

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

**MAURO JOSÉ DA ANUNCIÇÃO**

**TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO LL:**  
**PROJETO E MONTAGEM**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**  
**2021**

**MAURO JOSÉ DA ANUNCIAÇÃO**

**TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO LL:  
PROJETO E MONTAGEM**

**Single Phase Transformer with LL Core:  
Project and Mounting**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Profa. Dra. Filomena B. R. Mendes.

**PATO BRANCO**

**2021**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “**Transformador Monofásico com Núcleo LL: Projeto e Montagem**”, do aluno “**Mauro José da Anunciação**” foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **275** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

**Profa. Dra. Filomena Barbosa Rodrigues Mendes**

**Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares**

**Prof. Dr. Fredy Maglorio Sobrado Suárez**

**Prof. Me. Santo Tiveroli Filho**

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

## DEDICATÓRIA

À minha família que me apoiou em todos os momentos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter guiado meus passos e me sustentado nos momentos difíceis dessa jornada.

Agradeço a minha família, por ter me apoiado e incentivado a seguir buscando esse objetivo mesmo diante dos tropeços e das dificuldades que surgem.

Agradeço a UTFPR e aos Professores, que sempre colaboraram e dedicaram seu tempo para que mais esse sonho esteja se concretizando.

Agradeço aos amigos e colegas, que de uma forma ou de outra colaboraram para a construção deste trabalho.

## EPÍGRAFE

O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível. (WEBER, Max).

## RESUMO

ANUNCIACÃO, Mauro José. **Transformador Monofásico com Núcleo LL: Projeto e Montagem**. 2021. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Transformadores são equipamentos elétricos amplamente utilizados para conversão de níveis de tensão. A elaboração de projetos de transformadores com núcleo ferromagnético não convencional é importante, pois contribui para a construção de transformadores de melhor desempenho. Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um algoritmo para o projeto de um transformador monofásico com núcleo LL, que seja capaz de converter o nível de tensão de 220 V na tensão de 110 V, suportando uma corrente de 1 A em seu enrolamento secundário. Um protótipo foi construído e foram realizados ensaios para verificar o seu comportamento e verificou-se o comportamento do transformador está de acordo com o que foi projetado.

**Palavras-chave:** Transformador monofásico; Algoritmo; Núcleo; Enrolamentos; Ensaios.

## ABSTRACT

ANUNCIACÃO, Mauro José. **Single Phase Transformer with LL Core: Project and Mounting**. 2021. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Transformers are electrical equipment widely used for converting voltage levels. The elaboration of projects for transformers with an unconventional ferromagnetic core is important, as it contributes to the construction of transformers with better performance. This work aimed to develop an algorithm for the design of a single-phase transformer with an LL core, which is capable of converting a voltage level of 220 V into a voltage of 110 V, supporting a current of 1 A in its secondary winding. A prototype was built and tests were carried out to verify its behavior and it was verified that the transformer's behavior is in accordance with what was designed.

**Keywords:** Single phase transformer; Algorithm; Core; Windings; Essay.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do transformador ideal .....	15
Figura 2 – Lâminas de aço silício .....	17
Figura 3 – Disposição das camadas a) Impar de chapas e b) Par de chapas .....	17
Figura 4 – Modelo do transformador com a) Núcleo envolvido e b) Núcleo envolvente .....	18
Figura 5 – Disposição dos enrolamentos no núcleo a) Envolvido e b) Envolvente ...	19
Figura 6 – Circuito equivalente do transformador referido ao secundário. ....	20
Figura 7 – Circuito do ensaio a vazio do transformador .....	20
Figura 8 – Circuito do ensaio de curto-circuito do transformador .....	21
Figura 9 – Dimensões do núcleo .....	22
Figura 10 – Peças do carretel .....	26
Figura 11 – Carretel .....	27
Figura 12 – Carretel com papel isolante.....	27
Figura 13 – Dispositivo para enrolar bobinas .....	28
Figura 14 – Fios esmaltados AWG20 e AWG23 .....	28
Figura 15 – Enrolamento primário a) Sem papel isolante e b) Com papel isolante...	29
Figura 16 – Enrolamento primário e secundário no carretel.....	30
Figura 17 – Desenho das dimensões das lâminas L.....	31
Figura 18 – Carretel posicionado na janela do núcleo do transformador .....	31
Figura 19 – Transformador monofásico com núcleo LL .....	32
Figura 20 – Medição da resistência de isolamento do transformador .....	35
Figura 21 – Ensaio de circuito aberto do transformador monofásico .....	36
Figura 22 – Ensaio do transformador monofásico com carga resistiva .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do algoritmo de cálculo do transformador monofásico. ....	25
Tabela 2 – Tabela de materiais utilizados no transformador monofásico.....	33
Tabela 3 – Ensaio de continuidade do transformador.....	34
Tabela 4 – Ensaio da resistência de isolamento do transformador.....	36
Tabela 5 – Ensaio de circuito aberto do transformador.....	37
Tabela 6 – Ensaio do transformador com carga resistiva. ....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
3. METODOLOGIA .....	14
4. TRANSFORMADOR.....	15
4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	15
4.2. CONSTRUÇÃO .....	16
4.2.1. Núcleo.....	16
4.2.2. Enrolamentos .....	18
4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE .....	19
4.4. ENSAIOS EM TRANSFORMADORES .....	20
4.4.1. Ensaio a Vazio .....	20
4.4.2. Ensaio de Curto-Circuito .....	21
4.5. ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO .....	21
4.6. MONTAGEM DO TRANSFORMADOR.....	26
4.6.1. Fabricação do Carretel.....	26
4.6.2. Enrolamentos .....	28
4.6.3. Núcleo.....	30
4.6.4. Materiais utilizados.....	33
5. RESULTADOS.....	34
5.1. ENSAIO DE CONTINUIDADE DO TRANSFORMADOR .....	34
5.2. ENSAIO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR.....	35
5.3. ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO .....	36
5.4. ENSAIO COM CARGA.....	37
6. CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS.....	41
APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR .....	43
ANEXO A – LÂMINAS DE AÇO SILÍCIO PARA NÚCLEO LL.....	46

ANEXO B – TABELA DE CONDUTORES .....	47
ANEXO C – TABELA DOS COEFICIENTES K, M E N .....	48

## 1. INTRODUÇÃO

O problema de projeto e fabricação de máquinas elétricas é construir, o mais economicamente possível, uma máquina que atenda um determinado conjunto de especificações (MALAGOLI, 2014).

Transformadores são equipamentos elétricos utilizados em larga escala. Sua utilização no sistema elétrico é dada em sistemas de corrente alternada (CA), permitindo adequar tensões e correntes de acordo com as necessidades de cada equipamento.

O transformador é um dispositivo elétrico que apresenta uma relação próxima com as máquinas elétricas, convertendo energia elétrica CA, de um nível de tensão, em energia elétrica CA de outro nível de tensão (CHAPMAN, 2013).

Embora o transformador estático não seja um dispositivo de conversão de energia, é um componente indispensável de muitos sistemas de conversão de energia (FITZGERALD, 2006).

Para Malagoli (2014), melhorar a eficiência energética e reduzir os custos de materiais ativos (ferro e cobre) do transformador, pode reduzir os pesos dos materiais ativos utilizados, através da redução do diâmetro e comprimento do transformador, isto é, através da minimização do volume total do equipamento.

Os transformadores proporcionam a redução ou a elevação da tensão alternada, reduzindo as perdas energéticas entre o ponto de geração e o ponto de consumo da energia elétrica.

A invenção do transformador e o desenvolvimento simultâneo de estações geradoras de energia CA eliminaram para sempre as restrições de alcance e de capacidade dos sistemas de energia elétrica (CHAPMAN, 2013).

Para Fitzgerald (2006), o transformador possibilita a geração elétrica e a transferência da energia nas tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da energia na tensão mais adequada para um dado dispositivo particular.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho visa projetar e construir um transformador monofásico com núcleo LL, com enrolamentos de cobre e que converta a tensão de 220 V para 110 V, tendo capacidade de suportar 1 A de corrente elétrica secundária.

### 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral será necessário:

- a) Estudo sobre projeto de transformadores monofásicos;
- b) Desenvolver um algoritmo para o projeto de um transformador monofásico;
- c) Adquirir materiais adequados para a construção do equipamento;
- d) Efetuar a montagem do transformador;
- e) Realizar ensaios no protótipo de transformador;
- f) Analisar se o protótipo atingiu o desempenho esperado e calculado durante a fase de projeto.

### 3. METODOLOGIA

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica sobre projeto de transformadores monofásicos. Serão definidas metas do transformador: regulação da tensão; elevação de temperatura e rendimento. Será implementado um algoritmo para as simulações.

Após serem realizadas as simulações, será construído o protótipo de transformador monofásico, onde os enrolamentos serão montados em um carretel e posteriormente irá ocorrer a montagem do núcleo ferromagnético.

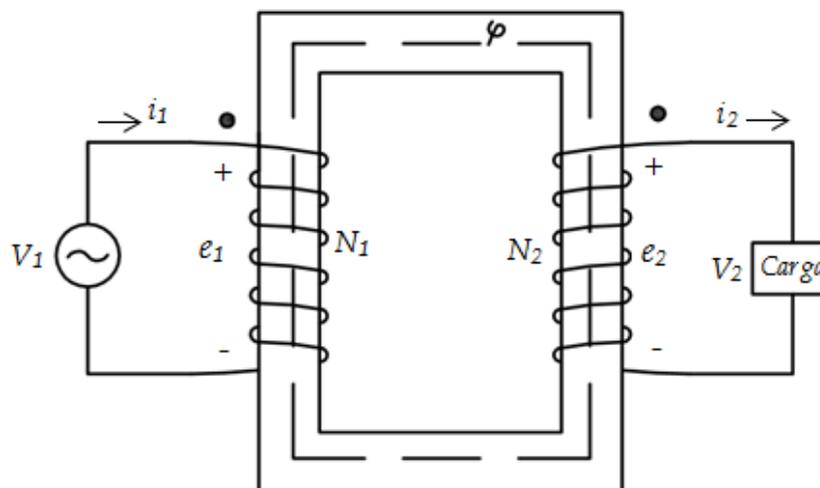
Com o protótipo pronto serão feitos ensaios e medições necessários para a comparação dos resultados obtidos com as metas e especificações da primeira fase de projeto.

## 4. TRANSFORMADOR

Nesse capítulo serão apresentados o princípio de funcionamento do transformador, suas características, bem como os seus elementos construtivos, ensaios que podem ser realizados para verificar seu correto funcionamento e o cálculo para dimensionamento do transformador monofásico com núcleo LL.

### 4.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Transformadores funcionam com base no princípio da indução eletromagnética, onde ao ser energizada uma bobina com corrente alternada, o campo eletromagnético produzido induz uma tensão em outra bobina, como pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1 – Representação do transformador ideal.**  
**Fonte: Adaptado Fitzgerald, 2006.**

A essência do funcionamento de um transformador requer apenas que haja um fluxo comum, variável no tempo, enlaçando dois enrolamentos. Tal ação pode ocorrer entre enrolamentos acoplados pelo ar, no entanto, o acoplamento entre enrolamentos pode ser muito mais eficiente usando-se um núcleo de ferro ou de material ferromagnético (FITZGERALD, 2006).

## 4.2. CONSTRUÇÃO

Transformadores monofásicos são constituídos basicamente dos seguintes componentes.

### 4.2.1. Núcleo

Para que a ligação magnética seja a mais perfeita possível, é necessário que os circuitos sejam enrolados sobre um núcleo magnético de pequena relutância. Este núcleo deverá ter elevada permeabilidade e por isso seus entreferros devem ser muito reduzidos (MARTIGNONI, 1991).

