

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

VIVIANE CUSTÓDIO CORREIA

**INDUTOR DE CORRENTE ALTERNADA: CÁLCULO, SIMULAÇÃO E
TESTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2021

VIVIANE CUSTÓDIO CORREIA

INDUTOR DE CORRENTE ALTERNADA: CÁLCULO, SIMULAÇÃO E TESTES

Alternating current inductor: Calculation, simulation and tests

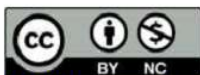
Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Filomena Barbosa Rodrigues Mendes.

Coorientador: Marcio Tadayuki Nakaura.

PATO BRANCO

2021



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

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

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

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Indutor de corrente alternada: Cálculo, simulação e testes**, da aluna **Viviane Custódio Correia** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **276** de 2021.

Fizeram parte da banca os professores:

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

Artur Tsuguiyoshi Hara

José Paulo de Barros Neto

Santo Tiveroli Filho

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente a minha mãe, por me dar todo apoio necessário para a realização deste trabalho, e também por todo o apoio durante todo o período de graduação. Agradeço aos amigos, pelo companheirismo durante a graduação.

À minha orientadora, professora Filomena Barbosa, por todo apoio, paciência, dedicação e por todos aprendizados durante a realização desse trabalho. Aos professores membros da banca José Paulo De Barros Neto, Santo Tiveroli Filho e Arthur Tsuguiyoshi Hara, por contribuírem com o meu trabalho.

À Universidade UTFPR por disponibilizar o espaço, os materiais e os equipamentos para a realização desse trabalho e também por todo aprendizado durante os anos de graduação. Também à empresa Eletrônica Xingu por disponibilizar a bobinadeira para a realização desse trabalho.

RESUMO

CORREIA, Viviane. (2021) **Indutor de corrente alternada: Cálculo, simulação e testes.** 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo, projeto e implementação de um indutor CA. Primeiramente, foram realizados estudos teóricos sobre indutores CA, seu funcionamento, peças e circuito equivalente. Na sequência, foi desenvolvido um algoritmo para o dimensionamento e cálculo de um indutor com lâminas EI. Posteriormente, após definidos os parâmetros de projeto e escolhido o método para montagem, o indutor de chapas de aço silício com lâminas EI foi implementado. Após a montagem do protótipo foram realizados ensaios e testes em laboratório para a verificação do funcionamento adequado do indutor. Na continuação do trabalho foram realizadas análises e discussões a cerca dos resultados obtidos experimentalmente. Por fim, foram apresentadas as conclusões devidas e foi possível verificar o funcionamento esperado do indutor.

Palavras-chave: Indutor. Lâminas EI. Dimensionamento. Protótipo. Ensaios e testes.

ABSTRACT

CORREIA, Viviane. (2021) **Alternating current inductor: Calculation, simulation and tests**. 27 f. Final Thesis - Electrical Engineering Course, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

The main aim of this work is the study, project and implementation of an AC inductor. First of all, theoretical studies have been done on AC inductors, its operation, parts and equivalent circuit. Then, an algorithm was developed for the dimensioning and calculation of an inductor with EI-shaped iron-core. Subsequently, after defining the project parameters and choosing the mounting method, the silicon steel core inductor EI was implemented. After mounting the prototype, laboratory tests and experiments have been performed to verify the appropriate functioning of the inductor. During this work, analyzes and discussions have been done about the experimentally obtained results. Finally, the predicted conclusions were presented and it was possible to verify the expected operation of the inductor.

Keywords: Inductor. EI-shaped iron-core. Dimensioning. Prototype. Experiments and tests.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	a) Circuito magnético do indutor b) Circuito elétrico equivalente. Fonte: McLyman, 1998.	14
Figura 2:	Materias utilizados para a implementação do indutor	18
Figura 3:	Carretel utilizado para a implementação do indutor	19
Figura 4:	Bobinadeira	20
Figura 5:	Bobinagem do Indutor	20
Figura 6:	Lâminas de aço-silício do núcleo do Indutor	21
Figura 7:	Inserção das chapas de aço-silício no carretel do indutor	22
Figura 8:	Chapas de aço-silício inseridas no carretel do indutor	22
Figura 9:	Indutor concluído	23
Figura 10:	Ensaio de medição da resistência de isolamento	25
Figura 11:	Medição da indutância do protótipo	25
Figura 12:	Circuito L	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Parametros de projeto	16
Tabela 2:	Ensaio de Continuidade do Indutor	24
Tabela 3:	Valores medidos no circuito L	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 INDUTOR	12
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS	12
2.2.1 Núcleo	12
2.2.2 Condutor	12
2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO INDUTOR	13
2.4 DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR	13
2.5 ALGORITMO	16
3 MONTAGEM	18
3.1 CARRETEL	18
3.2 ENROLAMENTO	19
3.3 NÚCLEO	21
4 RESULTADOS APRESENTADOS	24
4.1 ENSAIO DE CONTINUIDADE	24
4.2 TESTE DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO	24
4.3 MEDIÇÃO DA INDUTÂNCIA	24
4.4 TESTE DE CIRCUITO L	26
5 CONCLUSÃO	27

ANEXO A - TABELAS PARA O DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR.....30

1 INTRODUÇÃO

Um indutor é um elemento passivo que armazena energia através de um campo magnético. Ele é composto por um fio condutor enrolado em um núcleo ferromagnético. Este dispositivo também é conhecido como bobina ou reator (RAWLINS, 2000).

Através das propriedades do eletromagnetismo é possível compreender o comportamento de um indutor de corrente alternada. Ao aplicar uma corrente alternada nos terminais da bobina deste indutor, a mesma produzirá um campo magnético variável, conseqüentemente o fluxo magnético também será variável. Pela Lei de Faraday sabe-se que o fluxo magnético variável produzirá uma tensão induzida. Através da Lei de Lenz, percebe-se que esta tensão induzida produzirá um fluxo que se opõe a variação de corrente que aplicou-se na bobina, desta forma, a corrente da bobina não aumentará bruscamente, pois este fluxo limitará o aumento desta corrente (RAWLINS, 2000).

O indutor armazena energia em forma de campo magnético, e esta energia armazenada é proporcional a sua indutância, a indutância pode ser definida como a razão entre a corrente aplicada nos terminais da bobina, fluxo magnético e número de espiras. Desta forma a indutância dependerá do tamanho, formato e material do induto (GOMES *et al.*, 2019).

Pelas características citadas acima, este dispositivo é amplamente utilizado na engenharia elétrica de diferentes formas, como por exemplo, em circuitos analógicos, processamento de sinais, recepções e transmissões de TV e rádio, estas aplicações ocorrem devido a característica do indutor de alterar sinais de corrente alternada. Também é frequentemente utilizado em filtros eletrônicos, uma vez que sua reatância indutiva é diretamente proporcional a frequência. Este dispositivo geralmente é utilizado na saída de fontes chaveadas de alimentação, carregando e descarregando a energia armazenada, alterando a tensão de entrada. Ao acoplar dois ou mais indutores constituem um transformador, que são amplamente utilizados (SILVA, 2015).

