

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

LETÍCIA BALBINOTTI

PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO UI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2021**

LETÍCIA BALBINOTTI

PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO UI

Single-phase transformer design with ui core

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: Prof^a. Dr^a. Filomena Barbosa Rodrigues 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 **PROJETO DE TRANSFORMADOR MONOFÁSICO COM NÚCLEO UI**, da aluna **LETÍCIA BALBINOTTI** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **279** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Alexandre Batista de Jesus Soares

Santo Tiveroli Filho

Artur Tsuguiyoshi Hara

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

Dedico à Celso, Maristela e Heloisa, minha família.

And most importantly, you must always have faith in yourself

Elle Woods

AGRADECIMENTOS

À minha família que me apoiou e auxiliou no que foi possível durante esta minha jornada acadêmica.

À minha professora orientadora Dr^a.Filomena Barbosa Rodrigues Mendes que me auxiliou muito durante este trabalho.

À Roberto Delmar Halbert por ter disponibilizado seu tempo e sua máquina para o enrolamento do cobre no carretel.

RESUMO

BALBINOTTI, Letícia. **Projeto de transformador monofásico com núcleo UI**. 2021. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto e a implementação de um transformador monofásico com núcleo UI. Primeiro se introduz a teoria do transformador e suas perdas. Então são calculados os aspectos físicos do transformador a partir de um algoritmo criado em linguagem computacional. Assim foi construído e testado o transformador, e no final são analisados os resultados obtidos e comparados com os resultados dos testes.

Palavras-chave: Transformador monofásico. Núcleo UI. Eletromagnetismo.

ABSTRACT

BALBINOTTI, Leticia. **Design of a Single Phase Transformer with a UI core**. 2021. 42f. Graduation Conclusion Work (Graduation in Electrical Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2021.

This graduation conclusion paper presents the project and implement of a single phase transformer with UI core. First introduces the transformer theory and its loss. Then the phisycal aspects of the transformer are calculated from an algorithm created in computational language. Thus, the transformer was built and tested, and at the end the results obtained are analyzed and compareded with the test results.

Keywords: Single Phase Transformer. UI Core. Electromagnetism.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	a) Núcleo envolvido, b) Núcleo envolvente	16
Figura 2	a) Vista frontal do núcleo UI, b) Vista inferior do núcleo UI	18
Figura 3	Medidas do núcleo a)Vista frontal, b)Vista inferior	21
Figura 4	Partes do carretel de MDF	25
Figura 5	Carretel de MDF	25
Figura 6	Carretel com o enrolamento primário e papel isolante	26
Figura 7	Carretel com o enrolamento secundário e papel isolante	26
Figura 8	Placa de aço no formato U e I	27
Figura 9	Transformador finalizado	27
Figura 10	Esquema de ligação do teste de continuidade	29
Figura 11	Esquema de ligação do ensaio a vazio	30
Figura 12	Ensaio a vazio	30
Figura 13	Esquema de ligação do ensaio com carga	31
Figura 14	Ensaio com carga	31
Figura 15	Medição com megôhmetro	32
Figura 16	Lâminas padrão UI - dimensões	37
Figura 17	Lâminas padrão UI - características	37
Figura 18	Tabela fio esmaltado	38
Figura 19	Equação de perda no núcleo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros desejados	19
Tabela 2	Tabela de características da lâmina 100UI	20
Tabela 3	Resultados da simulação	28
Tabela 4	Teste de continuidade	29
Tabela 5	Resultados a vazio	30
Tabela 6	Resultados do ensaio com carga	31
Tabela 7	Medição com o megôhmetro	32
Tabela 8	Resistências de isolamento	33
Tabela 9	Comparação dos resultados	34
Tabela 10	Custos	35

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Regulação de tensão meta.
A_c	Área do núcleo.
A_p	Produto das áreas.
A_t	Área necessária para dissipar calor.
A_{wsb}	Área do fio nu do secundário.
$A_{wsb}novo$	Área do fio nu do secundário tabelado.
A_{wpb}	Área do fio nu do primário.
B_m	Indução magnética.
d_{iams}	Diâmetro do fio secundário.
d_{iamp}	Diâmetro do fio primário.
f	Frequência.
I_p	Corrente no primário.
I_{in}	Corrente de entrada.
J	Densidade de corrente.
k	Coeficiente da perda no núcleo de silício.
K_e	Constante das condições elétricas.
K_f	Constante para onda senoidal.
K_g	Geometria do núcleo.
$K_gcalculado$	Geometria do núcleo calculada.
K_gnovo	Novo valor de geometria do núcleo.
$K_gTabela$	Geometria do núcleo tabelada.
K_u	Fator de utilização.
K_{unovo}	Fator de utilização calculado.
K_{up}	Fator de utilização do primário.
K_{us}	Fator de utilização do secundário.
m	Coeficiente da perda no núcleo de silício.
$microOmsporcmp$	Micro Ohms por centímetro no primário.
$microOmsporcms$	Micro Ohms por centímetro do secundário.
MLT	Comprimento médio da espira.
MPL	Comprimento do caminho magnético.
n	Coeficiente da perda no núcleo de silício.
N_p	Número de espiras no enrolamento primário.
N_s	Número de espiras no enrolamento secundário.

P_o	Potência de saída.
P_p	Perda no cobre no primário.
P_s	Perda no cobre no secundário.
P_t	Potência total.
P_{cu}	Perda no cobre.
P_{fe}	Perda no ferro.
P_{incs}	Potência de entrada calculada.
P_{soma}	Perda total.
$P_{por\ Area}$	Perda por unidade de área.
R_p	Resistência do enrolamento primário.
$rend$	Rendimento.
$rendcalc$	Rendimento calculado.
V_s	Tensão no secundário.
V_{in}	Tensão de entrada.
W_a	Área da janela.
W_{tcu}	Peso do cobre.
W_{tfe}	Peso do núcleo.
$wattporKg$	Watt por kilograma.
$\alpha_{calculado}$	Regulação de tensão calculada.
$T_{rcalculado}$	Elevação de temperatura calculada.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	13
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	14
2	TRANSFORMADOR	15
2.1	TIPOS DE TRANSFORMADOR	15
2.2	ENSAIOS	16
2.3	PERDAS	17
2.3.1	Perdas no núcleo	17
2.3.2	Perdas no cobre	17
2.3.3	Perdas suplementares	18
2.4	TRANSFORMADOR COM NÚCLEO UI	18
3	METODOLOGIA	19
3.1	ESCOLHA DA LÂMINA UI	19
3.2	CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS ENROLAMENTOS	21
3.3	CÁLCULO DAS PERDAS	23
3.4	ALGORITMO	24
4	MONTAGEM	25
4.1	CARRETEL	25
4.2	ENROLAMENTO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO	26
4.3	PLACAS DE AÇO SILÍCIO	27
5	RESULTADOS	28
5.1	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	28
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS	29
5.2.1	Teste de Continuidade	29
5.2.2	Ensaio a vazio	29
5.2.3	Ensaio com carga	31
5.2.4	Resistência de isolamento	32

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
5.3.1 Custos Financeiros	35
6 CONCLUSÃO	36
7 ANEXOS	37
APÊNDICE A - CÓDIGO DO SOFTWARE	40

1 INTRODUÇÃO

No início do processo de transmissão de energia elétrica se usava corrente contínua, porém haviam tantas perdas que não era possível transportar para grandes distâncias. O que fazia com que a geração de energia fosse realizada próxima das cidades, porém não era o ideal já que é necessário uma área grande para construção de uma usina (de geração de energia) ou até de condições naturais para a geração (RUBENS,1979).