A utilização de um núcleo de ferro com alta permeabilidade magnética reduz perdas, pois possibilita que a maior parte do fluxo magnético circule pelo caminho fechado formado por esse núcleo, permitindo que o fluxo passe pelos enrolamentos primário e secundário, que são eletricamente isolados, com maior facilidade.

Se o núcleo for composto de ferro ou de outros metais similares (coletivamente denominados materiais ferromagnéticos), então essencialmente todo o campo magnético produzido pela corrente permanecerá dentro do núcleo (CHAPMAN, 2013).

Chapas de aço-silício de 0,014 polegadas são utilizadas em transformadores que operam em baixas frequências. O aço-silício tem as propriedades desejáveis de baixo custo e baixas perdas no núcleo, apresentando alta permeabilidade em densidades de fluxo elevadas (1,0 a 1,5 T) (FITZGERALD, 2006).

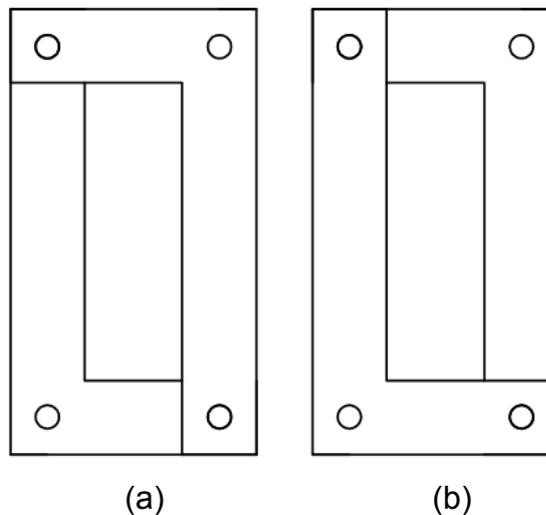
Para tornar mínima a corrente magnetizante necessária para a produção do fluxo, seria aconselhável construir os núcleos com lâminas montadas numa só peça para evitar os entreferros nas junções. Neste caso seria necessário enrolar os circuitos diretamente sobre o núcleo. Por motivos de construção, é preferível executar os enrolamentos separadamente sobre formas apropriadas, para colocá-los depois sobre o núcleo. Daí resulta a necessidade de construir o núcleo em partes separadas para compô-los depois de montados os enrolamentos (MARTIGNONI, 1991).

Geralmente são utilizadas chapas de aço-silício laminadas para reduzir a circulação de correntes parasitas no núcleo, como as mostradas na Figura 2, pois essas chapas aumentam a resistividade e, com a diminuição dessas correntes também são reduzidas as perdas por correntes de Foucault.



**Figura 2 – Lâminas de aço silício.**  
Fonte: (Autoria própria).

O núcleo pode ter suas lâminas divididas em diversos formatos. Para o estudo em questão, o núcleo do transformador será construído com lâminas no formato LL, que serão sobrepostas de forma a intercalar as camadas para reduzir o entreferro, sendo que uma camada será montada como indicado na Figura 3a, e a camada seguinte será sobreposta a anterior de acordo com a Figura 3b.



**Figura 3 – Disposição das camadas a) Ímpar de chapas e b) Par de chapas.**  
Fonte: (Autoria própria).

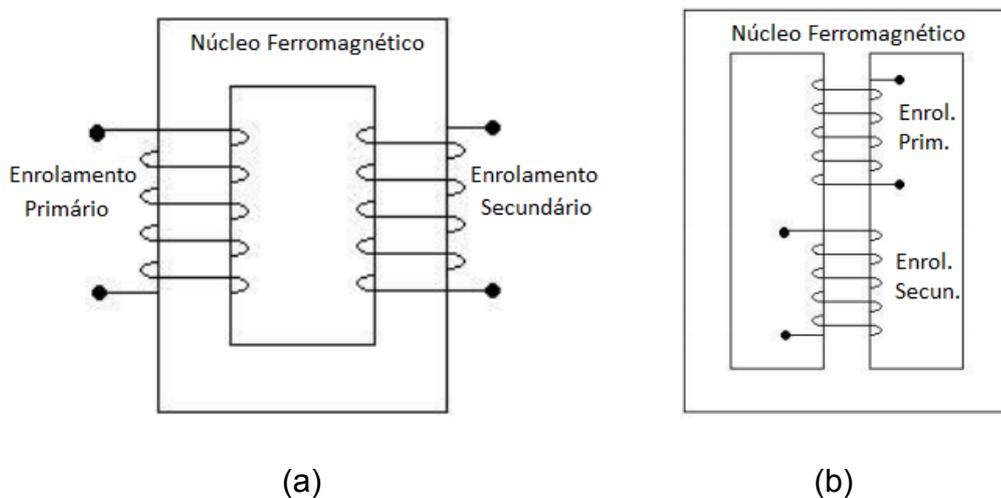
#### 4.2.2. Enrolamentos

Um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. O fluxo comum estabelece um enlace com o outro enrolamento, o secundário, induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência (FITZGERALD, 2006).

De acordo com o núcleo, os transformadores monofásicos são divididos em dois tipos: de núcleo envolvido e de núcleo envolvente.

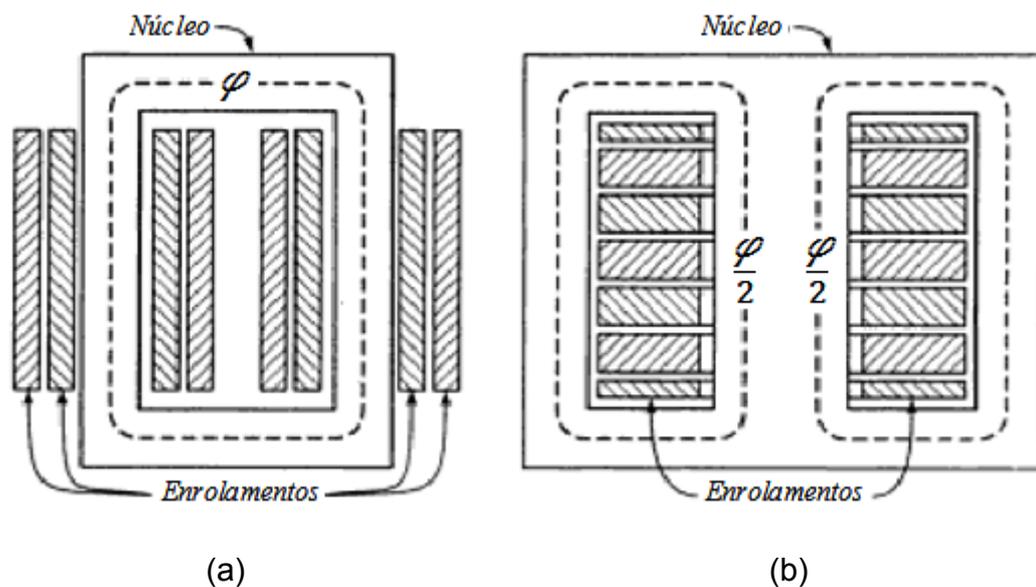
O transformador de núcleo envolvido, que será o formato de núcleo utilizado nesse trabalho, consiste em dois enrolamentos que envolvem um núcleo retangular, como mostrado na Figura 4a. Já o transformador de núcleo envolvente, consiste em um núcleo composto por três pernas, onde as bobinas são alojadas no centro do núcleo como mostra a Figura 4b.

Mesmo que a maior parte do fluxo esteja circulando através do núcleo, também ocorre a produção de um fluxo adicional que enlaça cada enrolamento separadamente, sendo denominado fluxo disperso, e exerce influência no desempenho do transformador.



**Figura 4 – Modelo do transformador com a) Núcleo envolvido e b) Núcleo envolvente.**  
**Fonte: (Autoria própria).**

Para reduzir o fluxo disperso, segundo Fitzgerald (2006), nos transformadores de núcleo envolvido, cada enrolamento consiste em duas seções, uma em cada perna do núcleo, e os enrolamentos do primário e do secundário são bobinas concêntricas, como mostrado na Figura 5a. Nos transformadores de núcleo envolvente, variações de configuração de enrolamentos concêntricos podem ser usadas, ou então, os enrolamentos podem consistir em diversas bobinas que são montadas em uma pilha, intercalando-se as bobinas do primário e do secundário, de acordo com a Figura 5b.



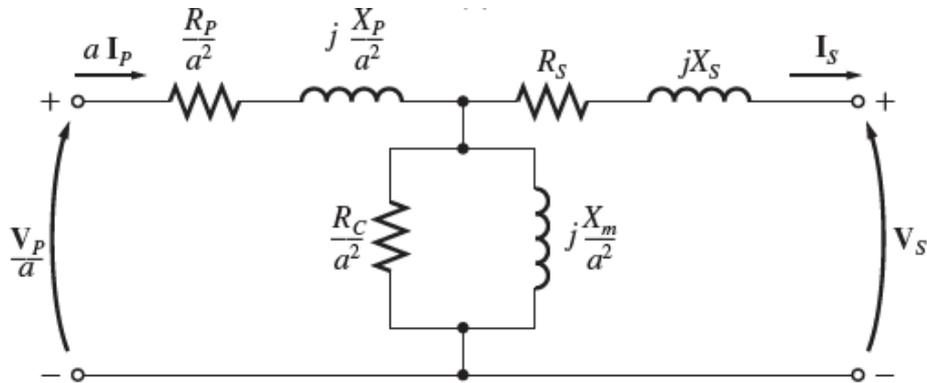
**Figura 5 – Disposição dos enrolamentos no núcleo a) Envolvido e b) Envolvente.**  
 Fonte: Fitzgerald, 2006.

#### 4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE

A obtenção dos componentes do circuito equivalente pode ser feita através de ensaios a vazio e de curto-circuito.

O circuito equivalente, representado na Figura 6, é um modelo capaz de representar o comportamento real de um transformador. Com ele podem ser obtidos parâmetros utilizados para o cálculo das perdas do transformador. Os componentes desse modelo são: tensão do primário  $V_p$ ; tensão do secundário  $V_s$ ; corrente do primário  $I_p$ ; corrente do secundário  $I_s$ ; relação de transformação  $a$  (não confundir  $a$  com  $\alpha$ ); resistência do enrolamento primário  $R_p$ ; resistência do enrolamento

secundário  $R_s$ ; reatância devido a indutância de dispersão do primário  $X_p$ ; reatância devido a indutância de dispersão do secundário  $X_s$ ; resistência referente as perdas no núcleo  $R_c$ ; e a reatância de magnetização  $X_m$ .

