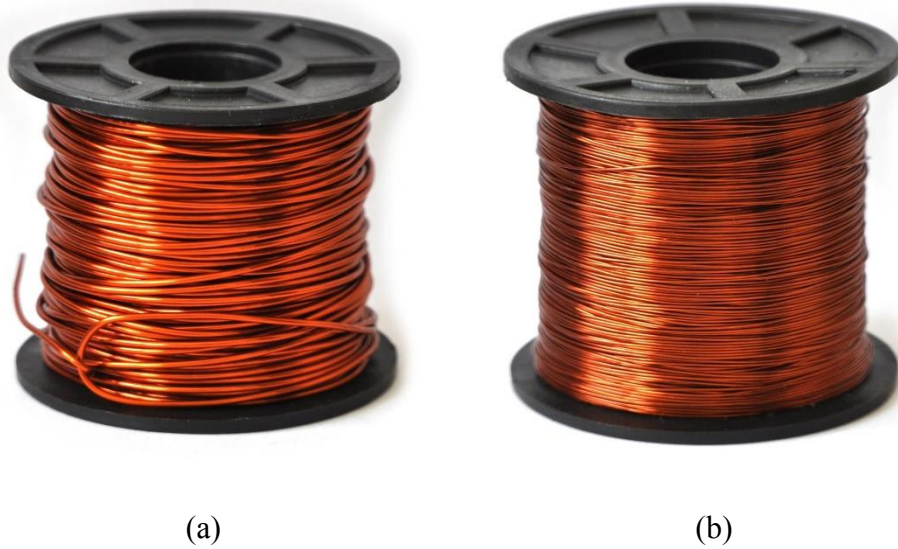
**Figura 7: Carretel utilizado.**

Fonte: (DRAGÃO, 2022).

Para a confecção dos enrolamentos foram utilizados fios de cobre esmaltado, fita crepe e papel isolante.



A Figura 8 mostra os fios utilizados na bobina do transformador.



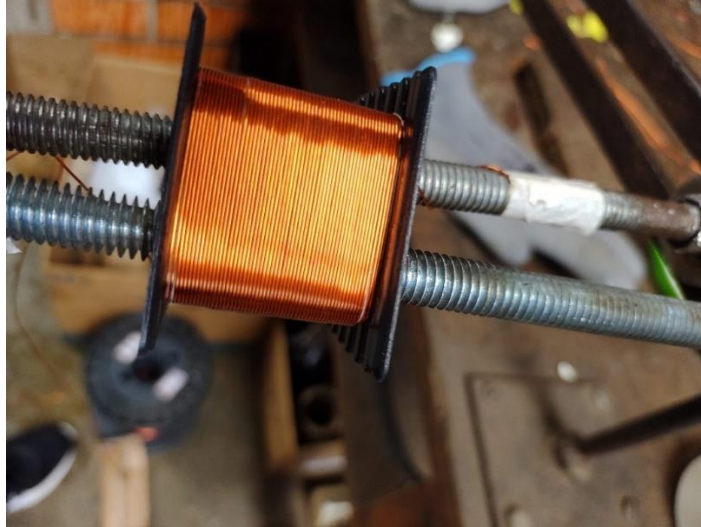
**Figura 8: Fios de cobre utilizados, (a) AWG 17 e (b) AWG 25.**

**Fonte: (ALTANA TUBES, 2022).**

O processo de enrolamento das bobinas foi realizado com o auxílio de uma bobinadeira manual.

Foi realizada a colocação de uma camada de papel isolante sobre o carretel plástico, em seguida foram realizadas 467 voltas do fio AWG 25 para dar forma a bobina do primário. Realizou-se a aplicação de uma camada de fita crepe para manter o enrolamento em sua devida posição e em sequência mais uma camada de papel isolante. Por fim enrolou-se 70 voltas do fio AWG 17, referente a bobina do secundário, mais uma vez prendendo com fita crepe e com uma camada de papel isolante para finalizar a montagem dos enrolamentos no carretel.

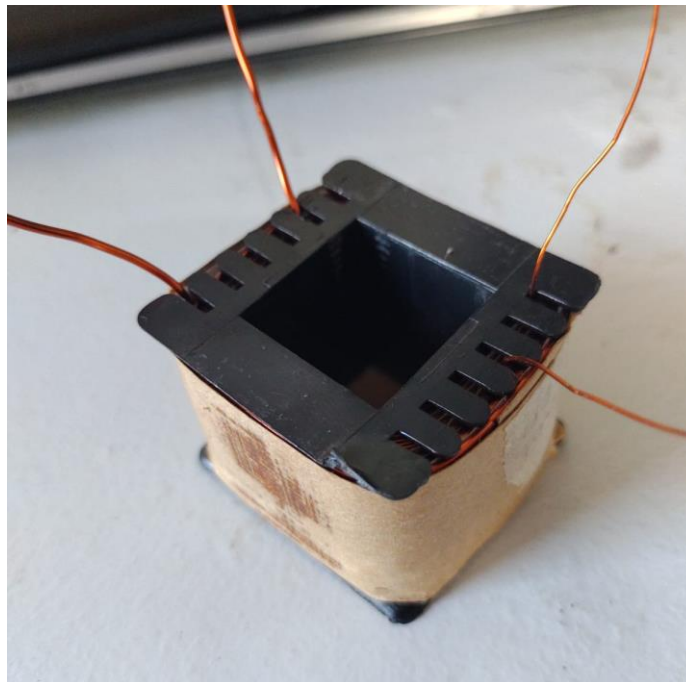
A Figura 9 mostra uma etapa do processo de enrolamento da bobina primária.