Segundo Rubens (1979,p.8), isso mudou por volta de 1884 quando o transformador foi inventado e se iniciou o uso de corrente alternada para a transmissão. Então pode-se alterar a tensão com facilidade e foi optado por usar altas tensões para a transmissão.

Com o transformador se fez possível não apenas o envio de energia a longas distâncias como também desencadeou mudanças tais como a interligação de sistemas. Essa conexão fez com que o sistema ficasse mais confiável, eficiente e tivesse uma maior facilidade na manutenção.

Dentre as aplicações dos transformadores, inclui-se a utilização para casamento de impedâncias e isolamento elétrica de estágios em uma planta elétrica. Também há transformadores usados para medir corrente em um sistema, ou ainda os transformadores de força que são usados em subestações de distribuição.

Atualmente em alguns países ainda existe a tensão nominal 110 V, a qual já não é comercializada no Brasil. Hoje em dia, os brasileiros utilizam as tensões de energia elétrica 127 V e 220 V, impossibilitando o uso de equipamentos antigos ou importados que funcionam em 110 V. Dessa forma a conexão de um transformador 220/110 V em uma rede de 220 V permite a utilização destes equipamentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é demonstrar quais recursos são necessários para o projeto e implementação de um transformador monofásico com núcleo UI. A seguir, indicam-se os objetivos específicos.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Estudar a teoria de transformador monofásico;
- Escrever um programa para calcular o transformador proposto;
- Realizar a simulação computacional e verificar se as metas de rendimento, elevação de temperatura e regulação de tensão do transformado foram alcançadas;
- Adquirir material com as especificações calculadas;
- Montar o protótipo do transformador;
- Realizar medidas e testes.

2 TRANSFORMADOR

Segundo Chapman (2013,p.66), um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão.

O princípio de funcionamento de um transformador é que ao fornecer uma corrente no enrolamento primário do transformador, essa induz um campo magnético no núcleo que produz um fluxo magnético variável que gera uma corrente no secundário do transformador.

Segundo Umans (2014,p.68) o fluxo do núcleo é estabelecido pela tensão aplicada e a corrente de excitação necessária é determinada pelas propriedades magnéticas do núcleo. Assim, a corrente de excitação se ajusta de forma que a Força Magneto Motriz (FMM) seja produzida e conseqüentemente o fluxo do núcleo também.

Em um transformador ideal a razão entre o número de espiras do primário e do secundário é proporcional a razão da tensão do primário e do secundário.

2.1 TIPOS DE TRANSFORMADOR

Os transformadores podem ser separados em diferentes categorias e seguindo o critério do Jordão (2002,p.64) tem-se:

- Função nos sistemas de potência: Transformadores de força, potência, corrente e de distribuição.
- Arranjo relativo núcleo-enrolamentos: Núcleos envolvidos, envolventes.
- Número de fases: Transformadores monofásicos ou polifásicos.
- Arranjo relativo dos enrolamentos da alta e da baixa tensão: Enrolamentos concêntricos ou com discos alternados.
- Modalidade do arrefecimento: Transformadores arrefecidos a ar, em banho de óleo, natural ou forçado.

Os transformadores monofásicos e trifásicos são os tipos mais utilizados de transformadores, mas é possível construir diferentes como polifásicos e bifásicos.

O número de bobinas também varia de uma bobina, em autotransformadores por exemplo, até a três bobinas em trifásicos.

O transformador é composto por um núcleo de chapas de material ferromagnético, geralmente aço silício, que pode ser no formato UI, U, EI, toroide, etc. Neste núcleo é enrolado a bobina de material condutor, sendo assim o núcleo pode ser do tipo envolvido ou envolvente.

Na Figura 1a tem-se o núcleo de tipo envolvido onde as colunas do núcleo são envolvidas pelas bobinas dos enrolamentos. Já na Figura 1b é mostrada o tipo envolvente onde apenas a coluna central do núcleo é envolvida pelas bobinas.

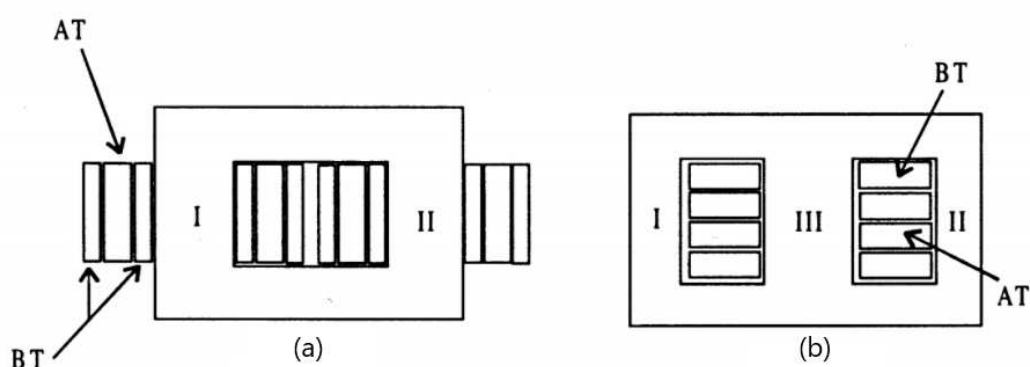


Figura 1 a) Núcleo envolvido, b) Núcleo envolvente

Fonte: JORDÃO (2002).

Os enrolamentos podem ser concêntricos que é quando a alta e a baixa tensão possuem uma camada apenas. Tem-se enrolamentos alternados quando as camadas de baixa e alta se alternam entre si. E “...quanto maior for a subdivisão dos enrolamentos, mais forte se torna o acoplamento magnético entre primários e secundários...e, por conseguinte, melhores regulações de tensão” (JORDÃO, 2002, p.70).

E para não haver problemas com elevação de temperatura os transformadores podem ser arrefecidos a ar ou em banho de óleo, podendo ainda o arrefecimento ser natural ou forçado.

2.2 ENSAIOS

Os ensaios dos transformadores são importantes para a compreensão do funcionamento destes, assim como para verificar os parâmetros reais. Tais testes são previstos na norma NBR 5356 (ABNT, 2007), que estabelece “... aplica-se a transformadores trifásicos e monofásicos (inclusive autotransformadores), excetuando-se

certas categorias de pequenos transformadores e transformadores especiais.”

Segundo Carvalho (2011, p.46) o primeiro teste normalmente realizado é medir a resistência de isolação com um megôhmetro. A medição deve ser feita entre as bobinas do primário e do secundário e entre as bobinas e o núcleo de ferro. Em seguida, medimos a resistência ôhmica dos enrolamentos, marcando nesse momento o lado de maior resistência como secundário.

Assim se inicia o ensaio vazio que além de mensurarmos as perdas no ferro calculam-se os parâmetros magnéticos para a construção do circuito equivalente do transformador. No ensaio em curto-circuito são medidas as perdas no cobre, bem como a resistência, a impedância e reatância indutiva.

2.3 PERDAS

As perdas podem ser divididas em perdas no ferro, no cobre e suplementares (correntes parasitas).

2.3.1 PERDAS NO NÚCLEO

Segundo Nascimento (2014, p.15) a perda no núcleo, ou também conhecida como perda no ferro, está relacionada à histerese magnética e a corrente de Foucault. Ambas estão relacionadas as características do material. A perda de Foucault possui o coeficiente de perda Foucault que é uma constante característica do material ferromagnético, inversamente proporcional à sua resistividade ρ (JORDÃO, 2002).