Para o projeto deste dispositivo, é importante que o projetista encontre uma proporção entre as variáveis de peso, custo, tamanho e eficiência de acordo com a

utilização do indutor. Uma vez que a indutância vai depender diretamente do material utilizado no núcleo, do fio condutor, da área do núcleo e do número de espiras do enrolamento. Torna-se necessário encontrar um equilíbrio entre estas variáveis, por exemplo, entre o número de espiras do indutor e a área do núcleo, ao aumentar o número de bobinas o tamanho da área do núcleo torna-se menor, conseqüentemente diminuindo o custo e o peso, em contrapartida a temperatura do enrolamento pode aumentar excessivamente e pode ocorrer dificuldades em bobinar o fio condutor no núcleo (MARTIGNONI, 1991).

Por este motivo, muitas vezes encontrar um dispositivo para determinada aplicação em catálogos de fabricantes não é fácil, portanto em alguns projetos torna-se necessário realizar o cálculo deste dispositivo de acordo com as especificações desejadas, uma vez que mudanças pequenas nas especificações altera o projeto de forma significativa (HURLEY; WÖLFLE, 2013).

Devido a ampla utilização deste dispositivo e especificações distintas para diferentes tipos de aplicação, neste trabalho propõe-se realizar um estudo, projeto e implementação de um indutor de corrente alternada (CA) de enrolamento de cobre e núcleo laminado de aço-silício.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar estudo de indutores, projetar e implementar um indutor CA de 127 V; 3 A; 60 Hz; 1,15 T; 90 por cento de rendimento e 50 graus Celsius de elevação de temperatura.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estudar a teoria de indutores CA.
2. Escrever algoritmo para cálculo dos parâmetros do indutor.
3. Aquisição de material.
4. Implementar indutor CA.
5. Fazer medições e testes.

1.2 METODOLOGIA DO TRABALHO

Para realizar os objetivos específicos citados e numerados na seção 1.1.2 o projeto terá como base livros acadêmicos, apostilas, trabalhos de conclusão de curso (MARCHESE, 2018) e materiais disponíveis em portais de periódicos reconhecidos.

Para os objetivos específicos 1 e 2, serão utilizados um computador pessoal e computadores disponíveis nos laboratórios aos acadêmicos da universidade.

Os materiais necessários para a construção de um protótipo de indutor, serão adquiridos de um fornecedor externo. Para fazer a implementação do indutor e testes, citados nos item 4 e 5, serão utilizados os laboratórios e equipamentos disponíveis na universidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: Aborda brevemente o tema proposto, aplicações e a relevância do trabalho.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Aborda a teoria de indutores CA, seu funcionamento, peças, circuito equivalente, cálculo e dimensionamento de um indutor com lâminas EI.

Capítulo 3 – Montagem: Apresenta os métodos utilizados para a montagem de um indutor com lâminas EI.

Capítulo 4 – Análise dos resultados: Serão apresentados os resultados obtidos experimentais e calculados e discussões sobre os mesmo.

Capítulo 5 – Conclusão: As conclusões do trabalho de acordo com o que foi apresentado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 INDUTOR

O indutor é um dispositivo que armazena energia através de um campo magnético. Ao aplicar uma corrente alternada na bobina do indutor, vai induzir um fluxo magnético variável no núcleo do indutor. A indutância é a energia armazenada pelo campo magnético do indutor (SADIKU *et al.*, 2014).

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

O indutor basicamente é formado por um núcleo e uma bobina feita de um fio condutor, essas partes são explicadas nas seções 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 NÚCLEO

O núcleo do indutor, assim como um transformador é por onde vai fluir o fluxo magnético. Geralmente no núcleo são utilizadas chapas de aço-silício, que passam por um tratamento químico onde é aplicada uma camada isolante fina de aproximadamente 0,01mm, que tem como intuito diminuir as perdas no ferro (MARCHESI, 2018).

2.2.2 CONDUTOR

Os condutores utilizados em indutores, assim como os transformadores, normalmente são de cobre esmaltado, alumínio também é um material que pode ser utilizado mas não é tão comum como o cobre. O cobre é revestido de uma camada de esmalte, deixando o cabo isolado. O diâmetro do fio é definido pelo código AWG (*American Wire Gauge*), quanto maior o número mais fino o diâmetro do fio.

Dependendo das demandas do projeto, é escolhida a o diâmetro com as características adequadas, como densidade de corrente por exemplo. Ou seja, a escolha do condutor adequado é importante para o bom funcionamento do indutor, pois caso não seja escolhido de maneira correta, pode ocorrer sobre aquecimento ou não ter

espaço físico no núcleo.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO INDUTOR

Pode-se fazer uma analogia do circuito magnético e o circuito elétrico, uma vez que as leis que regem os circuitos magnéticos são correspondentes as lei de circuitos elétricos. A força magnemotriz (F_{mm}) que é definida por

$$F_{mm} = NI, \quad (1)$$

ou seja, a força magnemotriz (F_{mm}) depende do número de voltas (N) da bobina e da corrente que passa na mesma (I). A Força magnemotriz (F_{mm}) é equivalente a tensão V .

A força magnemotriz (F_{mm}) gera um fluxo, que é análogo a corrente no circuito elétrico, e esse fluxo ao vence a relutância (R_m) do circuito magnético. A relutância é análoga a resistência (R) no circuito elétrico. Onde a relutância pode ser definida como

$$R_m = \frac{lc}{\mu Ac}, \quad (2)$$

Assim, pela Lei de Ohm

$$V = RI, \quad (3)$$

Então por analogia, podemos enxergar o circuito equivalente magnético como

$$F_{mm} = \phi R_m, \quad (4)$$

Na figura 1 é apresentado o circuito equivalente magnético.

2.4 DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR

A potência do indutor é dada por (MCLYMAN, 1988)

$$P = V_L I_L, \quad (5)$$

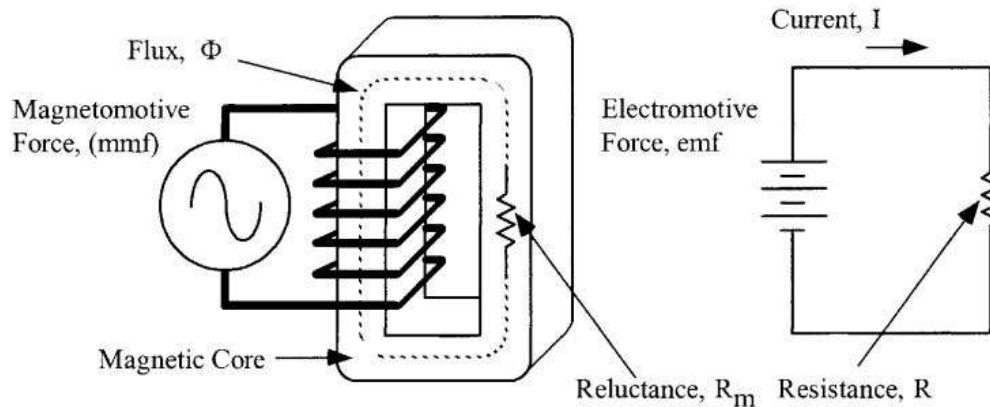


Figura 1: a) Circuito magnético do indutor b) Circuito elétrico equivalente. Fonte: McLyman, 1998.