**Figura 9: Enrolamento da bobina primária.**

**Fonte: (Autoria própria).**

A Figura 10 apresenta as bobinas finalizadas e envoltas por papel isolante.



**Figura 10: Bobinas finalizadas.**

**Fonte: (Autoria própria).**

Para a montagem do núcleo foram adquiridas 45 chapas de aço silício, cortadas no formato EI-875.

A Figura 11 mostra as lâminas EI utilizadas para a construção do núcleo.

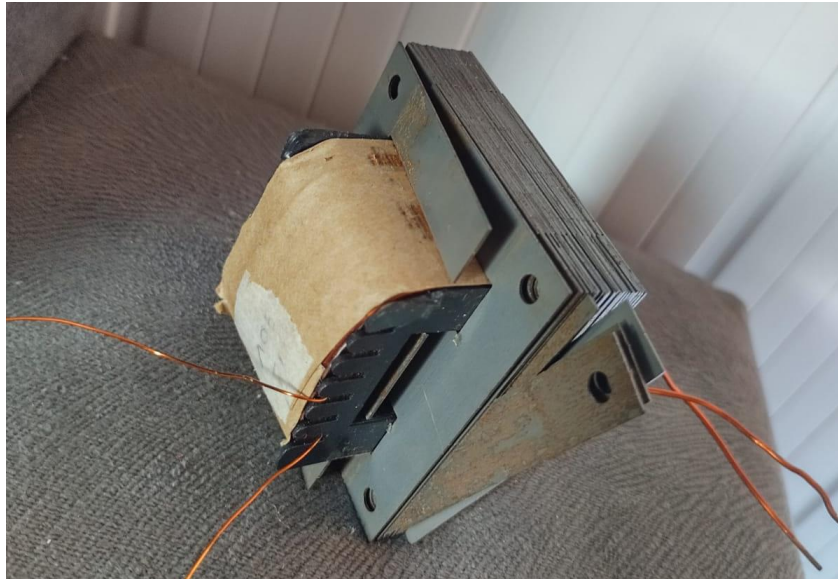


**Figura 11: Lâminas no formato EI.**

**Fonte: (Autoria própria).**

A montagem do núcleo foi realizada sobrepondo uma lâmina E sobre a outra em sentidos opostos e realizado o complemento com a lâmina I.

A Figura 12 mostra o processo de montagem das lâminas do núcleo.