Já o coeficiente das perdas histeréticas está relacionado com a área do ciclo de histerese, que é característico para cada material. Provoca o atraso entre o campo magnético e a indução magnética e está relacionada com a qualidade do material utilizado na montagem do núcleo.

2.3.2 PERDAS NO COBRE

As perdas no cobre dependem diretamente da resistência do enrolamento. Como as bobinas são feitas de fio de cobre esmaltado e esse fio possui uma pequena resistência, ao ser percorrido por uma corrente existirá uma potência dissipada pelo aquecimento da bobina.

Segundo Jordão (2002, p.41) assim como a laminação do núcleo, para a redução das perdas adicionais costuma-se evitar o uso de condutores únicos, de grande seção, substituindo-os por dois ou mais em paralelo e ligeiramente isolados uns dos outros.

2.3.3 PERDAS SUPLEMENTARES

São chamadas perdas suplementares a soma das perdas parasitas e das perdas adicionais. Essas perdas adicionais são decorrentes de efeitos peliculares e de proximidade, como perdas provindas de outras partes metálicas do transformador, como parafusos, parede de tanques e outras partes metálicas.

2.4 TRANSFORMADOR COM NÚCLEO UI

O transformador proposto apresenta um núcleo UI monofásico, núcleo envolvido, com enrolamentos concêntricos e arrefecido a ar.

Na Figura 2 é apresentado o desenho do núcleo do formato UI, a vista frontal e a vista inferior.

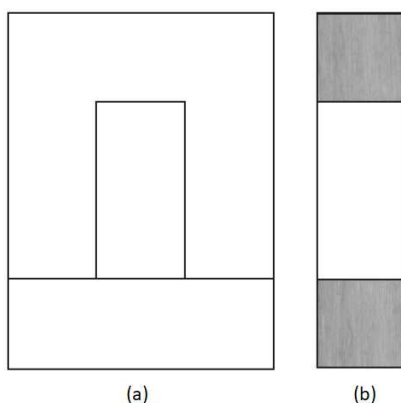


Figura 2 a) Vista frontal do núcleo UI, b) Vista inferior do núcleo UI
Fonte: Autoria própria (2021).

3 METODOLOGIA

Para iniciar o cálculo se definem os parâmetros a serem alcançados, mostrados na Tabela 1. Estes critérios serão as referências para validar os cálculos realizados e os resultados dos testes.

Os cálculos construtivos foram fundamentados em Mclyman (2004) e no Jordão (2002), com as informações das Tabelas 16 e 17 do anexo.

Tabela 1 Parâmetros desejados

Grandeza	Valor
Tensão de entrada	220 V
Tensão de saída	110 V
Corrente de saída	1 A
Potência de saída	110 W
Frequência	60 Hz
Temperatura	55°C
Indução magnética	1,2 T
Fator de utilização	0,4
Constante para onda senoidal	4,44
Metas	
Rendimento	95 %
Regulação de tensão	+ - 5

Fonte: Autoria própria (2021).

Um dos parâmetros iniciais para o cálculo é o fator de utilização (K_u) que é a quantidade de cobre que aparece na área da janela do transformador e é fundamentado em fatores construtivos do fio de cobre e do transformador. Ao multiplicar esses fatores em conjunto fornece uma utilização de janela normalizada de $K_u = 0,4$. E um K_u inferior a 0,4 facilita a bobinagem do transformador.

3.1 ESCOLHA DA LÂMINA UI

Seguindo a abordagem da geometria do núcleo (K_g) de Jordão, é necessário calcular a geometria do núcleo a partir dos parâmetros da Tabela 1. Assim na Equação 1, tem-se o cálculo da potência total (P_t) a partir da potência de saída e o rendimento.

$$P_t = P_o * \left(\frac{1}{rend} + 1 \right) \quad (1)$$

Na Equação 2, tem-se o cálculo da constante da condição elétrica (K_e) a partir da frequência, constante para onda senoidal e da indução magnética.

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

Com os valores de K_e e P_t é possível calcular a geometria do núcleo em cm^5 mostrada na Equação 3. Este é calculado a partir da potência total, da constante de condição elétrica e do valor de regulação de tensão desejado.

$$K_g = \frac{P_t}{2 * K_e * \alpha * 100} \quad (3)$$

Com as Tabelas 16 e 17 do anexo, foi escolhida a lâmina considerando que o $K_g Tabela \geq K_g calculado$, sendo que $K_g calculado = 15,2372 cm^5$. Foi optado pela lâmina 100UI com um $K_g Tabela = 19,709 cm^5$, e as características desta lâmina estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 Tabela de características da lâmina 100UI

Característica	Valor/Unidade
Comprimento do caminho magnético (MPL)	30,48 <i>cm</i>
Peso do núcleo (W_{tfe})	1,384 <i>Kg</i>
Peso do cobre (W_{tCu})	1016 <i>g</i>
Comprimento médio da espira (MLT)	14,76 <i>cm</i>
Área do núcleo (A_c)	6,129 <i>cm</i> ²
Área da janela (W_a)	19,355 <i>cm</i> ²
Produto das áreas (A_p)	118,626 <i>cm</i> ⁴
Geometria do núcleo ($K_{g,novo}$)	19,709 <i>cm</i> ⁵
Área necessária para dissipar calor (A_t)	439 <i>cm</i> ²

Fonte: Autoria própria (2021).

As medidas do núcleo, representado na Figura 3 são $D = 2,54 cm$, $E = 2,54 cm$, $F = 2,54 cm$, $H = 2,54 cm$ e $G = 7,62 cm$.

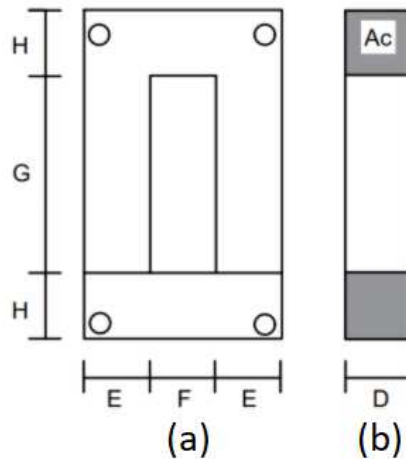


Figura 3 Medidas do núcleo a) Vista frontal, b) Vista inferior
Fonte: Autoria própria (2021).

3.2 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DOS ENROLAMENTOS

Para o cálculo do número de espiras no enrolamento primário foi utilizada a Lei de Faraday conforme a Equação 4 que depende da tensão de entrada, indução magnética, frequência, constante da onda senoidal e a área do núcleo. O cálculo da densidade de corrente e a da corrente de entrada foram realizadas com as Equações 5 e 6, respectivamente.

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

sendo: N_p : Número de espiras no enrolamento primário;

V_{in} : Tensão de Entrada;

A_c : Área do núcleo;

K_f : Constante para a onda senoidal;

B_m : Indução magnética;

f : Frequência.

$$J = P_t * \frac{10^4}{K_f * K_u * B_m * f * A_p} \quad (5)$$

sendo: J : Densidade de corrente;

P_t : Potência total;

K_u : Fator de utilização;

A_p : Produto das áreas.

$$I_{in} = \frac{P_o}{V_{in} * rend} \quad (6)$$

sendo: I_{in} : Corrente de entrada;

P_o : Potência de saída;

$rend$: Rendimento.