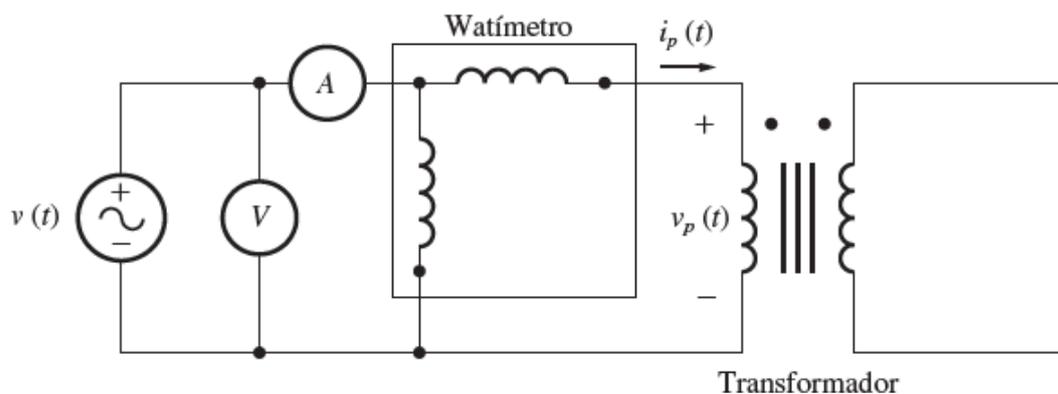


**Figura 6 – Circuito equivalente do transformador referido ao secundário.**  
Fonte: Chapman, 2013.

#### 4.4. ENSAIOS EM TRANSFORMADORES

##### 4.4.1. Ensaio a Vazio

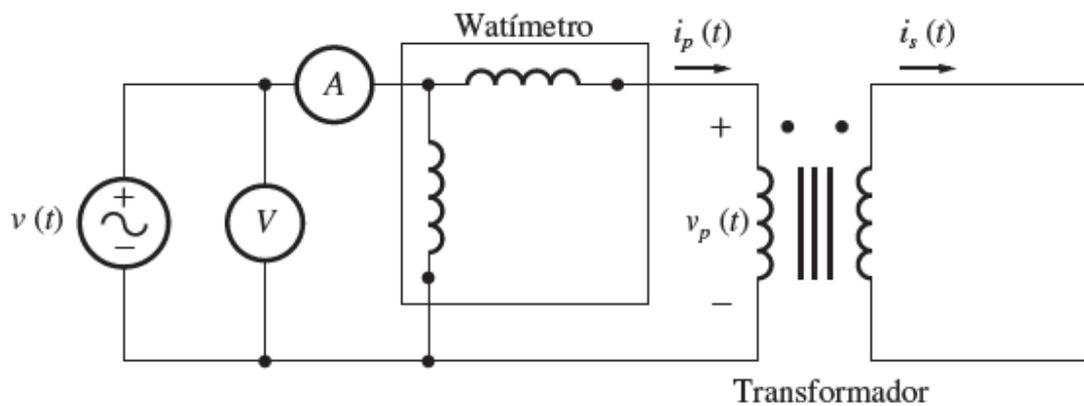
No ensaio a vazio ou de circuito aberto, como pode ser verificado na Figura 7, o enrolamento primário é conectado a fonte de energia na tensão nominal, enquanto o enrolamento secundário está com seus terminais em aberto. Com a utilização de um voltímetro, um amperímetro e um wattímetro são medidos os valores da tensão a vazio  $V_{vz}$ , corrente a vazio  $I_{vz}$  e potência a vazio  $P_{vz}$ , que é a perda no ferro.



**Figura 7 – Circuito do ensaio a vazio do transformador.**  
Fonte: Chapman, 2013.

#### 4.4.2. Ensaio de Curto-Circuito

Através do ensaio de curto-circuito é possível determinar os valores de  $R_c$  e  $X_m$ . Nesse ensaio o enrolamento primário do transformador é alimentado por um *varivolt*, cuja tensão é aplicada de forma gradativa até que o enrolamento secundário, que está curto circuitado, atinja a corrente nominal. O esquema de ligação para esse ensaio pode ser verificado na Figura 8.



**Figura 8 – Circuito do ensaio de curto-circuito do transformador.**  
**Fonte: Chapman, 2013.**

Para o ensaio de curto-circuito são utilizados um voltímetro, um amperímetro e um wattímetro, para a medição da tensão de curto-circuito  $V_{cc}$ , corrente de curto-circuito  $I_{cc}$  e potência de curto-circuito  $P_{cc}$ , que é a perda total no cobre.

#### 4.5. ALGORITMO DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo serão descritos os cálculos e procedimentos para o projeto de um transformador monofásico, com enrolamentos de cobre e núcleo ferromagnético no formato LL.

Será considerado para o projeto do transformador que ele seja alimentado com uma tensão de entrada  $V_{in}$  de 220 V e com uma frequência  $f$  de 60 Hz em seu enrolamento primário, tendo em seu enrolamento secundário uma tensão  $V_o$  de 110 V e que suporte uma corrente elétrica  $I_o$  de 1 A no enrolamento de baixa tensão. É esperado também que o transformador tenha um rendimento  $R_{end}$  em torno de

95%, assim como a regulação de tensão *alfa* seja de 0,05 e a temperatura *Tr* fique abaixo de 55°C.

A potência de saída do transformador *Po* dada em watts é obtida pela seguinte expressão:

$$P_o = V_o * I_o \text{ [ W ]} \quad (1)$$

Da expressão (1) é obtida a equação da potência total do transformador:

$$P_t = P_o * (( 1 / R_{end}) + 1) \text{ [ W ]} \quad (2)$$

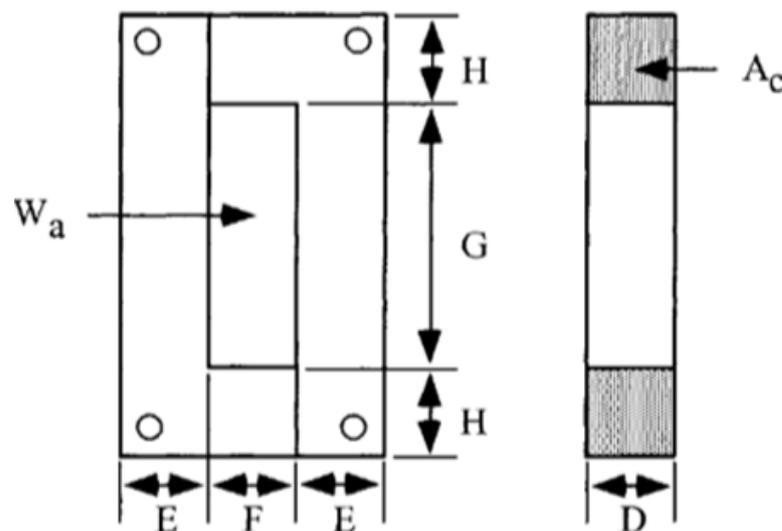
Considerando a constante para a onda senoidal *Kf* de 4,44 e 1,2 T (Tesla) para a indução magnética *Bm* do transformador, é possível encontrar o valor da constante de condições elétrica *Ke* dada por:

$$K_e = 0,145 * K_f^2 * f^2 * B_m^2 * 10^{-4} \quad (3)$$

Através de (3) pode ser encontrado o valor da constante de geometria do núcleo *Kg* utilizada para a escolha das lâminas de acordo com:

$$K_g = P_t / ( 2 * K_e * \alpha * 100 ) \text{ [ cm }^5 \text{ ]} \quad (4)$$

Definida a lâmina de aço silício a ser utilizada na construção do núcleo do transformador, de código 3-107L e com o valor da constante *Kg* são obtidas as dimensões do núcleo pela tabela do Anexo A, conforme indicado na Figura 9.



**Figura 9 – Dimensões do núcleo.**  
**Fonte: Colonel, 2004.**

Também pela tabela do Anexo A são encontradas as informações de: comprimento do caminho magnético  $Mpl$ ; peso do núcleo  $Wtfe$ ; peso do cobre  $Wtcu$ ; comprimento médio da espira  $Mlt$ ; área do núcleo  $Ac$ ; área da janela do núcleo  $Wa$ ; produto entre as áreas  $Ap$ ; e a área necessária para dissipar o calor  $At$ .

O número de espiras do enrolamento primário  $Np$  é calculado pela equação:

$$Np = Vin * 10^4 / ( Kf * Bm * f * Ac ) [Espiras] \quad (5)$$

Com o fator de utilização da janela  $Ku$  definido em 0,4 pode ser calculada a densidade de corrente  $J$  por:

$$J = Pt * 10^4 / ( Kf * Ku * Bm * f * Ap ) [ A / cm^2 ] \quad (6)$$

A corrente de entrada  $lin$  é calculada com:

$$lin = Po / ( Vin * Rend ) [ A ] \quad (7)$$

A partir de (6) e (7) é obtido (8):

$$Awpb = lin / J [ cm^2 ] \quad (8)$$

Onde  $Awpb$  é a área do fio de cobre nú sem revestimento do enrolamento primário, que tendo sido calculado, pode ser encontrado com o auxílio da tabela do Anexo B, o fio de cobre a ser utilizado no enrolamento de maior tensão. Na referida tabela também estão as informações do diâmetro do fio de cobre primário  $Diamp$ , área do fio de cobre do enrolamento primário com revestimento  $Awp$  e o valor de microohms por centímetro do fio  $Microohmsporcmp$ .

O cálculo da resistência primária é dado pela equação:

$$Rp = Mlt * Np * Microohmsporcmp * 10^{-6} [ \Omega ] \quad (9)$$

Considerando, a corrente do enrolamento primário  $lp$  como sendo igual a  $lin$  e a tensão de saída  $Vs$  igual a  $Vo$ , tem-se:

$$Pp = lp^2 * Rp \quad [ W ] \quad (10)$$

Em que  $Pp$  são as perdas no cobre no enrolamento primário e a equação:

$$Ns = ( Np * Vs / Vin ) * ( 1 + alfa ) [ Espiras ] \quad (11)$$

Onde  $Ns$  é o número de espiras do enrolamento secundário do transformador.

Para o cálculo da área do fio nú de cobre do enrolamento secundário  $A_{wsb}$  é utilizada a expressão:

$$A_{wsb} = I_o / J [cm^2] \quad (12)$$

Pelo valor obtido da equação (11) e utilizando a tabela do Anexo B é encontrado o fio de cobre para o enrolamento secundário, como também os valores do diâmetro do fio do secundário  $D_{iams}$ , área do fio do secundário com revestimento  $A_{ws}$  e a resistência de fio de cobre  $Microohmsporcms$ .

Com isso é calculada a resistência do enrolamento secundário  $R_s$  com:

$$R_s = Mlt * N_s * Microohmsporcms * 10^{-6} [\Omega] \quad (13)$$

Considerando a corrente do secundário  $I_s$  igual a  $I_o$  são calculadas as perdas no cobre do enrolamento secundário  $P_s$  pela equação:

$$P_s = I_s^2 * R_s [W] \quad (14)$$

Do resultado das expressões (10) e (14) são encontradas as perdas totais nos enrolamentos de cobre por:

$$P_{cu} = P_p + P_s [W] \quad (15)$$

A partir disso é possível verificar se a regulação de tensão do transformador está dentro da meta estipulada em projeto, utilizando o seguinte cálculo:

$$alfacalculado = P_{cu} / P_o \quad (16)$$

Podendo assim se certificar que a escolha das lâminas do núcleo e das bitolas de fios para os enrolamentos estão corretas.

O próximo passo é a escolha da lâmina de aço silício. Com o auxílio da tabela do Anexo C foi optada pela lâmina de espessura 14Mil. Nela são encontrados os valores dos coeficientes  $K$ ,  $M$  e  $N$ , utilizados para o cálculo das perdas no ferro  $P_{fe}$  pelas seguintes equações:

$$Wattsporkg = K * f^M * B_m^N \quad (17)$$

$$P_{fe} = Wattsporkg * W_{tfe} \quad (18)$$

A perda total do transformador é dada por:

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

Para verificar se o rendimento está dentro da meta é utilizada a equação:

$$Rend_{calculado} = P_o / ( P_o + P_{soma} ) \quad (20)$$

Assim como para verificar se a temperatura está com o valor da meta pretendida  $T_{calculado}$  são utilizadas as seguintes expressões:

$$P_{porarea} = P_{soma} / A_t \quad (21)$$

$$T_{calculado} = 450 * P_{porarea}^{0,826} [ ^\circ C ] \quad (22)$$

Em que  $P_{porarea}$  é a perda por unidade de área.