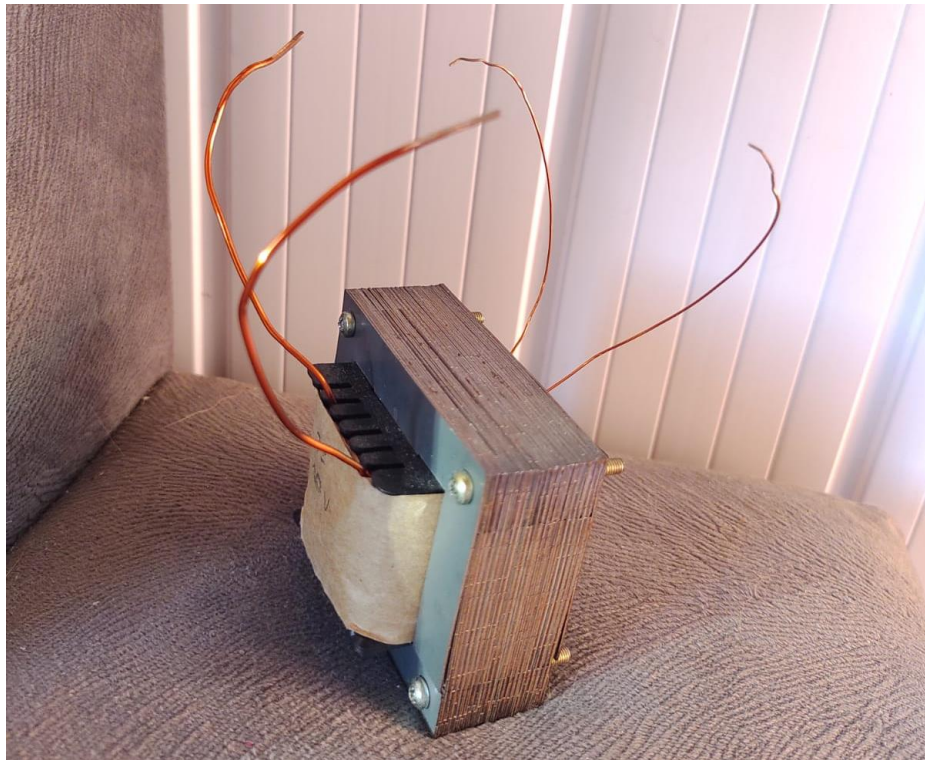


**Figura 12: Montagem das lâminas do núcleo.**

**Fonte: (Autoria própria).**

Ao finalizar a montagem foram utilizados 4 parafusos M3 e 4 porcas M3 para realizar a fixação das lâminas, realizando a fixação nos 4 cantos do núcleo.

A Figura 13 apresenta o transformador finalizado.



**Figura 13: Transformador finalizado.**

**Fonte: (Autoria própria).**

## 4. RESULTADOS

O Capítulo 4 apresenta os resultados simulados e os resultados obtidos através do ensaio do protótipo realizado no laboratório de máquinas elétricas I001 da UTFPR - PB.

### 4.1 Simulação de Projeto

Utilizando o algoritmo apresentado no Anexo A, realizou-se uma simulação dos resultados esperados conforme o projeto.

A Tabela 3 apresenta os resultados simulados e que serão utilizados para a validação do protótipo.

**Tabela 3 – Resultados da simulação do projeto.**

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Corrente no primário	$I_{in}$	0,15	A
Potência de saída do transformador	$P_o$	10	W
Regulação de tensão	$\alpha$	0,03	
Rendimento	$n$	0,94	

Fonte: (Autoria própria).

Realizando uma breve análise nos resultados de regulação de tensão e rendimento simulados, pode-se dizer que são satisfatórios, pois a regulação de tensão fica totalmente dentro da faixa esperada e o rendimento ligeiramente fora da faixa, porém ao desconsiderar algumas condições de operação não ideais pode gerar estas pequenas divergências.

A regulação de tensão do transformador é a variação da tensão secundária do transformador desde a vazio até plena carga. Quanto menor a regulação melhor o transformador. A regulação simulada de 3% está melhor que a regulação esperada de 5%.



## 4.2 Ensaio do transformador

Os ensaios foram divididos nas seguintes etapas: Ensaio de continuidade, Ensaio a vazio e Ensaio com carga.

O ensaio de resistência de isolamento não foi realizado pois o megômetro disponível no laboratório não possuía escala de tensão adequada para o transformador desenvolvido, podendo danificar o mesmo.

A Figura 14 apresenta o megômetro disponível no laboratório, observa-se que a menor escala para o ensaio é de 100 V, já a tensão do transformador é de 70 V.



Figura 14: Megômetro com escala mínima de 100 V disponibilizado pelo laboratório.

Fonte: (Autoria própria).

O ensaio de curto circuito também não foi realizado, pois a corrente de entrada do transformador era muito baixa, muito aquém da escala de medida dos wattímetros analógicos disponíveis no laboratório, portanto impossibilitando de realizar a medida correta.

#### 4.2.1 Ensaio de Continuidade

O primeiro ensaio realizado foi o teste de continuidade, o qual visa garantir que não haja nenhum curto circuito entre qualquer uma das bobinas e o núcleo ou entre as próprias bobinas. Este teste também permite verificar se ocorreu o rompimento do condutor durante a bobinagem. Para este teste foi utilizado apenas um multímetro de mão ajustado na escala de continuidade.

A Tabela 4 apresenta os resultados de continuidade do transformador, marcado com “X” onde obteve-se sinal de continuidade.

**Tabela 4 – Resultados do teste de continuidade.**

	Enrolamento Primário	Enrolamento Secundário	Carcaça
Enrolamento Primário	X	-	-
Enrolamento Secundário	-	X	-

**Fonte: (Autoria própria).**

O teste de continuidade foi satisfatório, uma vez que apenas entre as extremidades do mesmo enrolamento encontra-se um curto circuito, indicando assim uma perfeita isolação entre bobinas e também com o núcleo.

#### 4.2.2 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio foi o segundo teste realizado no protótipo, sendo utilizados um variac, multímetros ajustados em escalas de tensão ou corrente e cabos condutores. Este ensaio consiste em aplicar a tensão nominal nos terminais do primário do transformador e realizar a medida de tensão no secundário, bem como realizar a medida de corrente no enrolamento primário.

A Figura 15 mostra o circuito para a realização do ensaio a vazio.