Assim se fez possível escolher o fio do enrolamento primário a partir da área do fio nu, sem revestimento, sendo $A_{wpb} = 0,0035 \text{ cm}^2$ calculado com a Equação 7.

$$A_{wpb} = \frac{I_{in}}{J} \quad (7)$$

Pela Tabela 18 tem-se que o fio AWG 22 possui área $A_{wpbnovo} = 0,0032430 \text{ cm}^2$, por ser a área mais próxima a calculada foi optado pelo fio AWG 22. Ainda obteve-se os dados de diâmetro do fio $d_{iamp} = 0,0700.6 \text{ cm}$, área do fio $A_{wp} = 0,0038570 \text{ cm}^2$ e os micro ohms por centímetro no primário $microOhmsporcmp = 530.6,4 \mu\Omega/cm$, e pode-se calcular a resistência do enrolamento primário na Equação 8.

$$R_p = MLT * N_p * microOmsporcmp * 10^{-6} \quad (8)$$

Admitindo que a tensão de saída é igual a tensão do secundário calcula-se o número de espiras do enrolamento secundário pela Equação 9.

$$N_s = \frac{N_p * V_s}{V_{in}} * (1 + \alpha) \quad (9)$$

Utilizando o mesmo critério do primário tem-se que área do fio nu, sem revestimento, do secundário é $A_{wsb} = 0,0067 \text{ cm}^2$. Foi selecionado o fio AMG 19 pois a área é de $A_{wsbnovo} = 0,0065310 \text{ cm}^2$. Também da Tabela 18 obtemos os dados de diâmetro do fio $d_{iams} = 0,0980 \text{ cm}$, área do fio $A_{ws} = 0,0075390 \text{ cm}^2$ e a resistência a $20^\circ C$ $microOmsporcms = 263,9 \mu\Omega/cm$.

3.3 CÁLCULO DAS PERDAS

Considerando que $I_p = I_{in}$, a perda no cobre do enrolamento primário é obtida utilizando a Equação 10. Na Equação 11 é obtida a perda no cobre do enrolamento secundário, considerando a plena carga ($I_p = 1 A$). Então a perda no cobre no enrolamento primário e secundário, respectivamente, são $P_p = 2,4396 W$ e $P_s = 2,2962 W$. Logo a perda total no cobre é a soma das perdas do primário e secundário sendo então $P_{cu} = P_p + P_s = 4,7358 W$.

$$P_p = I_p^2 * R_p \quad (10)$$

$$P_s = I_s^2 * R_s \quad (11)$$

Para o cálculo de perda no ferro, pela Equação 13, foi utilizada a Equação 12 para calcular os Watts por kilograma. Então a perda total em watt é $P_{soma} = P_{cu} + P_{fe} = 5,7867 W$.

$$wattporKg = k * f^m * B_m^n \quad (12)$$

$$P_{fe} = wattporKg * W_{tfe} \quad (13)$$

A regulação de tensão do transformador é calculada pela razão entre a perda no cobre e a potência de saída como é mostrada na Equação 14. O resultado foi 4,31% o que é abaixo da nossa meta.

$$\alpha_{calculado} = \frac{P_{cu}}{P_o} = 0,0431 \quad (14)$$

A regulação de tensão é a variação da tensão do transformador desde a vazio a plena carga. Quanto menor a regulação melhor o transformador.

Na Equação 15 temos 95% de rendimento calculado estando coerente com a meta estipulada.

$$rendcalc = \frac{P_o}{P_o + P_{soma}} \quad (15)$$

Já a elevação de temperatura é calculada pela Equação 17, sendo que a perda por unidade de área é calculada na Equação 16.

$$PporArea = \frac{P_{soma}}{A_t} \quad (16)$$

$$T_{rcalculado} = 450 * PporArea^{0,826} \quad (17)$$

A meta era que a temperatura não fosse maior que 55°C, a temperatura foi calculada em 12,6°C, logo dentro da meta. O fator de utilização meta era $K_u = 0,4$ já o calculado pelas equações 18, 19 e 20 foi $K_{unovo} = 0,387$.

$$K_{us} = \frac{N_s * A_{wsb}novo}{W_a} \quad (18)$$

$$K_{up} = \frac{N_p * A_{wpb}novo}{W_a} \quad (19)$$

$$K_{unovo} = K_{up} + K_{us} \quad (20)$$

3.4 ALGORITMO

No algoritmo primeiro foram declarados os parâmetros iniciais mostrados na Tabela 1, como valores de tensão e de corrente, metas de rendimento e regulação de tensão. Em seguida foi calculada a potência total, a constante das condições elétricas e a geometria do núcleo.

Após calculou-se o número de enrolamentos do primário, a densidade de corrente e a corrente de entrada. Então a área do fio nu, a resistência do enrolamento e a perda de cobre do primário são calculadas. Em seguida são calculados em relação ao secundário o número de enrolamentos, a densidade de corrente, a resistência do enrolamento e a perda do cobre.

É realizada a soma da perda de cobre do primário e secundário, resultando na perda total de cobre e com este parâmetro é calculado a regulação de tensão.

Depois é calculado a perda do ferro e a perda total do transformador, com esses dados o rendimento é calculado. E por fim o cálculo da elevação de temperatura e do fator de utilização.

4 MONTAGEM

A seguir apresenta-se a explicação de cada etapa de construção do transformador composto pelo carretel, fio de cobre e pelas placas de aço.

4.1 CARRETEL

Para o carretel foi calculado que seria necessário uma largura de 2,54 cm, 2,54 cm de comprimento e altura de 7,62 cm. Não foi possível encontrar um carretel comercial com as medidas necessárias, então foi construído manualmente com MDF. Na Figura 4 tem-se as partes do carretel de MDF adquiridos.

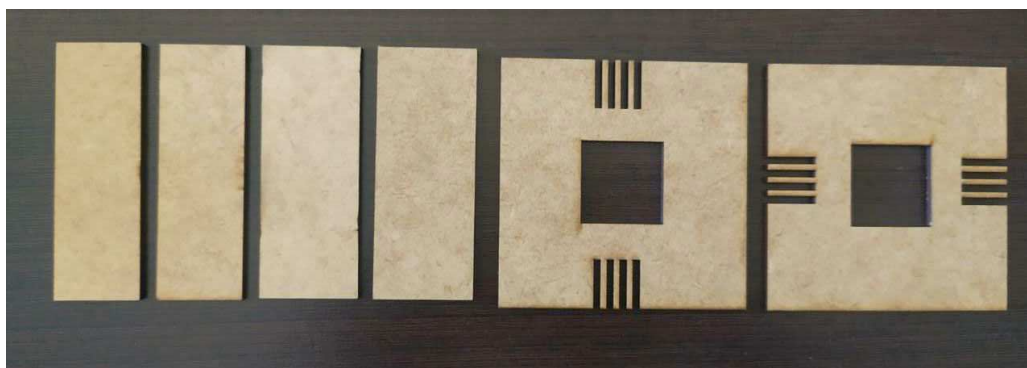


Figura 4 Partes do carretel de MDF
Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 5 tem-se o carretel montado.