Finalizando, é calculado o coeficiente de utilização da janela para o enrolamento primário  $K_{us}$  e para o enrolamento secundário  $K_{up}$ , levando em consideração a área do fio de cobre do primário e secundário corrigido,  $A_{wpb_{novo}}$  e  $A_{wsb_{novo}}$  respectivamente, conforme as equações:

$$K_{up} = ( N_p * A_{wpb_{novo}} ) / W_a [ \% ] \quad (23)$$

$$K_{us} = ( N_s * A_{wsb_{novo}} ) / W_a [ \% ] \quad (24)$$

$$K_{unovo} = K_{up} + K_{us} [ \% ] \quad (25)$$

A Tabela 1 mostra os parâmetros de cálculo do transformador monofásico que foram encontrados através do algoritmo de dimensionamento.

**Tabela 1 – Resultados do algoritmo de cálculo do transformador monofásico.**

	Nomenclatura	Valor	Unidade
<b>Dimensões do Núcleo</b>	D	4.762	cm
	F	2.065	cm
	E	1.567	cm
	G	6.350	cm
<b>Enrolamento Primário</b>	$A_{wgp}$	AWG 23	AWG
<b>Número de Espiras do Primário</b>	$N_p$	909	Espiras
<b>Área do Fio Nú do Primário</b>	$A_{wpb}$	0.0030	cm <sup>2</sup>
<b>Enrolamento Secundário</b>	$A_{wgs}$	AWG 20	AWG
<b>Número de Espiras do Secundário</b>	$N_s$	478	Espiras
<b>Área do Fio Nú do Secundário</b>	$A_{wsb}$	0.0056	cm <sup>2</sup>

#### 4.6. MONTAGEM DO TRANSFORMADOR

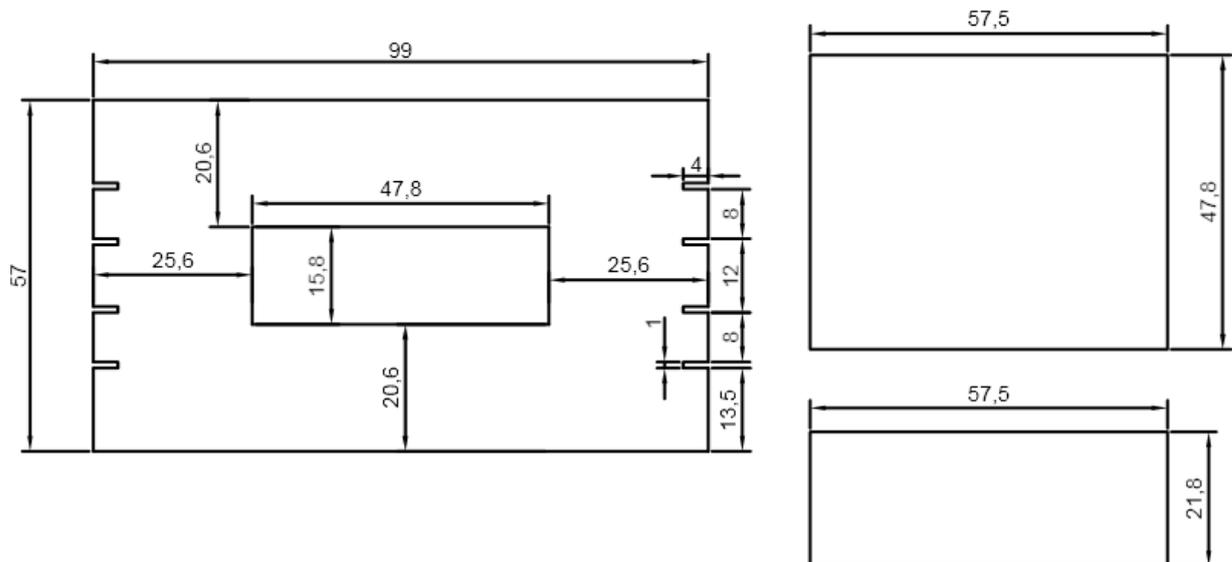
Para o processo de montagem do transformador foram seguidos os seguintes passos.

##### 4.6.1. Fabricação do Carretel

Sendo conhecidas as dimensões do núcleo do transformador é possível a construção do carretel. Foi optado pela fabricação do carretel com lâminas de mdf de 2,8 mm de espessura, pois atendem as condições de trabalho e as características construtivas do protótipo.

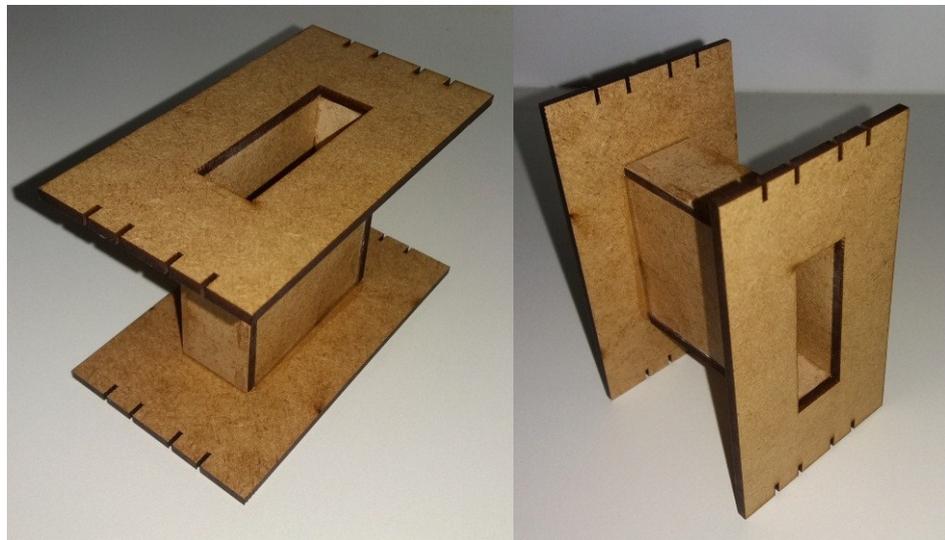
Inicialmente com a utilização do software *AutoCad* foram desenhadas as peças necessárias para a fabricação do carretel que será utilizado para enrolar as espiras dos enrolamentos do protótipo.

A Figura 10 apresenta o formato e as dimensões das peças em milímetros para a montagem do carretel.



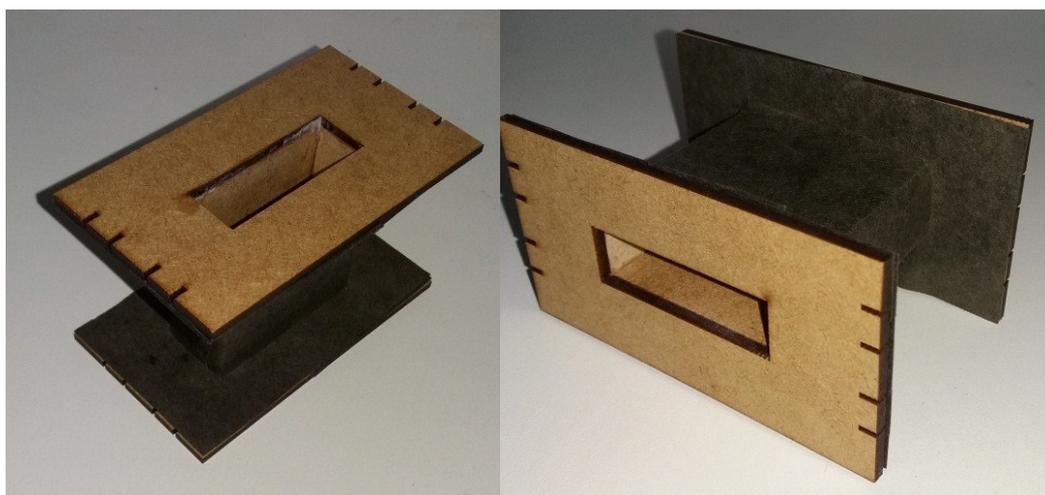
**Figura 10 – Peças para o carretel.**  
**Fonte: (Autoria própria).**

O desenho com as dimensões foram enviadas a empresa *Via da Arte* para serem cortadas. Posteriormente as peças foram montadas e coladas dando formato final ao carretel da Figura 11.



**Figura 11 – Carretel.**  
Fonte: (Autoria própria).

Sobre as partes do carretel que entrariam em contato com os enrolamentos, como pode ser verificado na Figura 12, foi aplicado um revestimento com papel isolante para transformador.



**Figura 12 – Carretel com papel isolante.**  
Fonte: (Autoria própria).

#### 4.6.2. Enrolamentos

Os enrolamentos foram enrolados de forma manual com o auxílio de um suporte com manivela confeccionado artesanalmente. A Figura 13 ilustra o carretel inserido no dispositivo durante o processo de bobinagem.



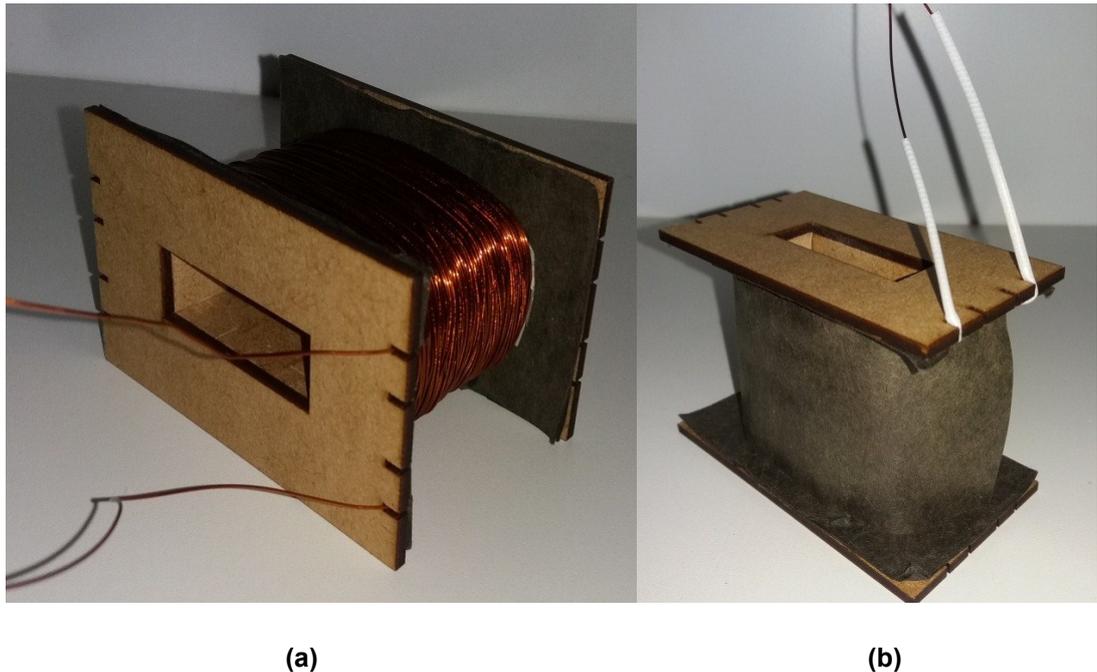
**Figura 13 – Dispositivo para enrolar bobinas.**  
Fonte: (Autoria própria).

Através de um cálculo aproximado levando em consideração o número de espiras, tanto do enrolamento primário quanto secundário, foram adquiridos os fios esmaltados AWG20 e AWG23 na empresa *Valdecir Boeno Eletromotores* de rebobinagem de motores e transformadores. Esses fios estão ilustrados na Figura 14.



**Figura 14 – Fios esmaltados AWG20 e AWG23.**  
Fonte: (Autoria própria).

Foi iniciado o processo prendendo o carretel no dispositivo e fixado uma das extremidades do fio esmaltado AWG23. Foram enroladas 909 voltas do condutor como mostrado na Figura 15a. Então foi inserido um acabamento nas extremidades do fio e também colocado uma volta de papel isolante para separar o enrolamento primário e enrolamento secundário, de acordo com a Figura 15b.