a capacidade de fornecer potência de um indutor é diretamente proporcional ao produto da área (A_p) apresentada na equação 6

$$A_p = \frac{P \cdot 10^4}{K_f K_u B_{ac} f J}, \quad (6)$$

O número de voltas aproximado (N_L) no indutor pode ser definido em (7)

$$N_L = \frac{V_L \cdot 10^4}{K_f B_{ac} f A_c}, \quad (7)$$

A reatância indutiva é definida como

$$X_L = \frac{V_L}{I_L}, \quad (8)$$

A indutância

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f}, \quad (9)$$

Para definir a largura do entreferro (L_g) utiliza-se a equação 10

$$L_g = \frac{0,4 \pi N_L^2 A_c \cdot 10^{-8}}{L} - \frac{MPL}{\mu m}, \quad (10)$$

O fator *fringing* (F) está relacionado ao aumento da indutância, que se dá devido ao espraiamento do fluxo que diminui a impedância, quanto maior o entreferro maior será o fluxo disperso, e maior o fator *fringing* (F).

$$F = 1 + \frac{Lg}{\sqrt{A_c}} \ln \frac{2G}{Lg}, \quad (11)$$

Encontra-se o número de voltas de projeto

$$N_{L,novo} = \sqrt{\frac{Lg L}{0,4 \pi i A_c F 10^4}}, \quad (12)$$

A densidade de fluxo do projeto

$$B_{ac,novo} = \frac{V_L 10^4}{K_f N_{L,novo} f A_c}, \quad (13)$$

Calcula-se a área do fio de cobre ($A_{wL(B)}$), e assim defini-se o fio de cobre apropriado para o projeto. É possível ver na equação, que a área do fio de cobre é inversamente proporcional a densidade de corrente (J)

$$A_{wL(B)} = \frac{I_L}{J}, \quad (14)$$

A resistência do indutor é calculada

$$R_L = 10^{-6} MLT N_{L,novo} \left[\frac{\mu \Omega}{cm} \right], \quad (15)$$

As perdas no cobre, podem ser calculadas a partir da equação 16

$$P_{cu} = I_L^2 R_L, \quad (16)$$

Para calcular as perdas em watts por quilograma

$$\frac{W}{K} = 0,000557 f^{1,68} (B_{ac,novo})^{1,86}, \quad (17)$$

Desta forma, é possível calcular as perdas no ferro

$$P_{fe} = \frac{W}{K} W_{tfe}, \quad (18)$$

As perdas devido ao fluxo disperso, podem ser calculadas através

$$P_g = k_i L_g E f B_{ac}^2, \quad (19)$$

As perdas totais podem ser obtidas somando as perdas apresentadas na

equação 16, 18 e 19

$$P_t = P_g + P_{cu} + P_{fe}, \quad (20)$$

Calcular a elevação de temperatura

$$T_r = 450 \left(\frac{P_t}{A_c} \right)^{0,826}, \quad (21)$$

Fator de utilização de janela

$$k_u = \frac{N_{L,novo} A_w(B)}{W_a}. \quad (22)$$

Tabela 1: Parâmetros de projeto

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão nominal	V_L	127	V
Corrente nominal	I_L	3	A
Frequência de operação	f	60	Hz
Densidade de fluxo magnético	B_{ac}	1,15	T
Elevação de temperatura	T_r	50	°C
Rendimento	η	90	%

Fonte: Autoria própria.

As principais equações utilizados no algoritmo de cálculo do indutor. Dadas as especificações da Tabela 1 o algoritmo fornece: as dimensões da chapa EI (escolhida com o valor do produto das áreas (6)), o número de voltas no enrolamento (calculado utilizando (12)) e a bitola necessária do fio de cobre (escolhida dada a área em (14)).

Para construir o indutor são necessárias 314 voltas de fio de cobre esmaltado AWG 19. Para o núcleo são necessárias lâminas de aço silício com as dimensões apresentadas na figura 6.

2.5 ALGORITMO

Neste capítulo, serão apresentados os *scripts* das partes principais do código para o cálculo do indutor. Onde foram utilizadas as equações apresentadas na seção 2.4 e as tabelas do anexo A.

Com os parâmetros do indutor definidos, calculou-se o produto da área e definiu-se as o modelo de chapas utilizadas, que neste trabalho foi as lâmina EI-138. Calculou-se a distância do entreferro, o espraçamento do fluxo, e por fim, o número de voltas do indutor já considerando essas variáveis.

```

1 %Entreferro em cm
2 LG=((0.4*pi*NL^2*Ac*10^-8)/L)-(MPL/MIM)
3 %espraçamento do fluxo
4 FRI= 1+((LG/Ac^(1/2))*log(2*G/LG))
5 %número de voltas do enrolamento do indutor recalculado
6 NLnovo=(LG*L/(0.4*pi*Ac*FRI*10^(-8)))^(1/2)

```

Calculou-se o diâmetro do fio de cobre, e definiu-se pela tabela o fio AWG17, calculou-se a resistência do do indutor.

```

1 AWLB=IL/J %area do fio de cobre nu em cm^2
2 AWGL=17 %numero AWG do fio
3 AWLBnovo=10.39*10^-3 %
4 %diametro do fio em cm
5 microOHMSporCM=165.8
6 DIAM=0.1220
7 %resistencia do indutor em ohms
8 RL = MLT*NLnovo*microOHMSporCM*10^-6

```

E por fim definiu-se quantos metros de cobre seria necessário para enrolar 314 voltas no indutor.

```

1 UMAVOLTA = PERIMEXT*1.26;
2 METRAGEM = NLnovo*UMAVOLTA*10^-2

```

3 MONTAGEM

Para realizar a montagem do indutor CA, foram utilizados os materiais apresentados na imagem 2, utilizou-se , fio de cobre esmaltado AWG-19, carretel, luva termocontrátil, fita crepe, chapas de aço-silício do tipo EI, papel isolante e parafusos e arruelas.