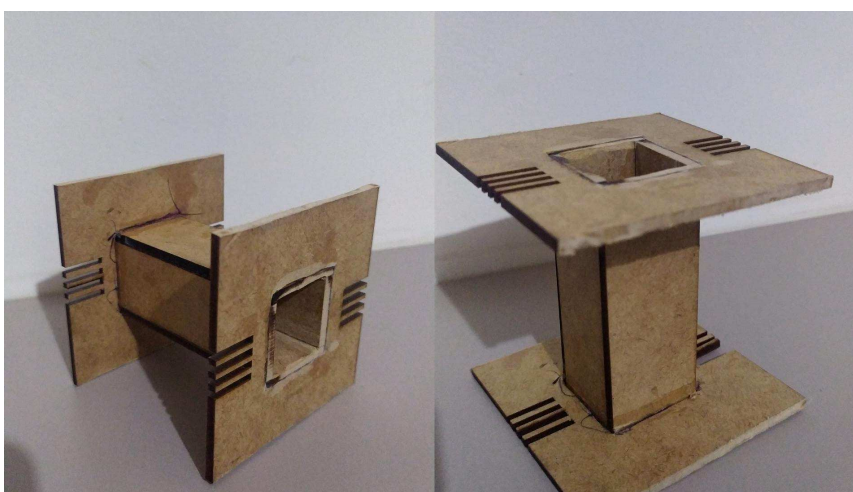


Figura 5 Carretel de MDF
Fonte: Autoria própria (2021).

4.2 ENROLAMENTO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO

Foi efetuada a compra de 118 metros de cobre de fio AWG 22 para o primário e 90 metros de cobre de fio AWG 19 para o secundário. Após a construção do carretel se iniciou o processo de enrolar o primário e o secundário.

Iniciou-se enrolando um papel isolante em volta do carretel, seguido do enrolamento primário, o que foi enrolado 1123 voltas no carretel. A Figura 6 abaixo, mostra como ficou o carretel ao final do enrolamento primário e do papel isolante.

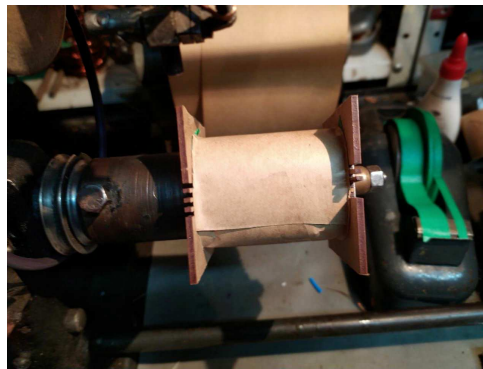


Figura 6 Carretel com o enrolamento primário e papel isolante
Fonte: Autoria própria (2021).

Então foi enrolado o enrolamento secundário, como mostrado na Figura 7, com 590 voltas de cobre e finalizado com mais uma volta de papel isolante. Ainda para facilitar os testes do transformador foram soldados dois fios nas pontas do fio de cobre, onde o fio vermelho é o primário de 220 V e o azul é o secundário de 110 V.

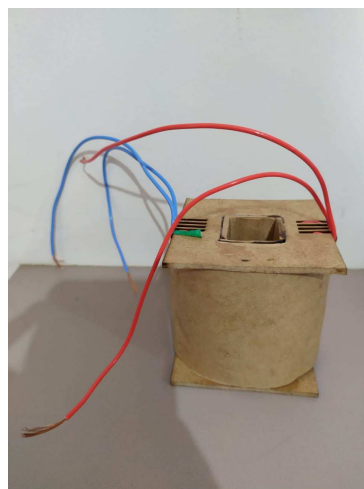


Figura 7 Carretel com o enrolamento secundário e papel isolante
Fonte: Autoria própria (2021).

4.3 PLACAS DE AÇO SILÍCIO

As placas de aço silício foram adicionadas alternadas entre o formato U e I, sendo que cada peça possui a espessura de 0,5 mm, como mostrado na Figura 8, foi adicionado placas até que não houvesse mais espaço no carretel.

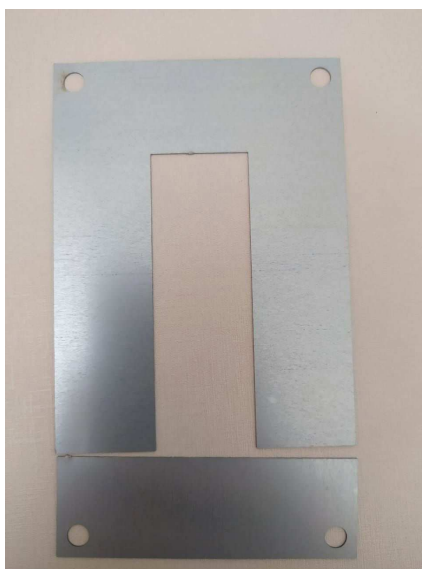


Figura 8 Placa de aço no formato U e I
Fonte: Autoria própria (2021).

No total foram colocadas 42 peças de cada formato e para prender foram parafusadas como mostrado na Figura 9.



Figura 9 Transformador finalizado
Fonte: Autoria própria (2021).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão verificados os resultados da simulação do algoritmo e dos ensaios realizados com o transformador. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas no Bloco I na sala I001 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco. Para o teste do transformador foi efetuado o ensaio a vazio(sem carga) e com carga.

5.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Na Tabela 3 são mostrados os resultados da simulação, todos são satisfatórios com as metas estabelecidas.

Tabela 3 Resultados da simulação

Parâmetro	Valor
Corrente de entrada	0,526 A
Rendimento	95 %
Regulação de tensão	4,31 %
Temperatura	12,6°C
Resistência do primário	8,807 Ω
Resistência do secundário	2,296 Ω
Perdas no cobre	4,736 W
Perdas totais	5,787 W

Fonte: Autoria própria (2021).

Com os valores da resistência primária e secundária foi possível fazer o cálculo das perdas totais que resultaram em 5,787 W, considerando a plena carga. O rendimento de 95% também obtido pelo cálculo a plena carga ficou igual a meta estabelecida.

Dos resultados obteve-se a potência de entrada $P_{inCS} = 0,526 * 220 = 115,72$ W. Logo a potência de saída é 109,93 W, satisfazendo a meta de 110 W, pois é a subtração das perdas totais da potência de entrada. Também a regulação de tensão obtida foi de 4,31%, que é melhor que o esperado.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.2.1 TESTE DE CONTINUIDADE

Antes de iniciar o ensaio foi realizado um teste de continuidade entre os terminais do transformador com o uso do multímetro digital, os resultados estão apresentados na Tabela 4. Este teste visa verificar se o fio de cobre está rompido ou ainda se há contato elétrico entre o primário e secundário.

Tabela 4 Teste de continuidade

	Primário	Secundário	Carcaça
Primário	Sim	Não	Não
Secundário	Não	Sim	Não

Fonte: Aatoria própria (2021).

Assim para a verificação com o multímetro selecionado no modo de continuidade cada borne é colocado nas pontas do primário como mostra a Figura 10. O mesmo é feito para o secundário e se estiver conectado o multímetro emite um som. Já para o teste de contato elétrico um borne do multímetro é colocado no primário e outro no secundário e vice-versa. Há ainda um verificação com a carcaça do transformador.

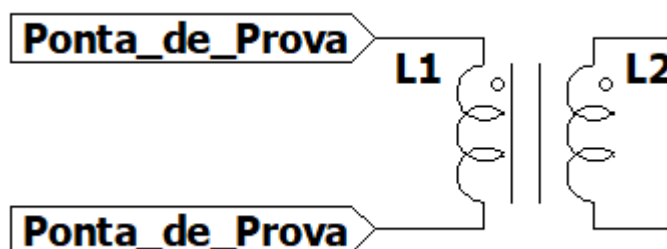


Figura 10 Esquema de ligação do teste de continuidade
Fonte: Aatoria própria (2021).

5.2.2 ENSAIO A VAZIO

No teste do transformador a vazio uma tensão alternada de 220 V foi aplicada no primário a partir de um variac. Um multímetro foi colocado em paralelo a entrada para obter a tensão de entrada e outro em série para atuar como amperímetro.