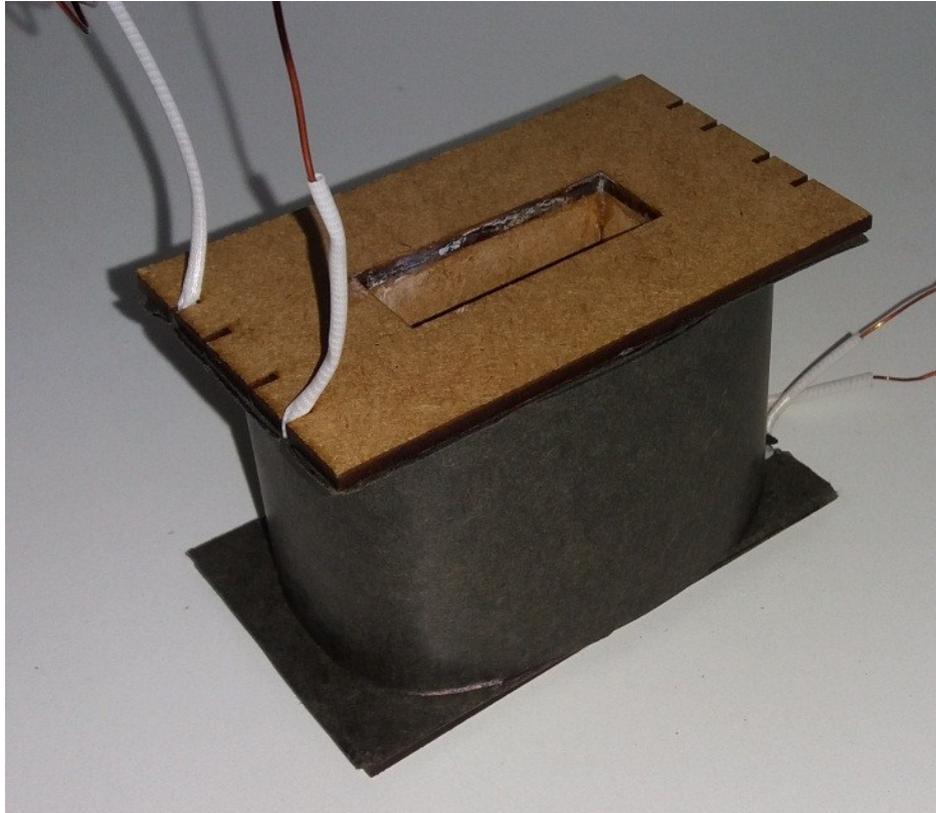


**Figura 15 – Enrolamento primário a) Sem papel isolante e b) Com papel isolante.**  
**Fonte: (Autoria própria).**

Então se iniciou o processo com o enrolamento secundário. Uma das extremidades do fio esmaltado AWG20 foi fixada ao carretel, sendo posteriormente enroladas 478 voltas ao seu redor. Nesse processo é importante seguir a mesma orientação de giro realizada no enrolamento primário.

Finalizada a quantidade de voltas previamente calculadas, é colocado um acabamento nas extremidades do fio e também uma camada de papel isolante de transformador para proteger o verniz de isolação dos fios.

A Figura 16 mostra os enrolamento primário e enrolamento secundário enrolados no carretel.



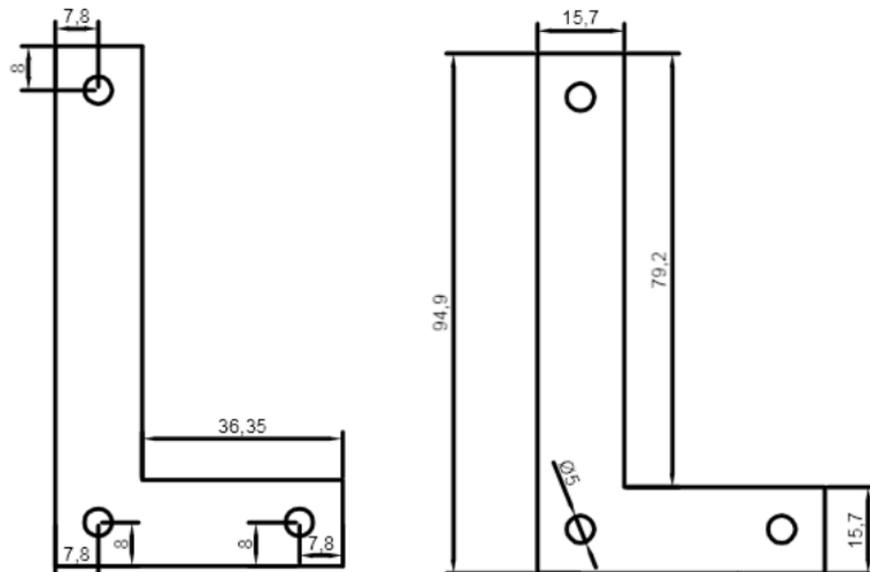
**Figura 16 – Enrolamento primário e secundário no carretel.**  
Fonte: (Autoria própria).

#### 4.6.3. Núcleo

Com os enrolamentos enrolados no carretel e devidamente isolados foi efetuada a montagem do núcleo do transformador.

A partir dos parâmetros do transformador que foram calculados, foram desenhadas as lâminas de formato L com as dimensões de projeto utilizando o software *AutoCad*, sendo esse desenho encaminhado para a empresa *Flessak* para o corte do material.

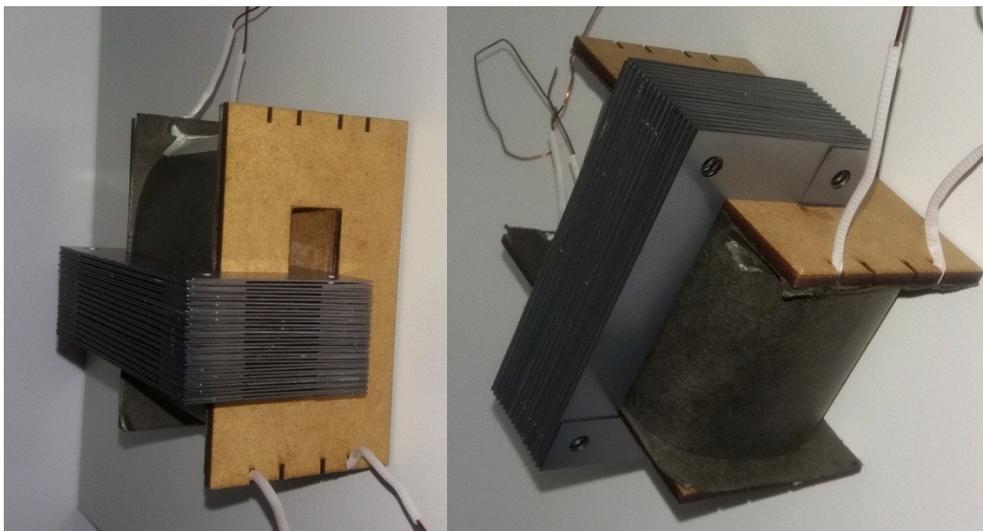
A Figura 17 apresenta as dimensões em milímetros das lâminas de aço silício de formato L, utilizadas para a montagem do núcleo ferromagnético, podendo ser observados furos nessas lâminas utilizados para a fixação do núcleo.



**Figura 17 – Desenho das dimensões das lâminas L.**  
Fonte: (Autoria própria).

Para a montagem do núcleo o conjunto de lâminas foi disposto no carretel de forma a intercalar camadas, para diminuir o entreferro e formar um núcleo robusto.

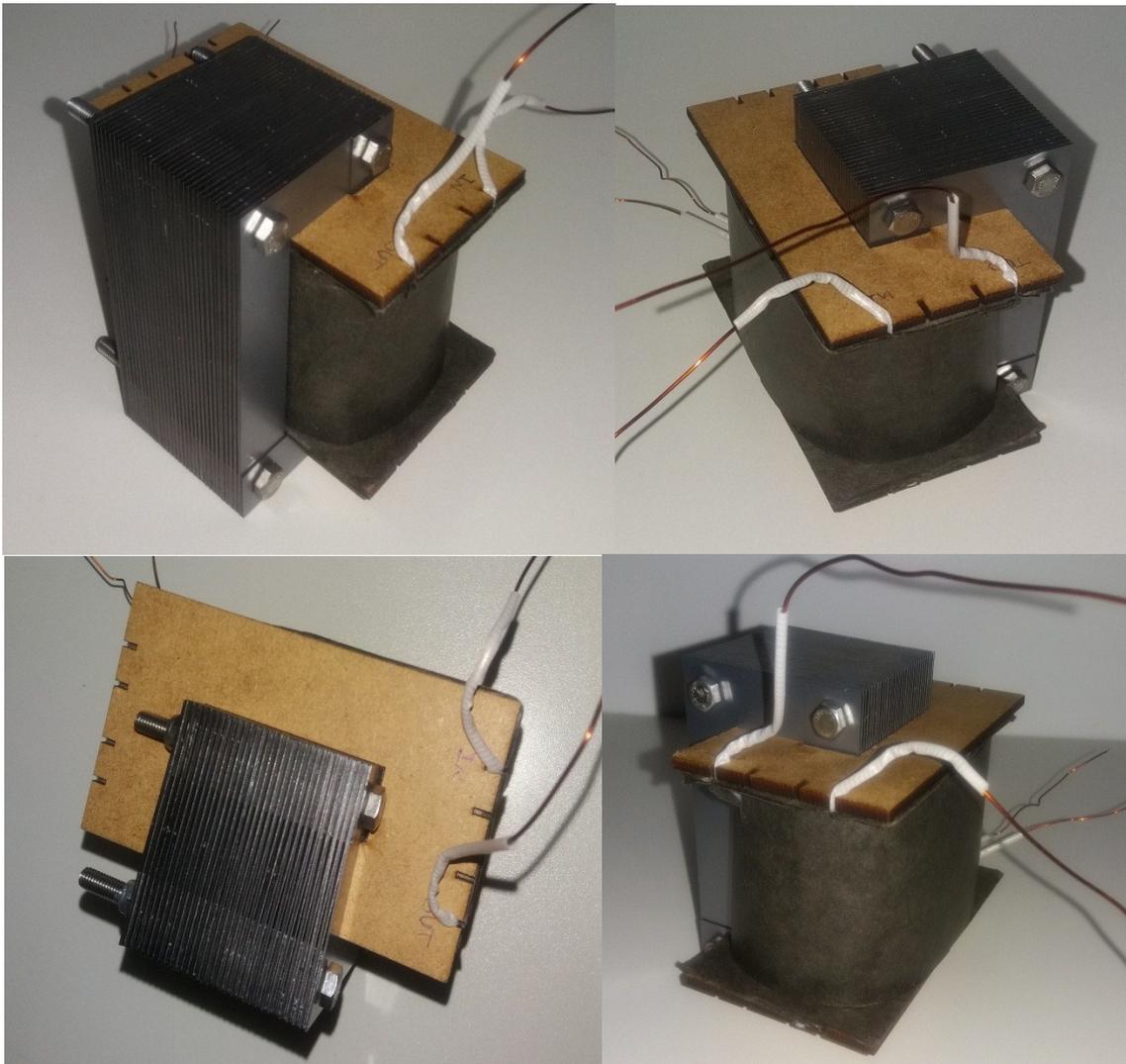
Como pode ser observado na Figura 18, os enrolamentos e carretel ficam posicionados em uma das pernas do núcleo LL.