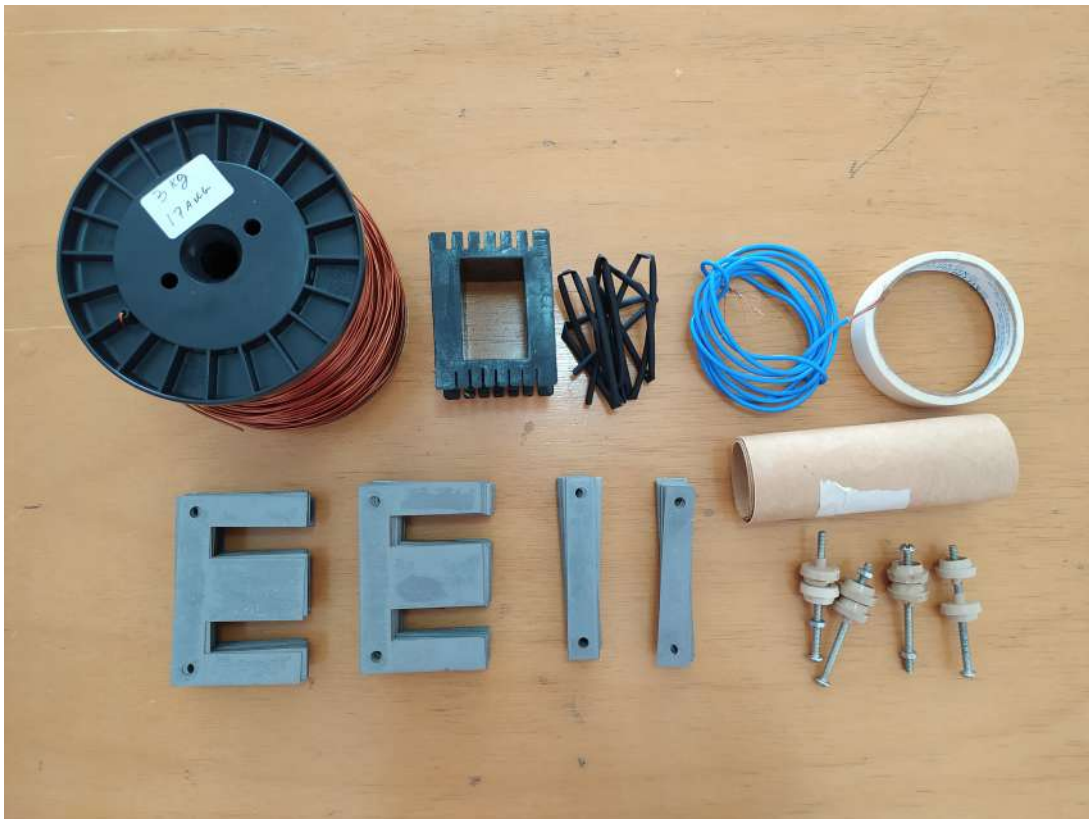


Figura 2: Materias utilizados para a implementação do indutor

3.1 CARRETEL

Para a confecção do Indutor utilizou-se um carretel pronto, modelo EI-138 conforme especificado na seção Dimensionamento do Indutor, o carretel utilizado é mostrado na Figura 3.

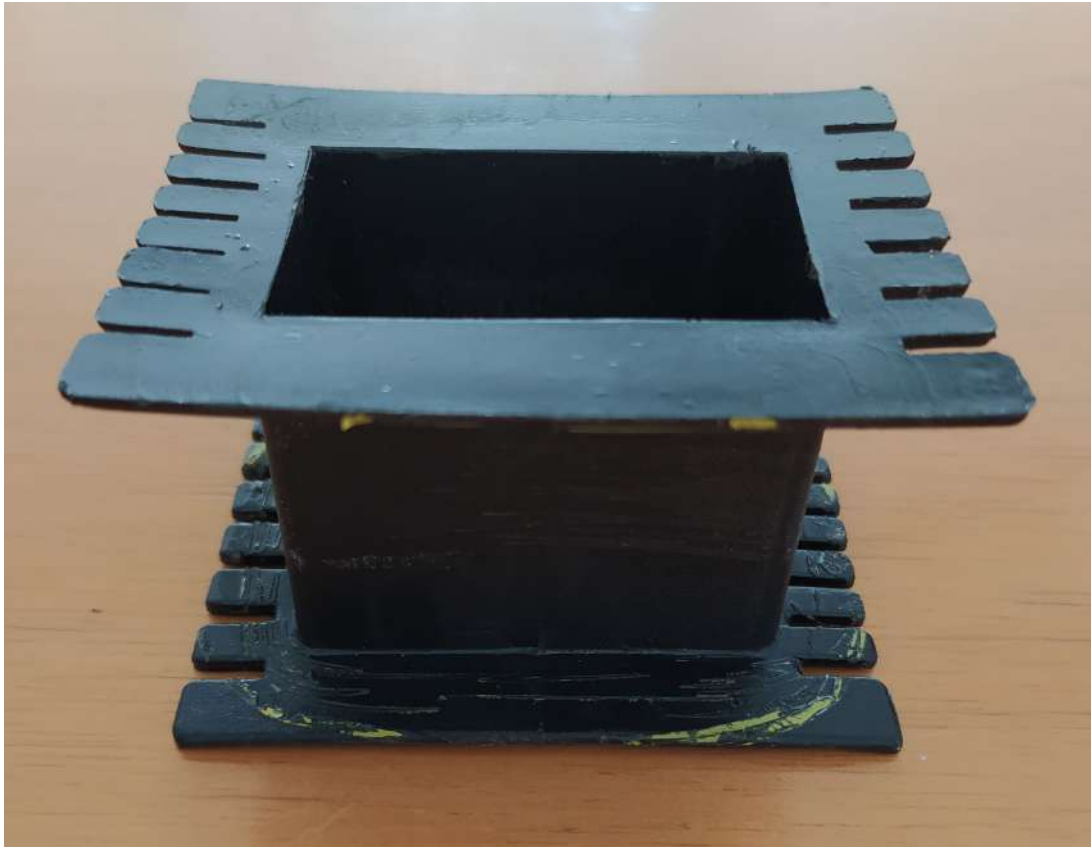


Figura 3: Carretel utilizado para a implementação do indutor

3.2 ENROLAMENTO

Devido a janela do núcleo ter um espaço reduzido e o fio de cobre esmaltado utilizado ser pouco maleável, utilizou-se uma bobinadeira profissional, pois bobiná-lo manualmente não foi possível. Com a bobinadeira é possível acomodar melhor o enrolamento no carretel, conseqüentemente, ter um melhor fator de utilização de janela. A bobinadeira utilizada é apresentada na figura 4.

Na figura 5, é apresentada uma sequência de imagens que consistem no processo de bobinagem do Indutor: (1) O carretel é colocado na bobinadeira com um suporte de madeira, para não danificar o carretel; (2) O fio de cobre esmaltado é colocado no carretel e começa o processo de bobinagem, a bobinadeira marca o número de voltas, e é enrolado o fio de cobre com cuidado para não encavalar as voltas; (3) A partir da segunda camada, é necessário dar batidas com o martelo para evitar as "barrigas", que ocorrem devido ao ângulo reto do carretel; (4) as 314 voltas são concluídas, e é passada uma fita crepe; (5) o corpo do carretel é envolto por um papel isolante e fixado com fita crepe; (6) as extremidades do cobre são lixadas e soldadas recebendo um fio elétrico, na junção é colocada uma luva termocontrátil e envolvido com papel isolante novamente.