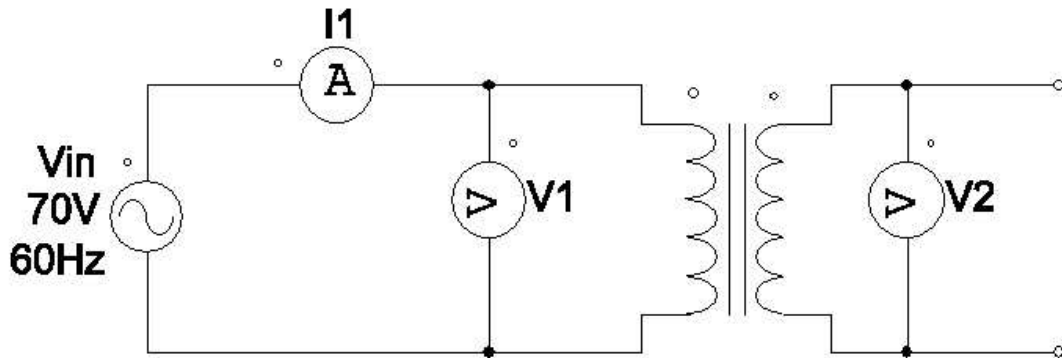


Figura 15: Esquema elétrico para o ensaio a vazio.

Fonte: (Autoria própria).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos no ensaio a vazio.

Tabela 5 – Resultados da simulação do projeto.

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Tensão no primário	$V_1$	70,8	V
Tensão no secundário	$V_2$	10,5	V
Corrente no primário	$I_1$	163	mA

Fonte: (Autoria própria).

A Figura 16 mostra a realização do ensaio a vazio.

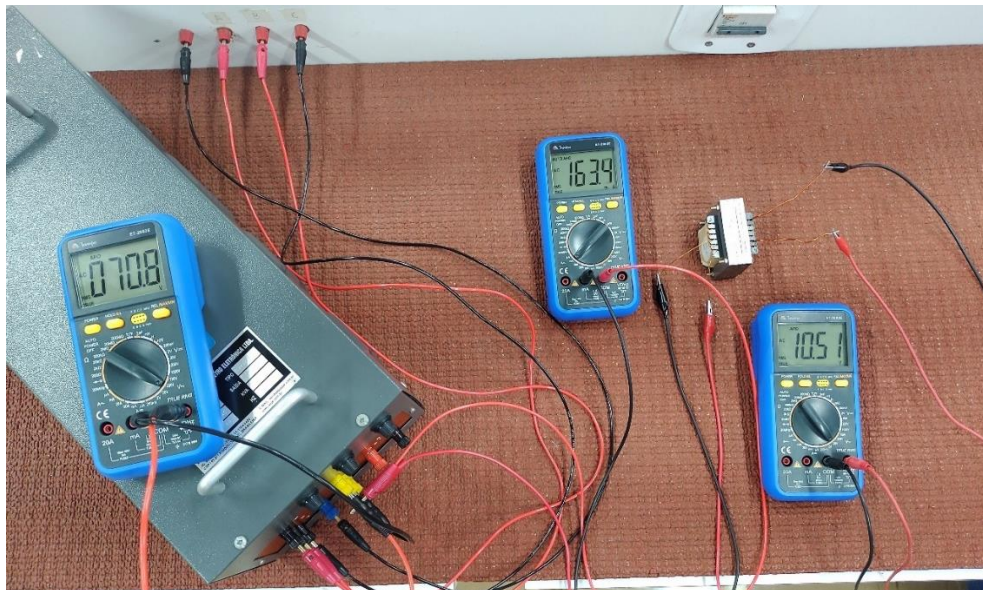


Figura 16: Realização do ensaio a vazio.

Fonte: (Autoria própria).

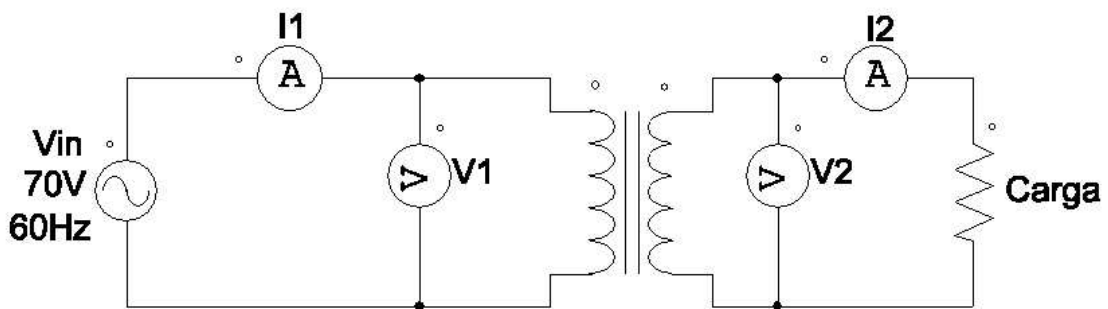


O ensaio a vazio demonstra uma leve variação no valor de tensão do secundário quando comparada a tensão nominal, porém nota-se que a tensão no enrolamento primário também está um pouco acima, devido à dificuldade de estabilizar a tensão do variac em 70 V, porém essas variações não impedem de validar o ensaio e a comprovação dos resultados obtidos.