**Figura 18 – Carretel posicionado na janela do núcleo do transformador.**  
Fonte: (Autoria própria).

Após todas as camadas de lâminas serem alojadas no carretel com o preenchimento do espaço da janela, são inseridos parafusos de fixação nos furos das lâminas. São utilizadas porcas para efetuar o aperto, tendo como finalidade tornar o núcleo firme e resistente.

Para o núcleo foram utilizadas 116 unidades de lâminas de aço silício de 0,5 mm de espessura. A montagem finalizada do transformador monofásico com núcleo LL pode ser observada na Figura 19.



**Figura 19 – Transformador monofásico com núcleo LL.  
Fonte: (Autoria própria).**

#### 4.6.4. Materiais utilizados

A Tabela 2 mostra os materiais utilizados para a fabricação do transformador, assim como a sua quantidade e referido valor dos componentes. Para a construção do transformador foi feito um investimento de R\$ 561,50 em diversos materiais, sendo que as lâminas para o núcleo ferromagnético foi a componente que mais contribuiu para o valor final do protótipo, seguido dos fios de cobre utilizados nos enrolamentos que contribuíram significativamente.

**Tabela 2 – Tabela de materiais utilizados no transformador monofásico.**

<b>Tabela de Materiais</b>					
<b>Dados dos Fios dos Enrolamentos</b>					
	Cód AWG	Diâmetro (mm)	N° Voltas	Comprimento (m)	Valor (R\$)
<b>Fio Nú Cu Esmaltado Primário</b>	AWG 23	0,632	909	265	65
<b>Fio Nú Cu Esmaltado Secundário</b>	AWG 20	0,879	478	140	60
<b>Dados das Lâminas do Núcleo</b>					
	Material	Espessura (mm)	Código	Qtde (UN)	Valor (R\$)
<b>Lâminas L</b>	Aço Silício	0,5	3-107L	116	410
<b>Dados do Carretel</b>					
	Material	Espessura (mm)		Qtde (UN)	Valor (R\$)
<b>Carretel</b>	MDF	2,8		1	5,5
<b>Outros Materiais</b>					
	Material	Tipo	Comprimento (mm)	Qtde (UN)	Valor (R\$)
<b>Parafusos</b>	Aço Inóx	M5	60	4	8
<b>Porcas</b>	Aço Inóx	M5	-	4	8
<b>Material Isolante</b>	Papel	Isolante	-	1	5
				<b>Total</b>	<b>R\$ 561,50</b>

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados que foram obtidos através dos ensaios realizados no transformador monofásico projetado.

A relação de transformação ( $V_1 / V_2 = N_1 / N_2$ ) foi comprovada, já que ( $220 / 110 = 2$ ) e ( $909 / 478 = 1,9$ ).

### 5.1. ENSAIO DE CONTINUIDADE DO TRANSFORMADOR

Com o ensaio de continuidade é possível verificar se o transformador está em curto-circuito. Seja entre os enrolamentos primário e secundário, ou entre o núcleo ferromagnético e os enrolamentos. Este teste também permite verificar se o fio de cobre rompeu durante a bobinagem.

O curto-circuito nesta situação pode ocorrer em virtude de vários fatores, como o rompimento do material isolante dos fios esmaltados, a falta de isolamento adequada entre bobinas ou também o núcleo ferromagnético estar em contato com os enrolamentos sem o devido material isolante entre eles.

Esse teste é feito com o auxílio de um multímetro. Com esse aparelho de medição na escala de continuidade, suas ponteiros são conectadas aos pontos de medição. A Tabela 3 mostra o resultado da medição de continuidade do transformador, sendo que “Sim” indica que ocorreu continuidade no teste e “Não” indica que não ocorreu continuidade entre as partes medidas.

O transformador monofásico foi aprovado no teste de continuidade.

**Tabela 3 – Ensaio de continuidade do transformador.**

<b>Teste de Continuidade</b>			
<b>Enrolamentos</b>	<b>Primário</b>	<b>Secundário</b>	<b>Carcaça</b>
<b>Primário</b>	Sim	Não	Não
<b>Secundário</b>	Não	Sim	Não

## 5.2. ENSAIO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO DO TRANSFORMADOR

Com esse ensaio é possível verificar o nível de resistência de isolamento do transformador. Utilizando um megôhmetro, são conectadas as pontas de prova do instrumento de medição nos terminais do transformador. São efetuadas medições entre os enrolamentos primário e secundário e também entre a carcaça e cada um dos enrolamentos.

O nível de isolamento ficou na escala de Gigaohms ( $G\Omega$ ), o que é excelente e faz com que o transformador seja aprovado nesse ensaio. Níveis de isolamento baixos indicam que ocorreu alguma ruptura do material isolante, podendo originar fugas de tensão e corrente, diminuindo a vida útil do transformador e também um maior consumo de energia.

A realização desse ensaio é mostrado na Figura 20, onde pode ser visualizado o protótipo e também o megôhmetro utilizado.

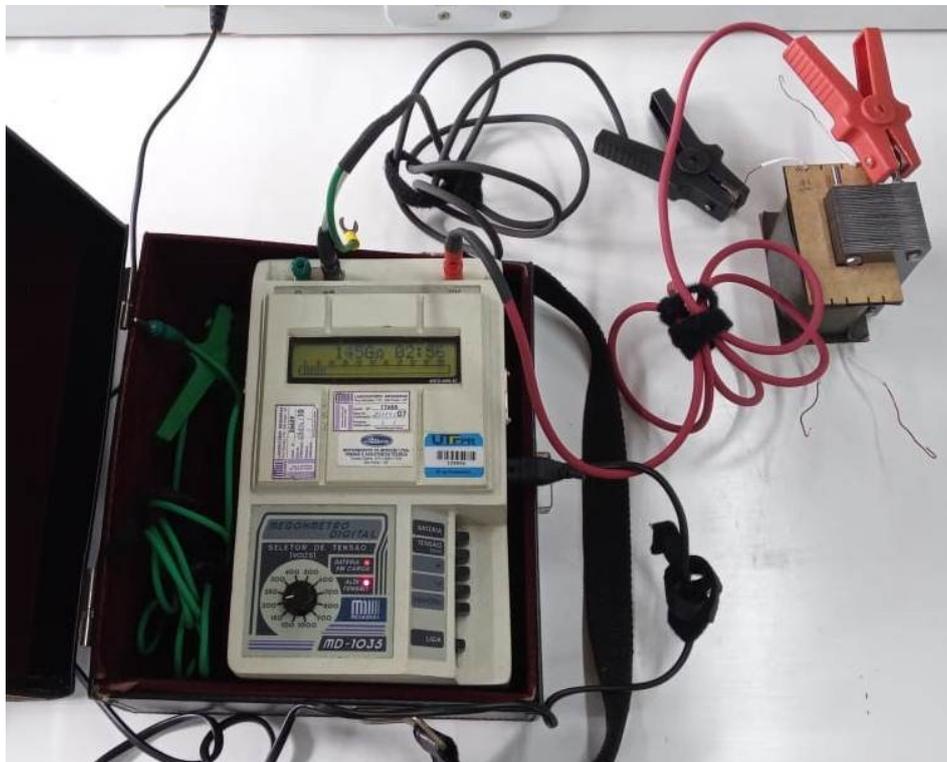


Figura 20 – Medição da resistência de isolamento do transformador.  
Fonte: (Autoria própria).

A Tabela 4 mostra os valores referentes ao ensaio de resistência de isolamento do protótipo de transformador.

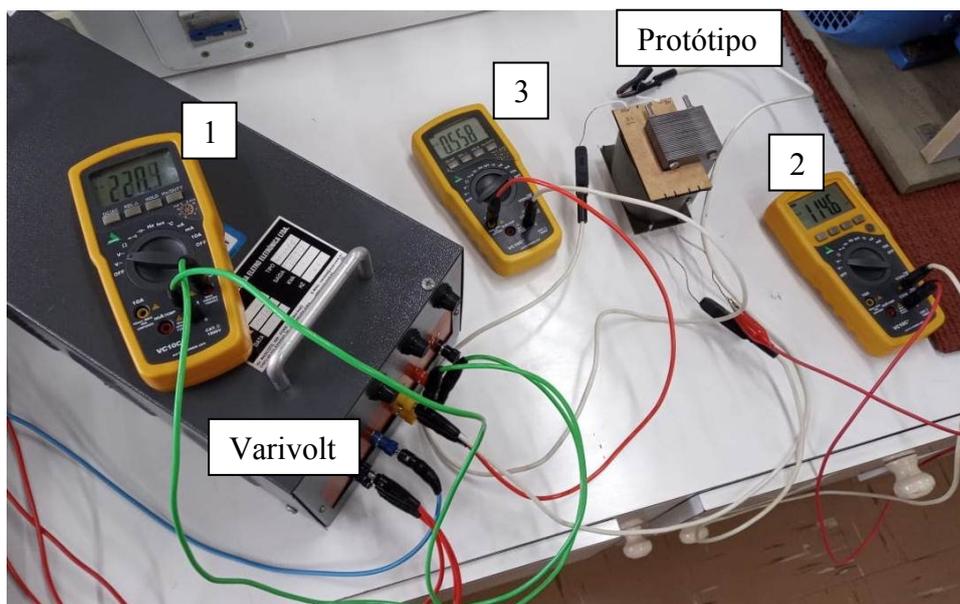
**Tabela 4 – Ensaio da resistência de isolamento do transformador.**

<b>Resistência de Isolamento</b>			
<b>Primário</b>	<b>Secundário</b>	<b>Terminal Guard</b>	<b>Resistência (GΩ)</b>
220 V	110 V	Carcaça	137
220 V e Carcaça	-	Desliga	400
-	110 V e Carcaça	Desliga	404

### 5.3. ENSAIO DE CIRCUITO ABERTO

No ensaio de circuito foi aplicada a tensão nominal de 220 V no enrolamento primário e com a utilização de equipamentos de medição, multímetros e amperímetro, foram coletados os valores do ensaio.

Como pode ser verificado na Figura 21, no multímetro 1 pode ser verificado o valor da medição da tensão aplicada ao enrolamento primário e o multímetro 2 apresenta a tensão do enrolamento secundário do protótipo e o amperímetro 3 demonstra o valor da corrente do enrolamento primário.



**Figura 21 – Ensaio de circuito aberto do transformador monofásico.**  
Fonte: (Autoria própria).

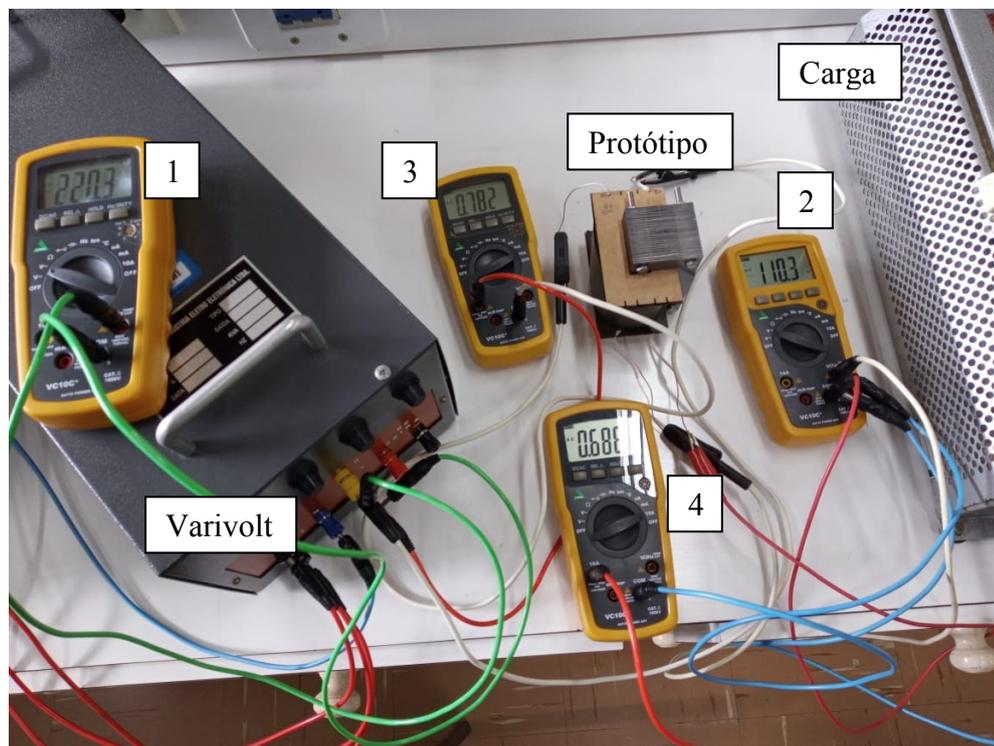
As medições realizadas através do ensaio de circuito aberto estão descritas na Tabela 5.