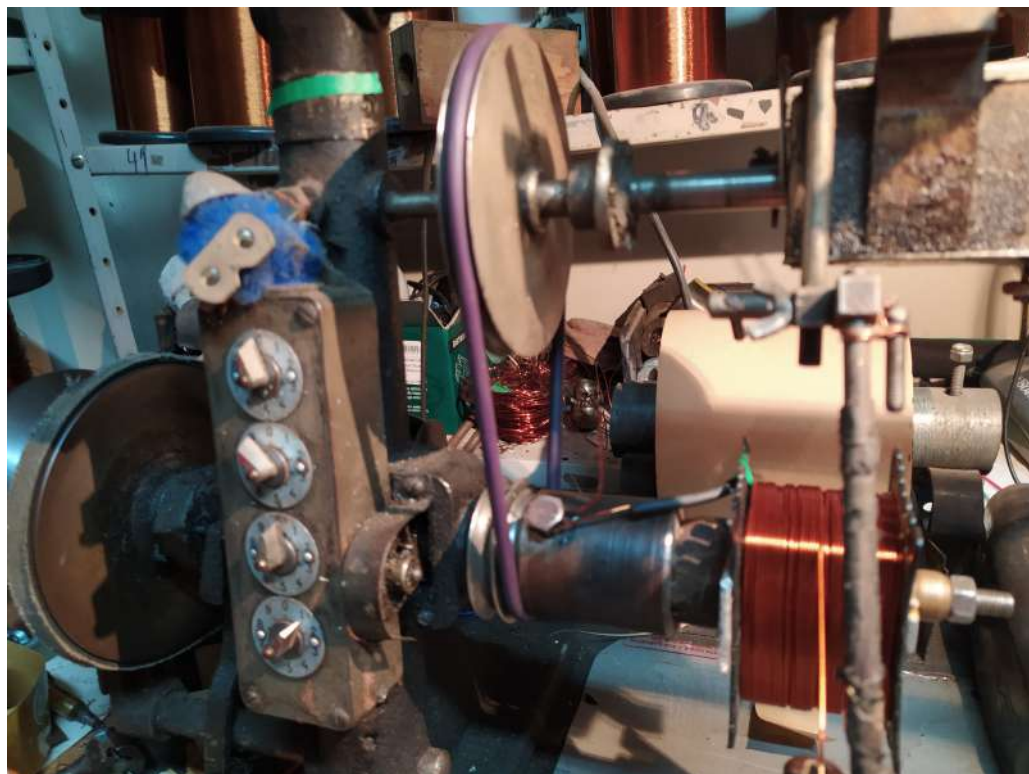


Figura 4: Bobinadeira

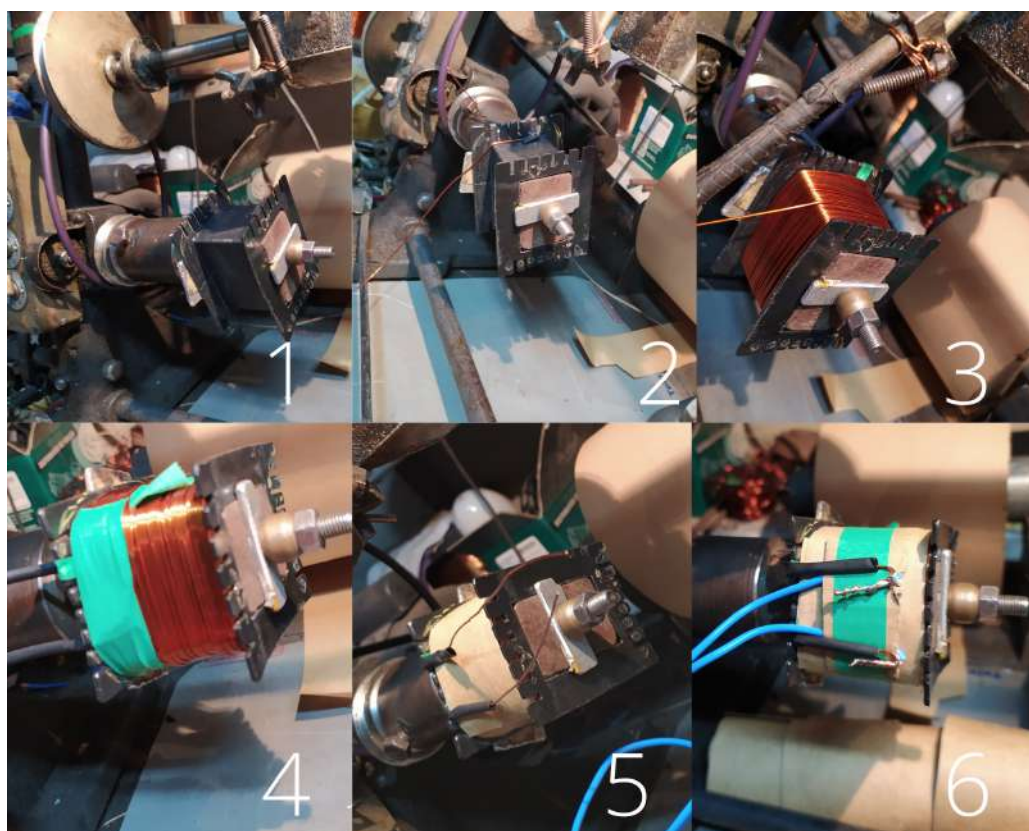


Figura 5: Bobinagem do Indutor

3.3 NÚCLEO

Para a montagem do indutor, contou-se as lâminas de aço-silício, onde continham 75 lâminas E e 75 lâminas I, conforme apresentada na figura 6 .

Foram inseridas as lâminas, de maneira que todas as lâminas do tipo E ficassem do mesmo lado, exceto as duas das extremidade, as lâminas do meio foram inseridas com auxílio de um martelo a medida que foram ficando "apertadas", para deixar as lâminas bem ajustadas. A figura 7 apresenta as lâminas do tipo E inseridas na janela do carretel.

Após inseridas as lâminas do tipo E, foram inseridas as lâminas do tipo I, da mesma maneira, as lâminas do tipo I das extremidades de um lado, e as outras em outro sentido, após ser inseridas a maior parte delas, as últimas foram inseridas também com auxílio do martelo, de maneira que o núcleo ficasse bem ajustado. Essa etapa é apresentada na figura 8

Depois das lâminas inseridas, foram parafusadas para garantir que as lâminas estejam o mais justas possíveis, com intuito de minimizar as vibrações, como é apresentado na figura 7 o indutor concluído.