#### 4.2.3 Ensaio com Carga

O último ensaio realizado com o protótipo foi o ensaio com carga. Para este ensaio foram utilizados os seguintes instrumentos: multímetros, um variac, cabos condutores e 3 diferentes cargas.

A Figura 17 mostra o circuito para a realização dos ensaios com carga.

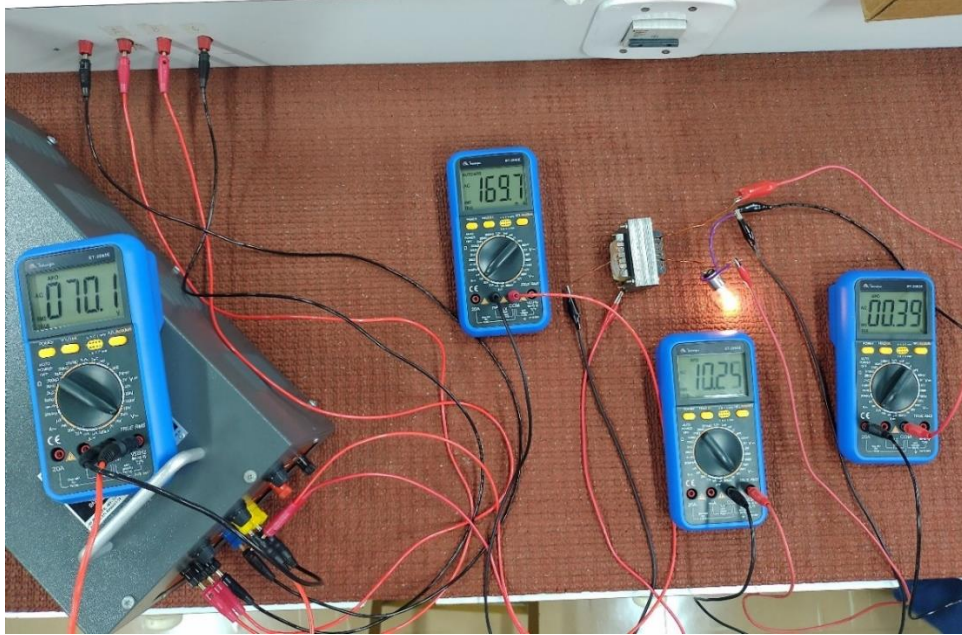


**Figura 17: Esquema elétrico para os ensaios com carga.**

**Fonte: (Autoria própria).**

A primeira carga utilizada foi uma lâmpada de farol de automóvel 12 VCC, com potência de 5 W. O farol é designado para ser utilizado em um circuito de corrente contínua, porém pode ser ligado rapidamente em um circuito de corrente alternada. Como os 12 VCC são próximos da tensão de pico do secundário (aproximadamente 14 V) não há problema em utilizar a carga por um curto período de tempo para realizar o ensaio.

A Figura 18 apresenta a primeira montagem com uma carga de 5 W.

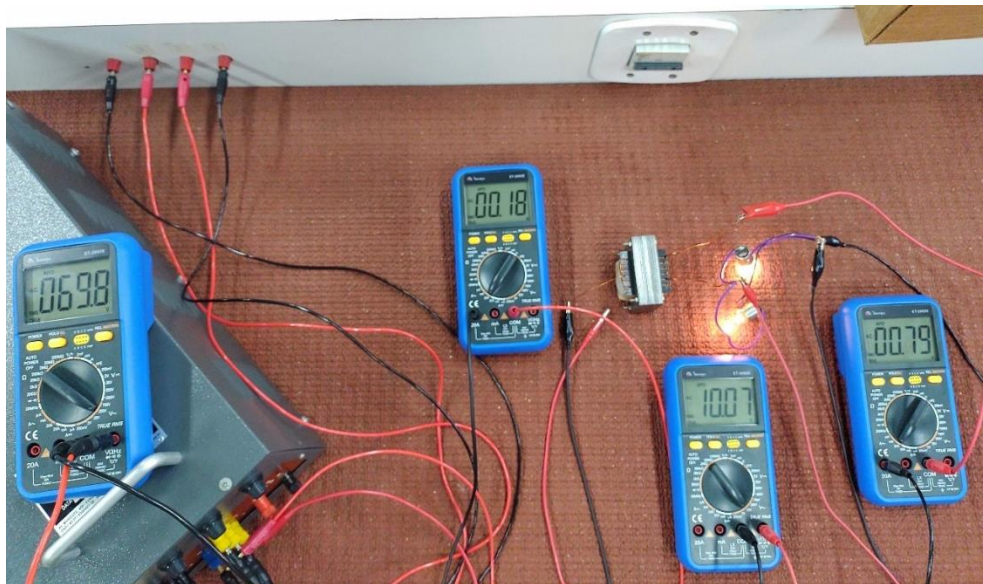


**Figura 18: Ensaio com uma carga de 5W.**

**Fonte: (Autoria própria).**

Na segunda carga foram utilizadas 2 lâmpadas de farol, os quais ligados em paralelo somam 10 W de potência, portando atingindo a potência nominal do transformador.