Já no secundário do transformador foi colocado um voltímetro em paralelo aos terminas do transformador para obter sua tensão. Os resultados são mostrados

na Tabela 5 e esse esquema de ligação é mostrado na Figura 11 e o ensaio na Figura 12, respectivamente.

Tabela 5 Resultados a vazio

	Vin(V)	Vout(V)	Iin(A)
Circuito Aberto	220,2	114,7	0,13

Fonte: Autoria própria (2021).

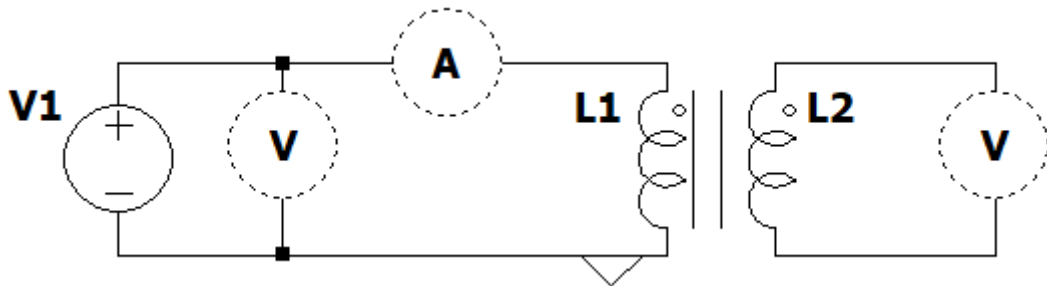


Figura 11 Esquema de ligação do ensaio a vazio

Fonte: Autoria própria (2021).

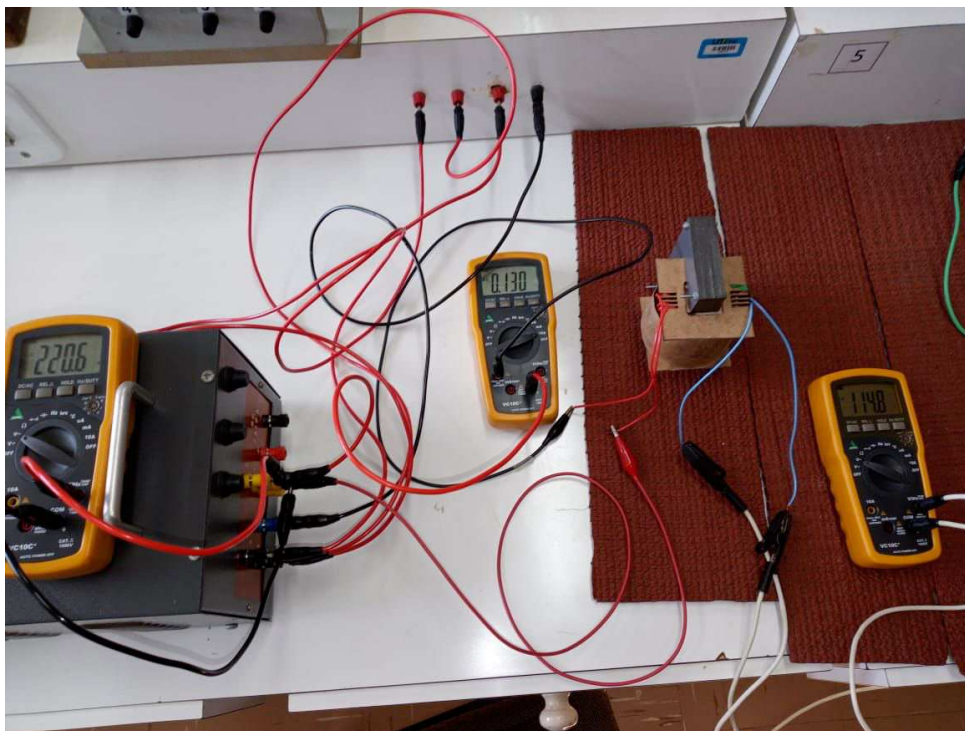


Figura 12 Ensaio a vazio

Fonte: Autoria própria (2021).

5.2.3 ENSAIO COM CARGA

No ensaio com carga foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 6 e Figura 13 e na 14, respectivamente. Para este ensaio manteve-se o voltímetro e o amperímetro nos bornes de entrada do transformador e a carga é um resistor de resistência variável ou reostato.

Então no secundário temos uma resistência de $143,9 \Omega$ em paralelo com o voltímetro e também foi adicionado um amperímetro para verificar a corrente de saída.

Tabela 6 Resultados do ensaio com carga

	Vin(V)	Iin(A)	Vout(V)	Iout(A)
Circuito com carga	220,7	0,46	110,4	0,76

Fonte: Autoria própria (2021).

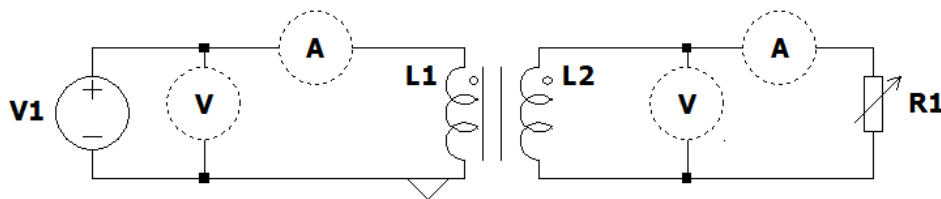


Figura 13 Esquema de ligação do ensaio com carga

Fonte: Autoria própria (2021).

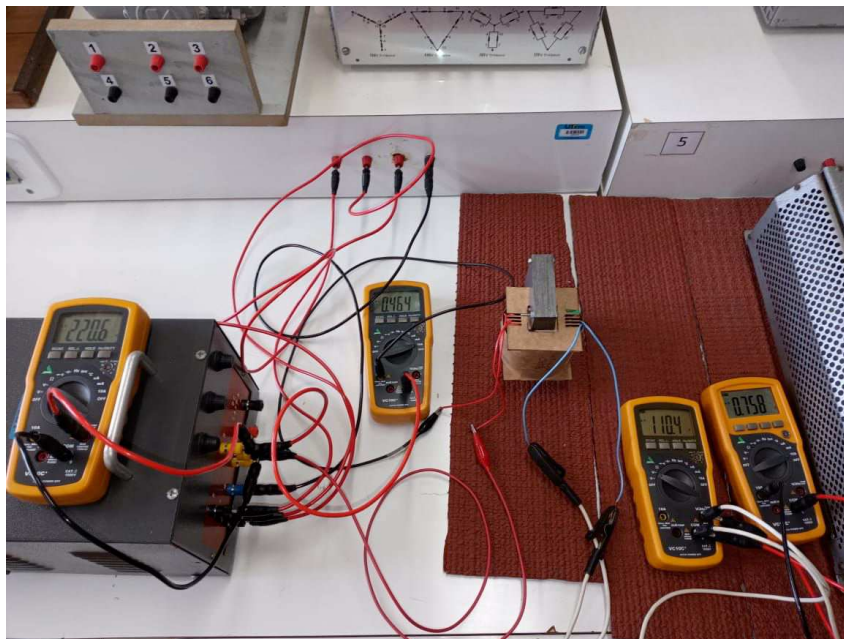


Figura 14 Ensaio com carga

Fonte: Autoria própria (2021).

5.2.4 RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Também foi medida a resistência de isolamento com o megôhmetro digital para verificar a integridade da isolação entre as partes e permite verificar se há curtos. Os resultados desse ensaio estão na Tabela 7 e o ensaio é apresentado na Figura 15.