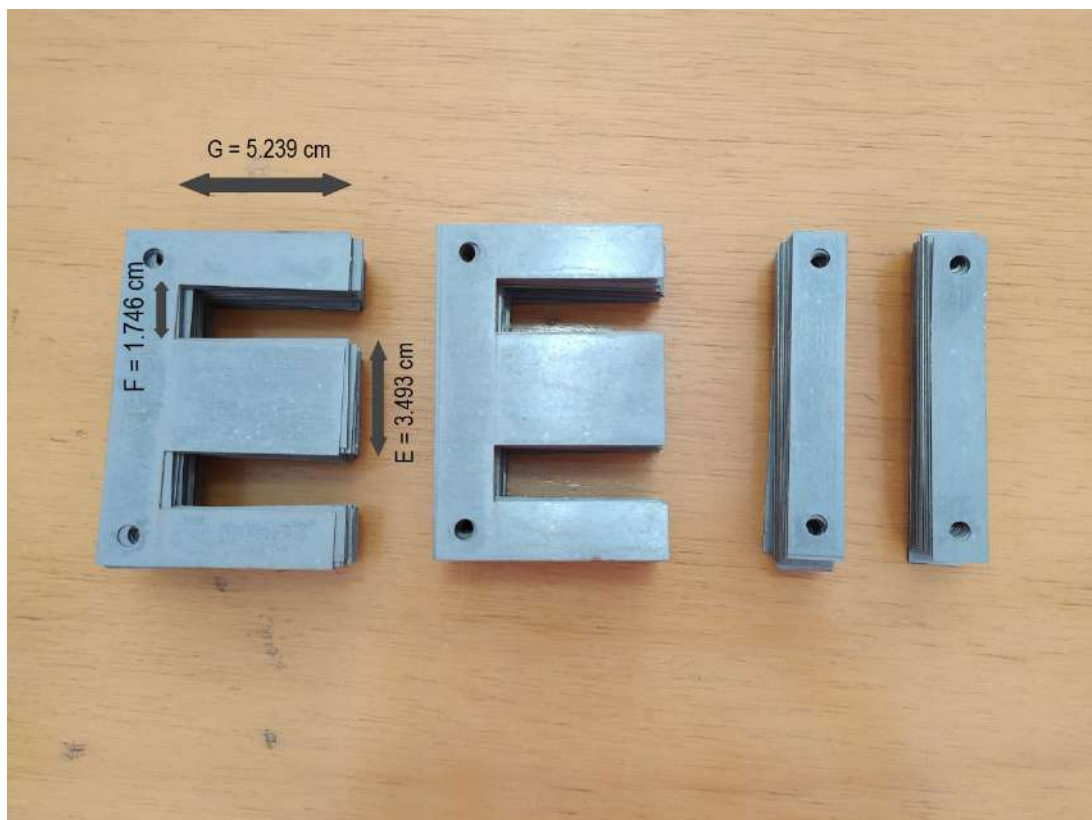


Figura 6: Lâminas de aço-silício do núcleo do Indutor



Figura 7: Inserção das chapas de aço-silício no carretel do indutor

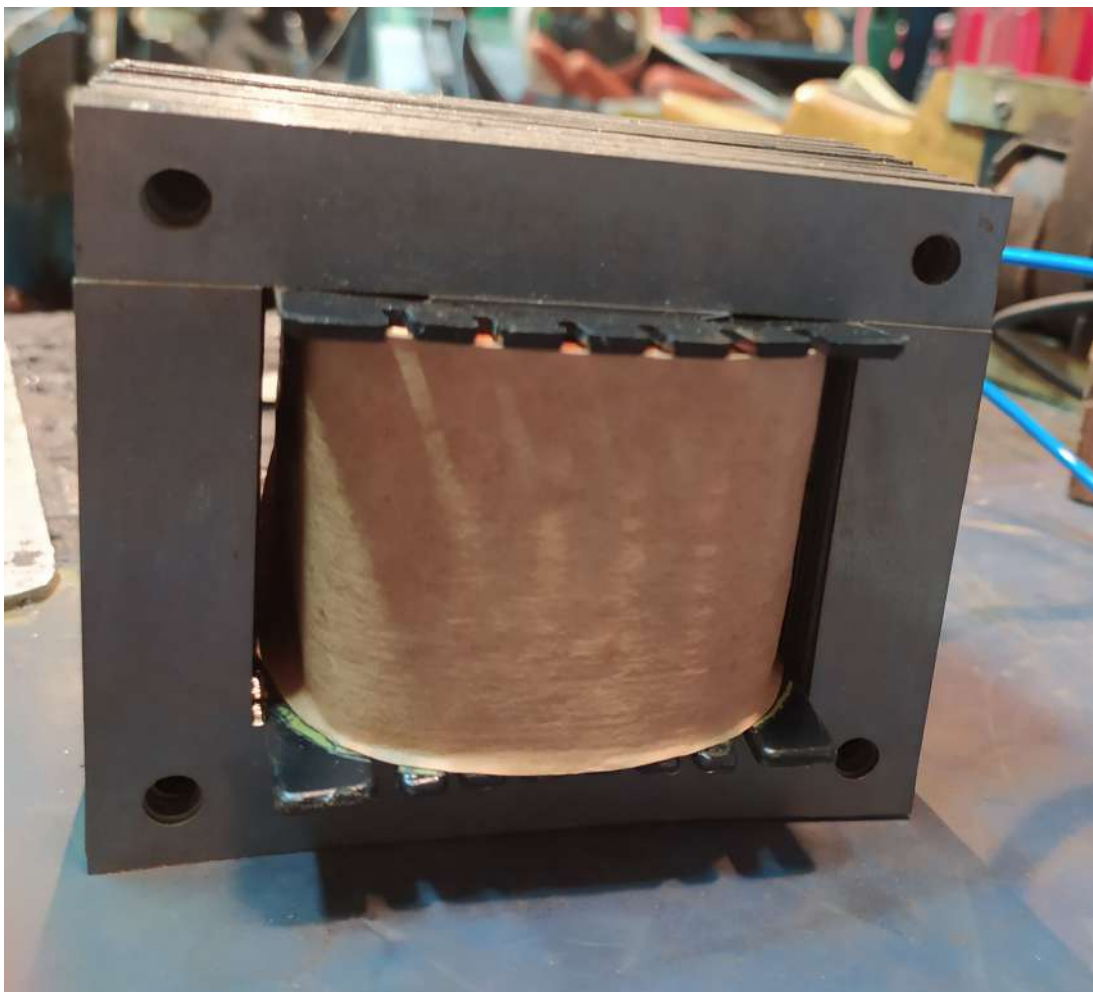


Figura 8: Chapas de aço-silício inseridas no carretel do indutor



Figura 9: Inductor concluído

4 RESULTADOS APRESENTADOS

Neste capítulo serão expostos os resultados encontrados nos ensaios e testes do Indutor realizados em laboratório e uma discussão sobre os mesmos. Os ensaios e testes foram realizados no laboratório da UTFPR-PB.

4.1 ENSAIO DE CONTINUIDADE

Com o objetivo de identificar possíveis falhas no Indutor, realizou-se o ensaio de continuidade para verificar se o enrolamento apresentava continuidade, e se a carcaça e o enrolamento estavam isolados. Para realizar o teste, com multímetro na escala de continuidade, colocou-se as ponteira uma em cada extremidade do enrolamento, e como o esperado os enrolamentos não estavam interrompidos. Também realizou-se o teste para a carcaça e o enrolamento, e observou-se que eles estavam isolados. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Ensaio de Continuidade do Indutor

	Saída 1°	Carcaça
Entrada 1°	Contínuo	Não
Carcaça	Não	

4.2 TESTE DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO

Para este teste utilizou-se um megôhmetro do laboratório de Máquinas Elétricas da UTFPR-PB, a resistência de isolamento entre o enrolamento e a carcaça aferida foi de $260M\Omega$. Este resultado constata que há uma isolação entre a carcaça e o enrolamento, como o esperado. O ensaio é apresentado na figura 10.

4.3 MEDIÇÃO DA INDUTÂNCIA

Para determinar a indutância do protótipo utilizou-se um multímetro como mostra a figura 11. A indutância medida foi de $0,320H$.