**Tabela 5 – Ensaio de circuito aberto do transformador.**

<b>Ensaio de Circuito Aberto</b>			
<b>V<sub>p</sub> (V)</b>	<b>V<sub>s</sub> (V)</b>	<b>I<sub>p</sub>(A)</b>	<b>I<sub>s</sub>(A)</b>
220,1	114,4	0,55	0

#### 5.4. ENSAIO COM CARGA

Com a utilização de uma carga resistiva de 161,4  $\Omega$ , ligada nos terminais do enrolamento secundário e de um *varivolt*, utilizado para aplicar tensão nominal de 220 V no enrolamento primário. Como pode ser observado na Figura 22, o multímetro 1 apresenta o valor da tensão aplicada ao enrolamento primário, o multímetro 2 apresenta a leitura da tensão aplicada na carga e os amperímetros 3 e 4 apresentam as leituras de corrente do primário e secundário respectivamente.



**Figura 22 – Ensaio do transformador monofásico com carga resistiva.**  
Fonte: (Autoria própria).

Os dados referentes ao ensaio com carga estão descritos na Tabela 6.

**Tabela 6 – Ensaio do transformador com carga resistiva.**

**Ensaio com Carga Resistiva**

<b>V<sub>p</sub> (V)</b>	<b>V<sub>s</sub> (V)</b>	<b>I<sub>p</sub> (A)</b>	<b>I<sub>s</sub> (A)</b>	<b>Carga (Ω)</b>
220	110,3	0,78	0,68	161,4

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho de projeto e construção do transformador monofásico com núcleo de formato LL se mostrou eficiente. Pode ser verificado que o protótipo de transformador montado conseguiu atingir os objetivos que foram descritos na fase de projeto.

Foram encontradas algumas dificuldades na realização do projeto. Entre elas a forma de enrolar os fios no carretel. Na primeira tentativa os enrolamentos foram enrolados manualmente, isto é, segurando o carretel com uma das mãos e a outra enrolando o fio. Ao final do processo foi observado que o carretel não comportava as voltas que foram calculadas na fase de projeto, devido a não conseguir dispor as bobinas de forma ordenada no carretel. Foi desenvolvido para a segunda tentativa um suporte para fixar o carretel e auxiliar na fase de enrolar as bobinas, o que facilitou o trabalho. Porém faltando poucas voltas para finalizar a inserção dos enrolamentos uma das paredes do carretel cedeu devido a pressão dos fios enrolados.

Então uma terceira tentativa foi feita. As peças do carretel foram coladas novamente. Essa tentativa foi bem sucedida, sendo possível verificar que o projeto foi elaborado corretamente, porém imperícia no ato da execução podem gerar desvios e impossibilitar a montagem.

Através dos dados coletados nos ensaios foi constatado que o protótipo de transformador monofásico se comportou bem perante as condições de trabalho exigidas.

Os equipamentos disponíveis no laboratório da UTFPR delimitaram os testes realizados no protótipo. Os ensaios de curto-circuito e de circuito aberto, para levantar o circuito equivalente do transformador, não foram realizados devido a falta de equipamentos com faixa de medição adequada. Apenas teste com carga resistiva foi realizado, porque as demais cargas solicitam uma corrente superior a corrente nominal secundária. A carga disponível não levou o transformador a funcionar em plena carga. Desta forma, não foram calculados rendimento e regulação de tensão.

Para a realização desse trabalho foram necessários os conhecimentos nas áreas de Máquinas Elétricas, Eletromagnetismo, entre outras. Além disso, foi possível obter o aprendizado de cotação, quantidade e compra de materiais a serem

utilizados. Também os imprevistos ocorridos durante o processo de fabricação, mostram que na carreira profissional é necessária a persistência para superar os desafios.

Para trabalhos futuros é sugerido que sejam efetuados comparativos entre a viabilidade de construção de transformadores com núcleos não convencionais.

## REFERÊNCIAS

- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª Edição, Editora Bookman, Porto Alegre – RS, 2013.
- COLONEL Wm. T. McLyman. **Transformer and inductor design handbook**. California - USA, 2004.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Jr. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6ª Edição, Editora Bookman, Porto Alegre – RS, 2006.
- FRAGOSO, C. M., Soares G. P., Soares M. B. **Transformadores: Teoria e Projeto**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus João Pessoa – PB, 2010.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre - RS, 1982.
- MALAGOLI, J. A.; LOBATO, F. S.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA da LUZ, M. V. **Projeto de Estator de Máquina de Indução Trifásica Usando o Algoritmo de Evolução Diferencial**. XI Simpósio de Mecânica Computacional e II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional, Juiz de Fora - MG, 2014.
- MALAGOLI, J. A.; LOBATO, F. S.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA da LUZ, M. V.; FERREIRA, J. H. I. **Projeto de Transformador Monofásico Utilizando Algoritmo de Evolução Diferencial**. Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, Caldas Novas - GO, 2014.
- MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8ª Edição, Editora Globo, São Paulo - SP, Brasil, 1991.
- PEREIRA, M. L. **Levantamento Prático das Perdas Magnéticas e Parâmetros Elétricos em Transformadores Monofásicos e Trifásicos, Utilizando a Plataforma Labview**. Minas Gerais, Universidade Federal de Itajubá, 2015. Disponível em <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/20150037.pdf>> Acesso em março 2020.
- ALMEIDA, A. A. **Máquinas Elétricas: Transformadores Monofásicos**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em <[http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/MAQ1/MAQ1\\_v2017.1\\_cap2](http://www.daelt.ct.utfpr.edu.br/professores/alvaug/MAQ1/MAQ1_v2017.1_cap2)> Acesso em março 2020.
- BARBOSA, S. R. **Estudo dos Efeitos da Sobretensão em Transformadores de Potência Aliada a Carregamentos Acima da Potência Nominal**. Dissertação de Mestrado, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. Disponível em <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/439M.PDF>> Acesso em março 2020.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. **Transformadores**. Disponível em <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1614721/mod\\_resource/content/2/TransformadoresTeo1\\_2016PEA3311.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1614721/mod_resource/content/2/TransformadoresTeo1_2016PEA3311.pdf)> Acesso em março 2020.

FERNANDES, T. R. **Transformadores Monofásicos**. Disponível em <[http://www.dt.fee.unicamp.br/~akebo/et016/Transformadores\\_Monofasicos-1.pdf](http://www.dt.fee.unicamp.br/~akebo/et016/Transformadores_Monofasicos-1.pdf)> Acesso em março 2020.

KASPAREIT, K. **Cálculo de Transformadores**. WEG Indústrias S.A. Disponível em <[https://www.academia.edu/10879946/APOSTILA\\_C%C3%81LCULO\\_DE\\_TRAFOS\\_-\\_CURSO\\_DE\\_BOBINAGEM\\_-\\_WEG](https://www.academia.edu/10879946/APOSTILA_C%C3%81LCULO_DE_TRAFOS_-_CURSO_DE_BOBINAGEM_-_WEG)> Acesso em março 2020.

LIMA, D. F. **Ensaio, Circuito Equivalente e Operação de um Transformador Monofásico**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016545.pdf>> Acesso em março 2020.

PAIVA, E. **Máquinas Elétricas: Transformadores**. Disponível em <<http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/transformadoresEduPaiva.pdf>> Acesso em março 2020.

SALLES, M. **Transformadores**. Disponível em <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/356770/mod\\_resource/content/1/Aula%20%20-%20Transformador%20I.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/356770/mod_resource/content/1/Aula%20%20-%20Transformador%20I.pdf)> Acesso em março 2020.

UFPR – Universidade Federal do Paraná. **Transformadores**. Disponível em <<http://www.eletrica.ufpr.br/thelma/Aula8-10.pdf>> Acesso em março 2020.

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. **Lei dos Transformadores e seu Princípio de Funcionamento**. Disponível em <[http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/lei\\_transf\\_3.pdf](http://rle.dainf.ct.utfpr.edu.br/hipermidia/images/documentos/lei_transf_3.pdf)> Acesso em março 2020.

## APÊNDICE A – ALGORITMO DE CÁLCULO DO TRANSFORMADOR

### Projeto do transformador monofásico de 110W, 60hz, lâminas LL

$V_{in}=220;$   
 $V_o=110;$   
 $I_o=1;$   
 $P_o=V_o \cdot I_o;$   
 $f=60;$   
 $R_{end}=0.95;$   
 $\alpha=0.05;$   
 $B_m=1.2;$   
 $K_u=0.4;$   
 $T_r=55;$   
 $K_f=4.44;$

#### Passo 1: Calcular a potência total em watts

$P_t=P_o \cdot ((1/R_{end})+1);$

#### Passo 2: Calcular as condições elétricas

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

#### Passo 3: Calcular a geometria do Núcleo

$K_g=P_t / (2 \cdot K_e \cdot \alpha \cdot 100);$

#### Passo 4: Com $K_g$ escolher a lâmina LL

Utilizar a lâmina 3-107L pelo valor de  $K_g$  Calculado

$D=4.762;$   
 $F=2.065;$   
 $E=1.567;$   
 $G=6.35;$   
 $M_{pl}=23.2;$   
 $W_{tfe}=1.294;$   
 $W_{tcu}=816;$   
 $M_{lt}=17.5;$   
 $A_c=7.57;$   
 $W_a=13.11;$   
 $A_p=99.21;$   
 $K_{gnovo}=17.164090;$   
 $A_t=342.8;$

Passo 5: Calcular o número de espiras do enrolamento primário

$$N_p = V_{in} \cdot (10^4) / (K_f \cdot B_m \cdot f \cdot A_c);$$

Passo 6: Calcular a densidade de corrente

$$J = P_t \cdot (10^4) / (K_f \cdot K_u \cdot B_m \cdot f \cdot A_p);$$

Passo 7: Cálculo da corrente de entrada

$$I_{in} = P_o / (V_{in} \cdot \text{Rend});$$

Passo 8: Calcular a área do fio nú no primário

$$A_{wpb} = I_{in} / J;$$

Passo 9: Selecionar o fio na tabela

Awgp=23;  
 Diamp=0.0632;  
 Awpbnovo=0.002588;  
 Awp=0.003135;  
 Microohmsporcmp=666;

Passo 10: Calcular a resistência primária

$$R_p = Mlt \cdot N_p \cdot \text{Microohmsporcmp} \cdot (10^{-6});$$

Passo 11: Calcular as perdas no cobre do enrolamento primário

$$I_p = I_{in};$$

$$P_p = (I_p^2) \cdot R_p;$$

Passo 12: Calcular o número de espiras do enrolamento secundário

$$V_s = V_o;$$

$$N_s = (N_p \cdot V_s / V_{in}) \cdot (1 + \alpha);$$

Passo 13: Calcular a área do fio nú do secundário

$$A_{wsb} = I_o / J;$$

Passo 14: Selecionar o fio na tabela

Awgs=20;  
 Diams=0.0879;  
 Awsbnovo=0.005188;  
 Aws=0.006065;  
 Microohmsporcms=332.3;