Tabela 7 Medição com o megôhmetro

Primário	Secundário	Terminal Guard	R(Ω)
220 V	110 V	Carcaça	3,27 G
220 V e Carcaça	-	Desliga	2,10 G
-	110 V e Carcaça	Desliga	3,72 G

Fonte: Autoria própria (2021).



Figura 15 Medição com megôhmetro
Fonte: Autoria própria (2021).

Por falta de valores comerciais de transformadores monofásicos de baixa tensão para confrontar os valores encontrados no ensaio será utilizado o valor calculado. Segundo Leite (2017, apud ABNT NBR 7036:1990) a resistência mínima de isolamento de um transformador referenciada à $75^{\circ}C$ por ser calculada pela Equação 21.

$$R_m = \frac{k * 2,65 * V}{\sqrt{\frac{P}{f}}} \quad (21)$$

sendo: R_m : Resistência mínima de isolamento a $75^{\circ}C$, em $M\Omega$;

V : Tensão nominal do enrolamento sob ensaio, em kV;

P : Potência nominal do transformador, em kVA;

f : Frequência nominal, em Hz;

k : Constante, para transformadores monofásicos é igual a 3.

Para que os resultados do ensaio sejam confrontados com os calculados é necessário corrigir para da temperatura de ensaio e utiliza-se das Equações 22 e 23.

$$A = \frac{75 - T}{10} \quad (22)$$

$$R_m = \frac{R_t}{2^A} \quad (23)$$

sendo: R_t : Resistência de isolamento na temperatura do ensaio;

T : Temperatura do ensaio.

Os resultados das medições e dos cálculos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 8 Resistências de isolamento

Primário	Secundário	R Corrigida($M\Omega$)	R Calculada($M\Omega$)
220 V e Carcaça	-	46,40	40,85
-	110 V e Carcaça	82,20	20,42

Fonte: Autoria própria (2021).

Ambas resistências medidas foram maiores que as calculadas mostrando um bom isolamento no transformador, sendo que a secundária mostrou uma resistência quatro vezes maior que a necessária.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como a regulação de tensão de um transformador mede a variação da tensão da passagem do regime a vazio para o regime em carga não foi possível fazer o calculo deste com os valores ensaiados. Pois para atingir a plena carga seria necessário que a corrente no secundário atingisse 1 A, o que não foi possível com a carga disponível no laboratório da UTFPR.

Já o rendimento pode ser calculado com os valores do ensaio com carga conforme a Equação 26. Com os valores calculados nas Equações 24 e 25 a um rendimento de 82,64%. A meta de rendimento de 95% não foi atingida porque não foi atingido a plena carga do transformador durante o ensaio de carga.

$$P_{entrada} = V_p * I_p = 220,7 * 0,46 = 101,52 \quad (24)$$

$$P_{saída} = V_s * I_s = 110,4 * 0,76 = 83,90 \quad (25)$$

$$rend = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} * 100\% \quad (26)$$

O ensaio a vazio mostrou que o protótipo consegue transformar a tensão de entrada de 220,2V na tensão de saída de 114,7 V e para isso é necessária uma corrente de excitação de 0,13 A.

No ensaio com carga verificou-se que os níveis de tensão estão de acordo com as metas e a corrente primária passou de 0,13 para 0,46 A para suprir a excitação necessária e a carga colocada no secundário.

Na Tabela 9 tem-se a comparação dos resultados simulados, ensaiados e dos valores do mercado, dois tipos de transformadores comerciais serão utilizados para a análise. Primeiro tem-se o modelo Pólux que produz transformadores conforme as características que cada aplicação necessita, o segundo modelo é comercial (Fácil transformadores, 2021) que pode ser encontrado facilmente para a compra .

Tabela 9 Comparação dos resultados

	Metas	Simulação	Ensaio a Vazio	Ensaio com carga	Modelo Pólux	Modelo Comercial
Tensão de Entrada	220 V	220 V	220,2 V	220,7 V	220 V	220 V
Tensão de Saída	110 V	110 V	114,7 V	110,4 V	120 V	110V
Corrente do secundário	1 A	1 A	-	0,76 A	-	1,1 A
Potência de Saída	110 W	110 W	-	83,90 W	100 W	120 W
Frequência	60 Hz				50/60 Hz	60 Hz
Temperatura	55°C	12,6°C	-	-	45°C	-

Fonte: Autoria própria (2021).

O transformador da marca Pólux (2021) é arrefecido a ar, o fabricante informa a classe de isolamento que varia de modelo podendo ser 0,6 kV ou 1,1 kV e informa que utiliza as normas de fabricação e ensaios da ABNT NBR 5356 -11/IEC 60076-11. Os valores de corrente, rendimento e regulação de tensão não foram fornecidos pelo fabricante no catálogo. O modelo comercial é um transformador isolador galvânico com núcleo de aço silício GNO, lâminas EI e enrolamento de cobre.

Há algumas características distintas entre os transformadores como ainda que o transformador comercial e o proposto possuam núcleo de aço silício, os

formatos de núcleos são diferentes. E ainda o transformador Pólux não fornece as características do núcleo e enrolamentos.

O peso do transformador Pólux de 100 W é de 1,8 kg já o comercial pesa 3,8 kg, em comparação com o protótipo que pesa 2 kg. Também ressalta-se que as temperaturas apresentadas são próximas, sendo a temperatura do ensaio quatro vezes mais baixa que a do transformador Pólux. Isso mostra que foi feito um bom dimensionamento no transformador que mesmo sem nenhuma proteção para temperatura não aqueceu. A potência de saída difere apenas no ensaio a carga por não ser a plena carga o ensaio como explicado anteriormente. A corrente do secundário do modelo comercial é próxima a meta do transformador proposto, e por não estar em regime a plena carga a corrente do ensaio com carga também está próxima.

Analisando os dados da Tabela 9 tem-se que o transformador proposto segue características comerciais como as de temperatura, corrente e potência. Infelizmente não é possível confrontar dados de ensaios dos transformadores por falta de dados por parte dos fabricantes.

5.3.1 CUSTOS FINANCEIROS

A Tabela 10 apresenta os custos financeiros para a confecção do transformador. A cola de MDF e os parafusos e porcas não foram necessários adquirir, além do papel isolante que foi fornecido pela professora Dr^a. Filomena.

Tabela 10 Custos

Item	Valor	Fornecedor
Fio de cobre	R\$ 112,95	Flessak - Francisco Beltrão
Lâminas UI	R\$ 400,50	Flessak - Francisco Beltrão
Partes de MDF	R\$ 6,00	Via da Arte
Mão de obra e uso da bobinadeira	R\$ 50,00	Roberto Delmar Halbert
Cola	-	Letícia
Parafusos e porcas	-	Letícia
Papel isolador	-	Prof. Dr. ^a Filomena
Total	R\$ 569,45	

Fonte: Autoria própria (2021).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho exemplificou um método de modelagem de projeto de transformador satisfatório, pois as etapas simuladas obtiveram as metas conforme o desejado. Já na etapa construtiva também todos os materiais obtidos foram suficientes e até sobraram.

O teste de continuidade revelou que a fiação não foi interrompida durante a bobinagem. Os valores medidos da resistência de isolamento revelaram a integridade da isolação entre as partes do transformador.

A bobinagem só foi possível pelo uso do bobinador, sem essa ferramenta os enrolamentos não estariam uniformemente dispostos. Esta etapa é importante na montagem do transformador, pois afeta o resultado do transformador.