Figura 10: Ensaio de medição da resistência de isolamento

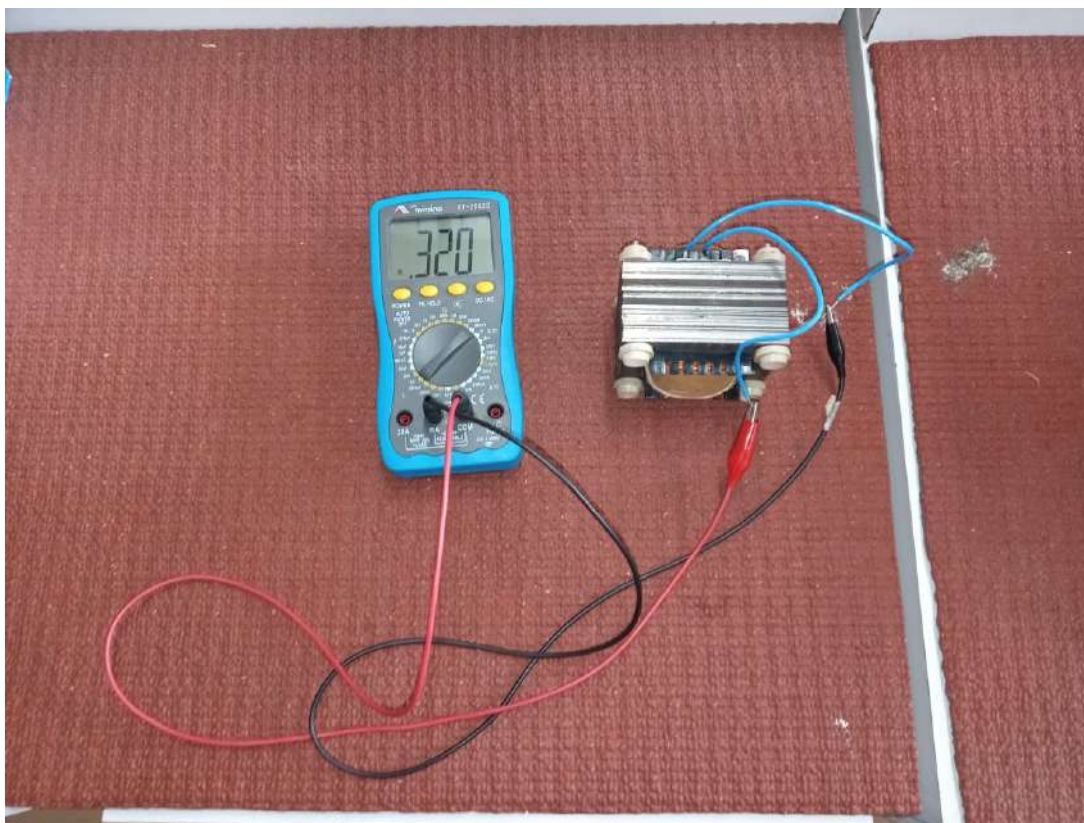


Figura 11: Medição da indutância do protótipo

4.4 TESTE DE CIRCUITO L

A figura ?? apresenta o circuito L montado em laboratório. Foi aplicado uma tensão de aproximadamente de 127V. Na tabela 3 são apresentados os resultados medidos experimentalmente, e a reatância indutiva calculada.

Tabela 3: Valores medidos no circuito L

$V_f(V)$	$V_L(V)$	$I_L(A)$	$X_L(\Omega) = V_L/I_L$
126,7	127	0,35	362,8

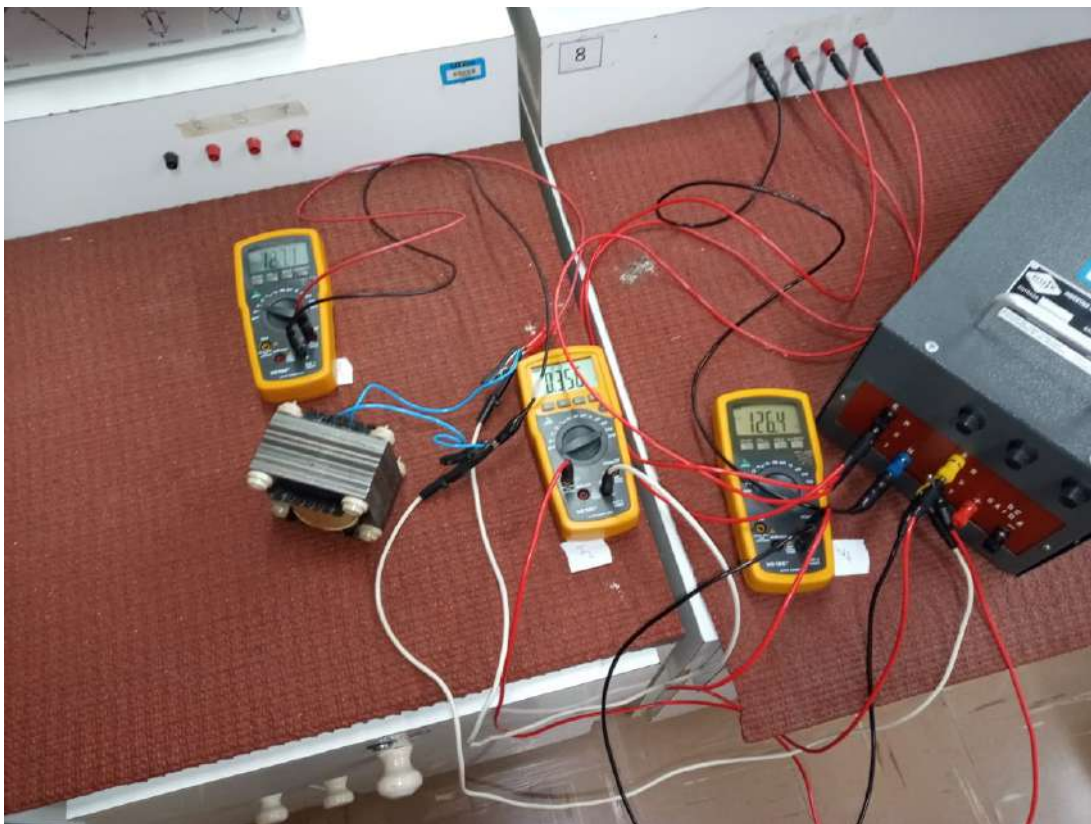


Figura 12: Circuito L

5 CONCLUSÃO

Este trabalho atingiu os objetivos propostos, o protótipo funcionou como o esperado com alguns ajustes. Foi possível ter um grande aprendizado sobre o projeto de indutores, sobre o dimensionamento, ensaios em laboratórios, materiais e de todo o processo de montagem.

A principio era para se utilizar um condutor AWG 17, mas com esse cabo não foi possível dar o números de voltas total do projeto. Isso ocorreu devido ao fator de utilização da janela. Na literatura é indicado usar o fator de 0,4, porém na prática, o número de voltas enroladas em cada camada não são iguais, a medida que o número de camadas aumenta menor o número de voltas por camada. A solução foi utilizar o cabo AWG 19, deixando mais folga para o condutor, e diminuindo o fator de utilização da janela.