Passo 15: Calcular a resistência do enrolamento secundário

$$R_s = Mlt * N_s * \text{Microohmsporcms} * (10^{-6});$$

Passo 16: Calcular as perdas no cobre do enrolamento secundário

$$I_s = I_o;$$

$$P_s = (I_s^2) * R_s;$$

Passo 17: Calcular as perdas totais no cobre

$$P_{cu} = P_p + P_s;$$

Passo 18: Calcular a regulação de tensão no transformador

$$\alpha_{f\text{calculado}} = P_{cu} / P_o;$$

Passo 19: Calcular os W/Kg usando lâmina de espessura 14mil

$$K = 0.000557;$$

$$M = 1.68;$$

$$N = 1.86;$$

$$\text{Wattsporkg} = K * (f^M) * (B_m^N);$$

Passo 20: Calcular perda no ferro

$$P_{fe} = \text{Wattsporkg} * W_{tfe};$$

Passo 21: Calcular a perda total

$$P_{soma} = P_{cu} + P_{fe};$$

$$\text{Rendcalculado} = P_o / (P_o + P_{soma});$$

Passo 22: Calcular a perda por unidade de área

$$P_{porarea} = P_{soma} / A_t;$$

Passo 23: Calcular a temperatura em graus celsius

$$T_{r\text{calculado}} = 450 * (P_{porarea}^{0.826});$$

Passo 24: Calcular a utilização da janela

$$K_u = (N_s * A_{wsb\text{nov}}) / W_a;$$

$$K_{up} = (N_p * A_{w\text{pb}\text{nov}}) / W_a;$$

$$K_{unovo} = K_{up} + K_u;$$

## ANEXO A – LÂMINAS DE AÇO SILÍCIO PARA NÚCLEO LL

CAT. NO.	MAGNETIC METALS L AND DU LAMINATIONS															
	D	E	F	G	MPL	HT	WTH	LT	GROSS	HTCU	HLT	GROSS	GROSS	GROSS	GROSS	AT
	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	WTFE	(KGM)	(CH)	AC	MA	AP	KG	AT
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3-375UI	3.175	.952	.952	2.857	11.4	4.8	4.1	3.8	.235	.104	10.8	2.72	2.72	7.40	.747272	99.8
1-4L	1.270	1.270	1.905	3.810	16.5	6.3	3.2	6.3	.194	.248	9.6	1.61	7.26	11.70	.784608	141.9
3-390U	2.857	.952	.952	2.857	13.3	6.7	3.8	3.8	.302	.098	10.1	2.72	2.72	7.40	.794029	116.1
2-370U	1.905	.952	1.905	3.810	17.1	7.6	3.8	5.7	.261	.251	9.7	1.81	7.26	13.16	.980552	159.7
1-562UI	1.427	1.427	1.427	4.288	17.1	7.1	2.9	5.7	.259	.207	9.5	2.04	6.12	12.47	1.070449	138.7
2-101L	2.225	1.113	1.567	2.857	13.3	5.1	3.8	5.4	.243	.165	10.2	2.46	4.54	11.18	1.079814	120.6
3-108L	3.094	1.031	.874	3.332	12.7	5.6	4.0	3.8	.308	.110	10.7	3.19	2.91	9.30	1.114300	108.8
2-250L	2.062	1.031	.874	6.350	16.5	8.6	2.9	3.8	.267	.170	8.6	2.13	5.55	11.81	1.170200	130.2
1-104L	1.270	1.270	1.984	5.558	20.3	8.1	3.3	6.5	.240	.382	9.7	1.61	11.02	17.78	1.176659	180.3
1-500U	1.270	1.270	2.540	5.089	22.9	10.2	3.8	7.6	.307	.487	10.6	1.61	12.90	20.81	1.263818	238.7
1-105L	1.270	1.270	1.905	6.828	22.5	9.4	3.2	6.3	.270	.445	9.6	1.61	13.01	20.97	1.406918	199.4
1-102L	1.430	1.430	1.537	5.397	19.7	8.3	3.0	6.0	.299	.297	9.8	2.04	8.57	17.46	1.458466	167.8
2-7L	2.540	1.270	1.270	3.810	15.2	6.3	3.8	5.1	.365	.192	11.2	3.22	4.84	15.60	1.803207	138.7
3-370U	2.857	.952	1.905	3.810	17.1	7.6	4.8	5.7	.391	.301	11.6	2.72	7.26	19.75	1.845324	185.1
1-106L	1.430	1.430	2.222	5.397	21.0	8.3	3.7	7.3	.318	.459	10.8	2.04	12.00	24.45	1.852573	208.9
3-107L	4.762	1.567	2.065	6.350	23.2	9.5	6.8	7.3	1.294	.816	17.5	7.57	13.11	99.21	17.164090	342.8
1-81L	2.222	2.222	3.175	8.890	27.7	13.3	5.4	10.8	1.092	1.548	15.4	4.94	28.23	139.45	17.865716	491.9
1-1UI	2.540	2.540	2.540	7.620	30.5	12.7	5.1	10.2	1.468	1.080	15.7	6.45	19.35	124.84	20.516522	438.7
1-870U	2.222	2.222	4.445	8.890	40.0	17.8	6.7	13.3	1.626	2.448	17.4	4.94	39.52	195.24	22.147538	731.0
2-750U	3.810	1.905	3.810	7.620	34.3	15.2	7.6	11.4	2.528	1.958	19.0	7.26	29.03	210.85	32.300453	638.7

## ANEXO B – TABELA DE CONDUTORES

Wire Table												
AWG	Bare Area		Resistance $\mu\Omega/\text{cm}$ 20°C	Heavy Synthetics								
				Area		Diameter		Turns-Per		Turns-Per		Weight
	$\text{cm}^2(10^{-3})$	cir-mil	$\text{cm}^2(10^{-3})$	cir-mil	cm	Inch	cm	Inch	$\text{cm}^2$	Inch <sup>2</sup>	gm/cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	52.6100	10384.00	32.7	55.9000	11046.00	0.2670	0.105	3.9	10	11	69	0.46800
11	41.6800	8226.00	41.4	44.5000	8798.00	0.2380	0.094	4.4	11	13	90	0.37500
12	33.0800	6529.00	52.1	35.6400	7022.00	0.2130	0.084	4.9	12	17	108	0.29770
13	26.2600	5184.00	65.6	28.3600	5610.00	0.1900	0.075	5.5	13	21	136	0.23670
14	20.8200	4109.00	82.8	22.9500	4556.00	0.1710	0.068	6.0	15	26	169	0.18790
15	16.5100	3260.00	104.3	18.3700	3624.00	0.1530	0.060	6.8	17	33	211	0.14920
16	13.0700	2581.00	131.8	14.7300	2905.00	0.1370	0.054	7.3	19	41	263	0.11840
17	10.3900	2052.00	165.8	11.6800	2323.00	0.1220	0.048	8.2	21	51	331	0.09430
18	8.2280	1624.00	209.5	9.3260	1857.00	0.1090	0.043	9.1	23	64	415	0.07474
19	6.5310	1289.00	263.9	7.5390	1490.00	0.0980	0.039	10.2	26	80	515	0.05940
20	5.1880	1024.00	332.3	6.0650	1197.00	0.0879	0.035	11.4	29	99	638	0.04726
21	4.1160	812.30	418.9	4.8370	954.80	0.0785	0.031	12.8	32	124	800	0.03757
22	3.2430	640.10	531.4	3.8570	761.70	0.0701	0.028	14.3	36	156	1003	0.02965
23	2.5880	510.80	666.0	3.1350	620.00	0.0632	0.025	15.8	40	191	1234	0.02372
24	2.0470	404.00	842.1	2.5140	497.30	0.0566	0.022	17.6	45	239	1539	0.01884
25	1.6230	320.40	1062.0	2.0020	396.00	0.0505	0.020	19.8	50	300	1933	0.01498
26	1.2800	252.80	1345.0	1.6030	316.80	0.0452	0.018	22.1	56	374	2414	0.01185
27	1.0210	201.60	1687.0	1.3130	259.20	0.0409	0.016	24.4	62	457	2947	0.00945
28	0.8046	158.80	2142.0	1.0515	207.30	0.0366	0.014	27.3	69	571	3680	0.00747
29	0.6470	127.70	2664.0	0.8548	169.00	0.0330	0.013	30.3	77	702	4527	0.00602
30	0.5067	100.00	3402.0	0.6785	134.50	0.0294	0.012	33.9	86	884	5703	0.00472
31	0.4013	79.21	4294.0	0.5596	110.20	0.0267	0.011	37.5	95	1072	6914	0.00372
32	0.3242	64.00	5315.0	0.4559	90.25	0.0241	0.010	41.5	105	1316	8488	0.00305
33	0.2554	50.41	6748.0	0.3662	72.25	0.0216	0.009	46.3	118	1638	10565	0.00241
34	0.2011	39.69	8572.0	0.2863	56.25	0.0191	0.008	52.5	133	2095	13512	0.00189
35	0.1589	31.36	10849.0	0.2268	44.89	0.0170	0.007	58.8	149	2645	17060	0.00150
36	0.1266	25.00	13608.0	0.1813	36.00	0.0152	0.006	62.5	167	3309	21343	0.00119
37	0.1026	20.25	16801.0	0.1538	30.25	0.0140	0.006	71.6	182	3901	25161	0.00098
38	0.0811	16.00	21266.0	0.1207	24.01	0.0124	0.005	80.4	204	4971	32062	0.00077
39	0.0621	12.25	27775.0	0.0932	18.49	0.0109	0.004	91.6	233	6437	41518	0.00059
40	0.0487	9.61	35400.0	0.0723	14.44	0.0096	0.004	103.6	263	8298	53522	0.00046
41	0.0397	7.84	43405.0	0.0584	11.56	0.0086	0.003	115.7	294	10273	66260	0.00038
42	0.0317	6.25	54429.0	0.0456	9.00	0.0076	0.003	131.2	333	13163	84901	0.00030
43	0.0245	4.84	70308.0	0.0368	7.29	0.0069	0.003	145.8	370	16291	105076	0.00023
44	0.0202	4.00	85072.0	0.0316	6.25	0.0064	0.003	157.4	400	18957	122272	0.00020

## ANEXO C – TABELA DOS COEFICIENTES K, M E N

**Table 2-12.** Core Loss Coefficients for Iron Alloy Cores.

Core Loss Equation Factors					
Iron Alloy					
Material	Thickness mil's	Frequency Range	Coefficient k	Coefficient (m)	Coefficient (n)
50/50 Ni-Fe	1.00		0.0028100	1.210	1.380
	2.00		0.0005590	1.410	1.270
	4.00		0.0006180	1.480	1.440
Supermendur	2.00	400 Hz	0.0236000	1.050	1.300
	4.00		0.0056400	1.270	1.360
Permalloy 80	1.00		0.0000774	1.500	1.800
	2.00		0.0001650	1.410	1.770
	4.00		0.0002410	1.540	1.990
Supermalloy	1.00		0.0002460	1.350	1.910
	2.00		0.0001790	1.480	2.150
	4.00		0.0000936	1.660	2.060
Silicon	1.00	50-60 Hz	0.0593000	0.993	1.740
	2.00		0.0059700	1.260	1.730
	4.00		0.0035700	1.320	1.710
	12.00		0.0014900	1.550	1.870
	14.00		0.0005570	1.680	1.860
	24 M27 non-or		0.0386000	1.000	2.092