A Figura 19 apresenta a segunda montagem com uma carga de 10 W.



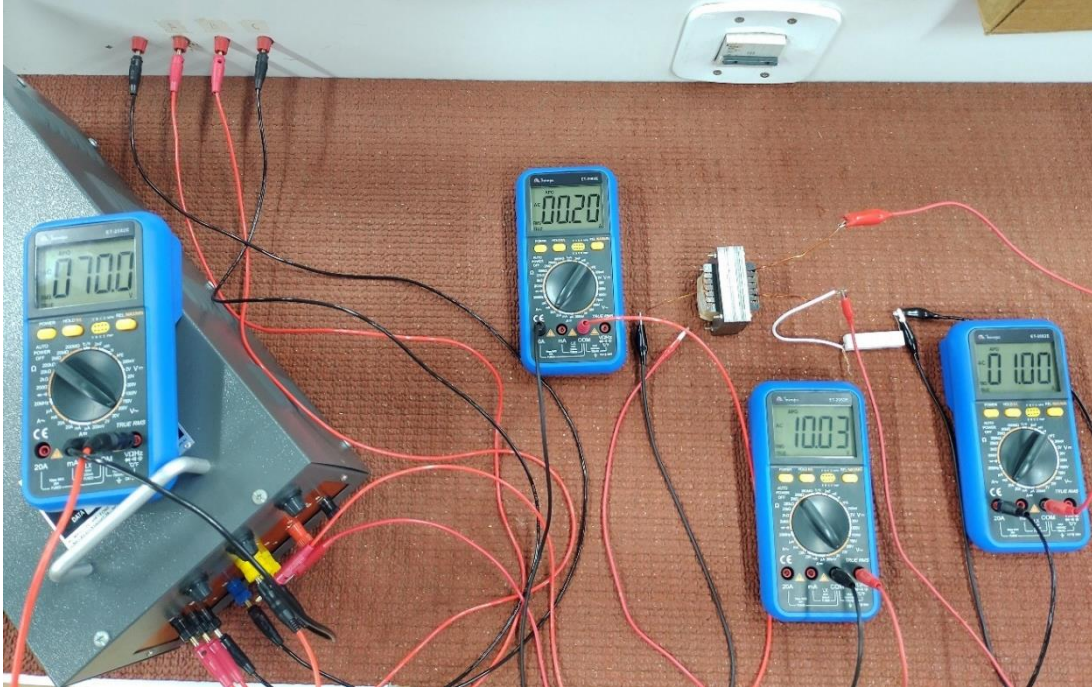
**Figura 19: Ensaio com uma carga de 10W.**

**Fonte: (Autoria própria).**

A última carga utilizada foi um resistor de potência de 20 W, com resistência

de  $10 \Omega$ , o qual aplicado a uma tensão de  $10 \text{ V}$  no secundário drena uma corrente de saída do transformador de  $1 \text{ A}$ .

A Figura 20 mostra o ensaio realizado com a carga resistiva.



**Figura 20: Ensaio com uma carga resistiva.**

**Fonte: (Autoria própria).**

A Tabela 6 apresenta os resultados dos ensaios com as 3 cargas distintas e o ensaio a Vazio.

**Tabela 6 – Resultados dos ensaios com cada tipo de carga.**

Carga	$V_1$ (V)	$I_1$ (A)	$V_2$ (V)	$I_2$ (A)
A vazio	70,8	0,16	10,50	0
Farol 5 W	70,2	0,17	10,25	0,37
Farol 10 W	70,0	0,18	10,10	0,79
Resistor $10 \Omega$	70,1	0,20	10,03	1,00

**Fonte: (Autoria própria).**

A Tabela 6 mostra que ao se aproximar da carga nominal do transformador a sua tensão se aproxima cada vez mais da tensão nominal de projeto, uma vez que já é esperado que sua tensão caia ao aumentar a carga, porém o resultado de tensão e corrente de saída são muito satisfatórios, pois ao ser submetido a plena carga o

transformador entrega exatamente a tensão e corrente determinados nas especificações iniciais.

#### 4.2.4 Regulação de tensão e rendimento

Utilizando-se dos dados da Tabela 6 é possível calcular a regulação de tensão do transformador ensaiado e também seu rendimento aplicado a carga nominal.

A regulação de tensão pode ser calculada pela seguinte Equação:

$$\alpha = \frac{V_{2vz} - V_{2n}}{V_{2n}} \quad (32)$$

Sendo  $V_{2vz}$  a tensão no secundário a vazio e  $V_{2n}$  a tensão no secundário a plena carga.