A corrente máxima suportada pelo fio de cobre esmaltado está diretamente relacionada a forma como o fio é aplicado, em casos em que o fio aqueça demais por causa da corrente elétrica, o esmalte isolante pode danificar-se. Em enrolamentos compactos para transformadores de grande porte, recomenda-se utilizar um condutor com uma densidade de corrente abaixo de 2,5 amperes por milímetro quadrado. Em transformadores menores, nos quais, a dissipação de calor se dá mais facilmente, recomenda-se uma densidade de corrente de 3 amperes por milímetro quadrado. Em indutores pequenos com poucas camadas de fio, pode-se utilizar uma densidade de corrente de 6 amperes por milímetro quadrado, e nesse caso é necessário uma ventilação forçada.

O fio AWG 17 para uma densidade de corrente 2,5 ampères por milímetro quadrado suporta 2,6 amperes, já para densidade de corrente 3 ampères por milímetro quadrado suporta 3,1 amperes, e se a densidade é 6 ampères por milímetro quadrado esse mesmo fio suportará 6,3 amperes. Da mesma forma, o fio AWG 19 suporta 1,6; 1,9 e 3,9 amperes para as respectivas densidades de correntes 2,5; 3 e 6 ampères por milímetro quadrado. Para este protótipo, devido ao ajuste quando a corrente chegar à 3 amperes é necessário entrar com ventilação forçada para garantir que não ocorra a degradação do esmalte do condutor.

Para próximos trabalhos recomenda-se utilizar um fator de utilização de ja-

nela menor que 0,35 para que o número de voltas totais no indutor seja igual ao de projeto. Também recomenda-se utilizar uma bobinadeira, pois dessa forma o enrolamento fica mais compacto e possibilita dar maior número de voltas numa mesma camada.

Na montagem do protótipo a inserção das lâminas no carretel do indutor não foi a ideal, pois foi inserida as lâminas E todas em um sentido, e depois as lâminas I em outro sentido. Para próximos trabalhos recomenda-se inserir as lâminas de maneira alternada, uma lâmina E em um sentido, e depois uma lâmina E em outro sentido, e de forma análoga para lâminas I. Desta forma é possível diminuir o entreferro, então a relutância será menor, e conseqüentemente reduzirá o efeito de espraiamento nas linhas de campo do fluxo magnético.

REFERÊNCIAS

GOMES, Luís Fernando Etges *et al.* Projeto e desenvolvimento de indutores de núcleo ei. Florianópolis, SC, 2019.

HURLEY, William G; WÖLFLE, Werner H. **Transformers and inductors for power electronics: Theory, design and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

MARCHESE, Abramo Ribeiro. Transformador monofásico: Comparativo de materiais para os enrolamentos. UTFPR, Pato Branco, PR, 2018.

MARTIGNONI, Alfonso. **Transformadores. 8ª**. [S.l.]: Edição, Editora Globo, São Paulo-SP, Brasil, 1991.

MCLYMAN, Colonel William T. **Transformer and inductor design handbook**. [S.l.]: Dekker New York,, USA, 1988.

RAWLINS, Clay. **Basic AC circuits**. [S.l.]: Elsevier, 2000.

SADIKU, Matthew NO; ALEXANDER, Charles K; MUSA, Sarhan. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

SILVA, Kauana Palma. Utilização de indutores no ramo da engenharia elétrica. **MATERIAIS ELÉTRICOS: COMPÊNDIO DE TRABALHOS VOLUME 5**, p. 452, 2015.

ANEXO A - TABELAS PARA O DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR

EI, Laminations, (Tempel) 14 mil									
Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm	Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm
EI-375	0.953	0.953	0.794	1.905	EI-112	2.857	2.857	1.429	4.286
EI-021	1.270	1.270	0.794	2.064	EI-125	3.175	3.175	1.588	4.763
EI-625	1.588	1.588	0.794	2.381	EI-138	3.493	3.493	1.746	5.239
EI-750	1.905	1.905	0.953	2.857	EI-150	3.810	3.810	1.905	5.715
EI-875	2.223	2.223	1.111	3.333	EI-175	4.445	4.445	2.223	6.668
EI-100	2.540	2.540	1.270	3.810	EI-225	5.715	5.715	2.858	8.573

Fonte: McLyman (2011).

EI, Laminations, (Tempel) 14 mil									
Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm	Part No.	D cm	E cm	F cm	G cm
EI-375	0.953	0.953	0.794	1.905	EI-112	2.857	2.857	1.429	4.286
EI-021	1.270	1.270	0.794	2.064	EI-125	3.175	3.175	1.588	4.763
EI-625	1.588	1.588	0.794	2.381	EI-138	3.493	3.493	1.746	5.239
EI-750	1.905	1.905	0.953	2.857	EI-150	3.810	3.810	1.905	5.715
EI-875	2.223	2.223	1.111	3.333	EI-175	4.445	4.445	2.223	6.668
EI-100	2.540	2.540	1.270	3.810	EI-225	5.715	5.715	2.858	8.573

Fonte: McLyman (2011).

EI, Laminations, (Tempel) 14 mil										
Part No.	W _{tcu} grams	W _{ife} grams	MLT cm	MPL cm	W _a	A _c	W _a	A _p	K _g	A _t
					A _c	cm ²	cm ²	cm ⁴	cm ⁵	cm ²
EI-375	36.1	47.2	6.7	7.3	1.754	0.862	1.512	1.303	0.067	46.2
EI-021	47.6	94.3	8.2	8.3	1.075	1.523	1.638	2.510	0.188	62.1
EI-625	63.5	170.0	9.5	9.5	0.418	2.394	1.890	4.525	0.459	83.2
EI-750	108.8	296.0	11.2	11.4	0.790	3.448	2.723	9.384	1.153	120.0
EI-875	171.0	457.0	13.0	13.3	0.789	4.693	3.705	17.384	2.513	163.0
EI-100	254.0	676.0	14.8	15.2	0.790	6.129	4.839	29.656	4.927	212.9
EI-112	360.0	976.0	16.5	17.2	0.789	7.757	6.124	47.504	8.920	269.4
EI-125	492.0	1343.0	18.3	19.1	0.789	9.577	7.560	72.404	15.162	333.0
EI-138	653.0	1786.0	20.1	21.0	0.789	11.588	9.148	106.006	24.492	403.0
EI-150	853.0	2334.0	22.0	22.9	0.789	13.790	10.887	150.136	37.579	479.0
EI-175	1348.0	3711.0	25.6	26.7	0.789	18.770	14.818	278.145	81.656	652.0
EI-225	2844.0	7976.0	32.7	34.3	0.789	31.028	24.496	760.064	288.936	1078.0

Fonte: McLyman (2011).

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

Fonte: McLyman (2011).

Core Loss Equation Factors				
Magnetics HF Powder Cores				
Material	Permeability μ	Coefficient k	Coefficient (m)	Coefficient (n)
High Flux	14	$4.8667(10^{-7})$	1.26	2.52
High Flux	26	$3.0702(10^{-7})$	1.25	2.55
High Flux	60	$2.0304(10^{-7})$	1.23	2.56
High Flux	125	$1.1627(10^{-7})$	1.32	2.59
High Flux	147	$2.3209(10^{-7})$	1.41	2.56
High Flux	160	$2.3209(10^{-7})$	1.41	2.56

Fonte: McLyman (2011).

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

Fonte: McLyman (2011).

Configuration	K_i
Two-coil C core	0.0388
Single-coil C core	0.0775
Lamination	0.1550

Fonte: McLyman (2011).