Também os valores calculados e ensaiados ao serem confrontados com valores comerciais ou de normas mostraram que estão coerentes como descrito anteriormente.

Não foi possível determinar as condições de rendimento pois os valores nominais são aqueles obtidos com carga nominal e esta condição não foi alcançada com a carga resistiva disponível no laboratório.

Os valores de custo expuseram que o transformador proposto foi consideravelmente caro para ser montado, isso se deve pela pandemia e a necessidade que o material fosse entregue rapidamente.

7 ANEXOS

UI, Standard Laminations 14 mil											
Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm	H cm	Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm	H cm
50UI	1.270	1.270	1.270	3.810	1.270	125UI	3.175	3.175	3.175	9.525	3.175
60UI	1.429	1.429	2.223	5.398	1.429	150UI	3.810	3.810	3.810	11.430	3.810
75UI	1.905	1.905	1.905	5.715	1.905	180UI	4.572	4.572	4.572	11.430	4.572
100UI	2.540	2.540	2.540	7.620	2.540	240UI	6.096	6.096	6.096	15.240	6.096

Figura 16 Lâminas padrão UI - dimensões
Fonte: MCLYMAN (2004).

UI, Standard Laminations 14 mil											
Part No.	W _{tcu} grams	W _{tfc} grams	MLT cm	MPL cm	W _a		A _c cm ²	W _a cm ²	A _p cm ⁴	K _R cm ⁵	A _t cm ²
					A _c	A _c					
50UI	132	173	7.68	15.24	3.159	1.532	4.839	7.414	0.592	110	
60UI	418	300	9.81	18.10	6.187	1.939	11.996	23.263	1.839	209	
75UI	434	585	11.22	22.86	3.157	3.448	10.887	37.534	4.614	247	
100UI	1016	1384	14.76	30.48	3.158	6.129	19.355	118.626	19.709	439	
125UI	1967	2725	18.29	38.10	3.158	9.577	30.242	289.614	60.647	685	
150UI	3413	4702	22.04	45.72	3.158	13.790	43.548	600.544	150.318	987	
180UI	4884	7491	26.28	50.29	2.632	19.858	52.258	1037.740	313.636	1296	
240UI	11487	17692	34.77	67.06	2.632	35.303	92.903	3279.770	1331.997	2304	

Figura 17 Lâminas padrão UI - características
Fonte: MCLYMAN (2004).

Wire Table												
AWG	Bare Area		Resistance μΩ/cm 20°C	Heavy Synthetics								
				Area		Diameter		Turns-Per		Turns-Per		Weight gr/cm
	cm ² (10 ⁻³)	cir-mil	cm ² (10 ⁻³)	cir-mil	cm	Inch	cm	Inch	cm ²	Inch ²		
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

Figura 18 Tabela fio esmaltado
Fonte: MCLYMAN (2004).

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		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		50-60 Hz	0.0386000	1.000	2.092

Figura 19 Equação de perda no núcleo
Fonte: MCLYMAN (2004).

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5356-1:2007. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=60934>>.

ANDERSON, Paul M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. Ames, USA: The Iowa State University Press, 1977. 464 p.

CARVALHO, Geraldo. **Máquinas Elétricas - Teoria e Ensaio**. 4. ed. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536505831/>. Acesso em: 03 Jul 2021: Editora Saraiva, 2011. 260 p.

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

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aereas ;teorias das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: Livros Tecnicos E Cientificos, 1979. 279 p.

FÁCIL TRNASFORMADORES. Disponível em: <https://www.faciltransformadores.com/MLB-1300716246-transformador-isolador-galvanico-entrada-220v-110v-120w-_JMposition=2search_layout=stacktype=itemtracking_id=35b05248-6839-4417-8edc-ea77f84ac96f>. Acesso em: 29 Ago 2021>.

JORDÃO, Rubens G. **Transformadores**. 3. ed. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521214892/>. Acesso em: 24 Apr 2021: Editora Blucher, 2002. 533 p.

LEITE, Soni Endlich. **ENSAIOS DE COMISSONAMENTO DE TRANSFORMADOR - UMA PROPOSTA DE padronização DE PROCEDIMENTO**. Orientador: Jorge Nemésio Sousa, M.Sc. 98f. TCC(Graduação) - Curso Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017, Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019989.pdf>. Acesso em: 29 Ago 2021.

MCLYMAN, Colonel WM. T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2004. 533 p.

NASCIMENTO, Geraldo Carvalho do. **Máquinas Elétricas**. 1. ed. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536519821/cfi/2!/4/4@0.00:56.8>. Acesso em: 07 Jul 2021: Editora Érica, 2014. 144 p.

PÓLUX TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS. Disponível em: <<http://www.polux.ind.br/transformadores-monofasicos/transformador-monofasico-standard>>. Acesso em: 29 Ago 2021.>

SIMONE, Gilio Aluisio. **Transformadores - Teoria e Exercícios**. 1. ed. [S.I.]: Editora Érica, 1998. 312 p.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788580553741/>. Acesso em: 01 Jul 2021: AMGH Editora, 2014. 708 p.

APÊNDICE A - CÓDIGO DO SOFTWARE

```
Vin=220;  
Vo=110;  
Io=1;  
Po=Vo*Io;  
f=60;  
rend=0.95;  
alfa=0.05;  
Bm=1.2;  
Ku=0.4;  
Tr=55;  
Kf=4.44;  
Pt=Po*((1/rend)+1);  
Ke=0.145*(Kf2) * (f2) * (Bm2) * (10-4);  
Kg=Pt/(2*Ke*alfa*100)  
F=2.540;  
G=7.620;  
E=2.540;  
MPL=30.48;  
Wtfe=1.384;  
Wtcu=1016;  
MLT=14.76;  
Ac=6.129;  
Wa=19.355;  
Ap=118.626;  
Kgnovo=19.709;  
At=439;  
D=2.540;  
Np= Vin*(104)/(Kf * Bm * f * Ac)
```

```
J=Pt*(104)/(Kf * Ku * Bm * f * Ap);  
lin=Po/(Vin*rend);  
Awpb=lin/J  
AWGp=22;  
Awpbnovo=0.0032430;  
diamp=0.0701;  
Awp=0.0038570;  
microOmsporcmp= 531.4;  
Rp=MLT*Np*microOmsporcmp*(10-6);  
lp=lin;  
Pp=(lp2) * Rp  
Vs=Vo;  
Ns=(Np*Vs/Vin)*(1+alfa)  
Awsb=lo/J  
AWGs=19;  
Awsbnovo=0.0065310;  
diams=0.0980;  
Aws=0.0075390;  
microOmsporcms=263.9;  
Rs=MLT*Ns*microOmsporcms*(10-6);  
ls=lo;  
Ps=(ls2) * Rs  
Pcu=Pp+Ps;  
alfacalculado=Pcu/Po  
k=0.0005570;  
m=1.680;  
n=1.860;  
wattporKg=k*(fm) * (Bmn);  
Pfe=wattporKg*Wtfe;
```

$$\begin{aligned}P_{soma} &= P_{cu} + P_{fe}; \\ \text{rendcalc} &= P_o / (P_o + P_{soma}) \\ P_{porArea} &= P_{soma} / A_t; \\ T_{calculado} &= 450 * (P_{porArea}^{0.826}) \\ K_{us} &= (N_s * A_{wsbnovo}) / W_a; \\ K_{up} &= (N_p * A_{wpbnovo}) / W_a; \\ K_{unovo} &= K_{up} + K_{us}\end{aligned}$$