Substituindo os valores das Tabelas 5 e 6 na Equação (32) tem-se:

$$\alpha = \frac{10,5 - 10,03}{10,03} = 0,046 \quad (33)$$

Portanto a regulação de tensão do transformador está dentro do esperado uma vez que o limite máximo especificado era de 5%.

O cálculo de rendimento do transformador é dado por:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{V_2 \cdot I_2}{V_1 \cdot I_1} \quad (34)$$

Onde  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $I_1$  e  $I_2$  correspondem respectivamente a tensões e correntes no primário e secundário em carga nominal.

Aplicando os valores da Tabela 6 na equação (34) tem-se:

$$\eta = \frac{10,03 \cdot 1}{70,1 \cdot 0,2} = 0,71 \quad (35)$$

O rendimento de 71% ficou abaixo do esperado, já que o especificado era de 95%. O baixo rendimento pode ser explicado por alguns fatores construtivos que acabam elevando a resistência de enrolamento e a perda no cobre ou algum fator na montagem das lâminas incumbindo a perda por histerese no ferro.

É importante ainda observar que o rendimento foi calculado utilizando dados do datasheet de um fabricante de chapas. As chapas utilizadas no protótipo não são deste fabricante, mas sim de terceiros. O fabricante garante este rendimento apenas em seus produtos e não em produtos de terceiros.

#### 4.2.5 Custos

Neste tópico serão apresentados os custos para a compra dos materiais e montagem do transformador.

A Tabela 7 mostra os materiais e valores, assim como o local onde foi adquirido cada material para o implemento do transformador.

**Tabela 7 – Custos dos materiais do transformador.**

<b>Material</b>	<b>Valor (R\$)</b>	<b>Fornecedor</b>
Condutores de Cobre Esmaltados	180,00	Altana Tubes
Lâminas de Aço Silício	270,00	Flessak Eletro Industrial
Carretel Plástico	60,00	Dragão Injetora de Plásticos
Parafusos e Porcas	0,00	-
Papel Isolante	0,00	Professora Filomena
Fita Crepe	0,00	-
<b>Total</b>	<b>510,00</b>	

Fonte: (Autoria própria).

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido teve como finalidade o projeto e implemento de um transformador monofásico com tensões atípicas de 70 V no enrolamento primário para 10 V no enrolamento secundário, desenvolvendo-se nas etapas de estudo acerca de transformadores, elaboração de um algoritmo para o projeto de um transformador, a montagem e por fim ensaios realizados a fim de validar o protótipo realizado, mostrando que o projeto foi bem sucedido e que podemos construir transformadores com qualquer relação de transformação.

No Capítulo de revisão bibliográfica houve pesquisas e estudos envolvendo características construtivas e de funcionamento de transformadores monofásicos, de onde foram destacados pontos a serem utilizados no projeto do transformador.

Para a implementação do algoritmo houve a interdisciplinaridade com a área de programação, utilizada para o desenvolvimento do algoritmo no software MATLAB®. O algoritmo permitiu que fossem realizados os cálculos dos parâmetros e materiais necessários para a construção do transformador, além de permitir uma simulação de resultados esperados para posterior comparação com os resultados obtidos em laboratório.

No Capítulo de construção do transformador foram encontradas várias dificuldades, sendo a principal relacionada ao prazo de entrega dos materiais, já que os mesmos foram comprados de fornecedores pela internet, sofrendo atrasos de entrega por conta da logística.

Para validação do projeto, realizou-se ensaios em laboratório, os quais satisfizeram os resultados esperados, sendo que as principais características do transformador foram atingidas, tais como tensão e corrente de saída, regulação de tensão e rendimento.

Para trabalhos futuros sugere-se o projeto e implementação de 3 transformadores monofásicos idênticos a este para a montagem de um transformador trifásico, com a possibilidade de exploração de mais características construtivas do transformador, já que a tensão aplicada no projeto não oferece riscos e tem uma melhor possibilidade de serem trabalhados testes de laboratório.

Portanto finaliza-se um trabalho que exigiu diversas habilidades entre teoria e prática, além de uma interdisciplinaridade do curso de engenharia elétrica, contribuindo para a formação acadêmica do aluno.



## REFERÊNCIAS

1. ALTANA TUBES. **Catálogo de produtos Altana Tubes**. Disponível em: <<https://www.altanatubes.com.br/webstore/ExtraLinks/Catalog.aspx>>, Acesso em: set. 2022.
2. BIM, Edson. **Máquinas elétricas e acionamento**. 2ª Edição. Elsevier Brasil, 2012.
3. CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5 Edição. AMGH Editora, 2013.
4. DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Prentice-Hall do Brasil, 1994.
5. DRAGÃO Injetora de Plásticos. **Catálogo de produtos Dragão**. Salto ,1991 Disponível em: < <https://www.dragaoplasticos.com.br/index.html>>, Acesso em: set. 2022.
6. FITZGERALD, A. E.; ELÉTRICAS, **Máquinas elétricas**. 7ª edição. 2014.
7. FRAGOSO, Cecil M. **Transformadores, Teoria e Projeto**. IFPB, 2010. Disponível em: <<http://eletronicaifpb.6te.net/files/Transformadores.pdf>> Acesso em: 12 abr. 2022.
8. MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores**. 8ª Edição. Editora Globo, 1991.
9. MCLYMAN, Colonel Wm. T., **Transforansfomr and inductor disign handbook**. 4ª Edição, CRC Press,2011.
10. MORA, Jesus Fraile. **Maquinas electricas**. 5ª edição, Concépcion Fernández Madrid. 2003.
11. SALUSTIANO, Rogério. **Análise técnica de transformadores para redes de média tensão**. 2012. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

## APÊNDICE A - Algoritmo

```

clear
clc
format longe
% Transformador monofásico de 10 W, 60 Hz
% Método da geometria do núcleo, lâmina EI
Vin = 70; %Volts (Tensão entrada trafo)
Vo = 10; %Volts (Tensão Saída trafo)
Io = 1; %Ampere (Corrente saída Trafo)
Po = Vo*Io; %Watts (Potência de saída)
f = 60; %Hz (Frequencia da rede)
rend = 0.95; %Rendimento trafo
alfa = 0.05; %Regulação de tensão do transformador
Bm = 1.2; %Tesla (Indução magnética)
Ku = 0.4; %Fator de utilização da janela
Tr = 55; %°C (Meta de aumento de temperatura)
Kf = 4.44; %FF onda senoidal

Pt = Po*((1/rend)+1);%Watts (Potencia total)

Ke=0.145*Kf*Kf*f*f*Bm*Bm*10^-4;%Condições elétricas do núcleo
Kg = Pt/(2*Ke*alfa*100); %Constante da geometria do núcleo

%Chapa EI-875
D = 2.233; %Cm (Profundidade do núcleo)
E = 2.223; %Cm
F = 1.111; %Cm
G = 3.333; %Cm
MPL = 13.3; %Cm (Comprimento do caminho magnético)
WTFE = 0.457; %Kg (Peso do núcleo)
WTCU = 171.0;%g (Peso do cobre)
MLT = 13.0;%Cm (comprimento médio da espira)
Ac = 4.693; %Cm² (Área do núcleo)
Wa = 3.705; %Cm² (Área da janela)
Ap = 17.384; %Cm⁴ (Produto das Áreas)
Kgnovo = 2.513; %Cm⁵ (Constante da geometria do núcleo)
At = 163.0; %Cm² (Área requerida para dissipar calor)

Np = (Vin*10^4)/(Kf*Bm*f*Ac); %Número de espiras do primário
J = (Pt*10^4)/(Kf*Ku*Bm*f*Ap); %A/Cm² (Densidade de corrente)
Iin = Po/(Vin*rend); %Ampere (Corrente de entrada)
Awpb = Iin/J; %Cm² (Área do fio sem revestimento do primário)
Awgp = 25; %Numero AWG do primário
diamp = 0.0505; %Cm (diâmetro do fio primário em cm)
Awpbnovo = 1.6230*10^-3; %Cm² (Área do fio disponível)
Awp = 2.0020*10^-3; %Cm² (Área do fio primário)
microohmsporcmp = 1062.0; % (Resistência por cm em uohms)

Rp = MLT*Np*microohmsporcmp*10^-6; %Ohms (Resist. Enrol. primário)
Ip=Iin;
Pp=Ip*Ip*Rp; %Watts (Perdas no cobre primário)

```



```

Vs = Vo;
Ns = ((Np*Vs)/Vin)*(1+alfa); %Numero de espiras do secundário
Awsb = Io/J; %Cm² (àrea do fio no secundário)
Awgs = 17;
diams = 0.1220;
Awsbnovo = 10.3900*10^-3; %Cm²
Aws = 11.68*10^-3; %Cm²
microohmsporcms = 165.8;

Rs = MLT*Ns*microohmsporcms*10^-6; %Ohms (Resist. Enrol. secundário)
Is=Io;
Ps = Is*Is*Rs; %Watts (Perda no cobre no enrolamento secundário)

Pcu= Pp+Ps; %Watts (Perda total no cobre)
alfacalc=Pcu/Po; %Meta:0,05

K = 0.0005570;
M= 1.680;
N = 1.860;
wattsporkg = (K)*(f^M)*(Bm^N); %Watts por Kg

Pfe = wattsporkg*WTFE; %Watts (Perda no ferro)
Psoma = Pcu+Pfe; %Watts (Perda total)
Rendcalc = Po/(Po + Psoma); %Meta 0.95
Pporarea = Psoma/At; %Watts/Cm² (Perda por unidade de área)

```