



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
CURSO DE BACHARELADO EM TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

MARIA FERNANDA CARVALHO DUARTE

MODELAGEM MATEMÁTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA
DEDICADO A MENSURAÇÃO DE INDUTÂNCIA DE
SOLENOIDES

PAU DOS FERROS - RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

D812 Duarte, Maria Fernanda Carvalho.
MODELAGEM MATEMÁTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA
DEDICADO A MENSURAÇÃO DE INDUTÂNCIA DE SOLENOIDES
/ Maria Fernanda Carvalho Duarte. - 2023.
39 f. : il.

Orientador: José Wagner Cavalcanti Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Tecnologia da
Informação, 2023.

1. Indutância . 2. Laboratório Didático . 3.
Sistema Embarcado. I. Silva, José Wagner
Cavalcanti , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Pau dos Ferros
Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARIA FERNANDA CARVALHO DUARTE

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA
DEDICADO A MENSURAÇÃO DE INDUTÂNCIA DE
SOLENOIDES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado na Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Tecnologia da Informação.

Orientador: Prof. Dr. José Wagner Cavalcanti Silva

PAU DOS FERROS - RN

2023

MARIA FERNANDA CARVALHO DUARTE

**MODELAGEM MATEMÁTICA E AUTOMAÇÃO DE SISTEMA
DEDICADO A MENSURAÇÃO DE INDUTÂNCIA DE
SOLENOIDES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado na Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, como requisito
parcial para obtenção do título de
Bacharel em Tecnologia da Informação

Aprovado em: 12 / 05 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

\\

Prof. Dr. José Wagner Cavalcanti Silva (UFERSA)

Presidente

\\

Prof. Dr. Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo (UFERSA)

Membro Examinador

\\

Prof. Dr. Glaydson Francisco Barros de Oliveira (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus, por ter me concedido saúde, força e dedicação para conseguir chegar até aqui. Que com minha fé conseguir motivação e paciência para enfrentar os desafios que vinham ao longo do projeto.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador José Wagner Cavalcanti Silva, por ter me orientado tão bem, pela paciência, conselhos e todo conhecimento repassado a mim. Sua orientação foi fundamental para que eu pudesse desenvolver de forma sólida e consistente meu trabalho.

Além disso, não poderia deixar de agradecer aos meus familiares e amigos pelo apoio e incentivo recebido, que sem seu apoio não poderia ter enfrentado tão bem as dificuldades que vinham no decorrer do caminho.

Obrigado novamente a todos que de alguma forma contribuíram e me deram apoio nesta jornada. Esta conquista é tão minha quanto de vocês.

RESUMO

Frente a dificuldade de se trabalhar experimentalmente com um modelo ideal para a descrição matemática da indutância de solenoides construídos nos laboratórios didáticos, foi realizado um estudo acerca da forma de refinar tal modelo. Além disso, com vistas a facilitar o estudo experimental da indutância foi desenvolvida a automação do protocolo experimental por meio de um sistema embarcado. O trabalho realizado tem o caráter de uma pesquisa aplicada quanto a sua natureza, e com respeito aos seus objetivos, possui o caráter exploratório, além de ser de caráter experimental. Tal trabalho visou o desenvolvimento do sistema em questão, com o intuito de facilitar a execução da análise dos resultados experimentais, o ensino da física com programação, além de otimizar o tempo de efetivação do protocolo experimental. Os resultados obtidos para indutância dos solenoides analisados foram comparados com as previsões dos modelos matemáticos que descrevem a indutância para o caso ideal e real.

Palavras Chave: Indutância, Laboratório Didático, Sistema Embarcado.

ABSTRACT

Faced with the difficulty of working experimentally with an ideal model for the mathematical description of the inductance of solenoids built in didactic laboratories, a study was carried out on how to refine such a model. Furthermore, with a view to facilitating the experimental study of inductance, the automation of the experimental protocol was developed through an embedded system. The work done has the character of an applied research in terms of its nature, and with respect to its objectives, has an exploratory character, in addition to being experimental character. Such work aimed the development of the system in question, with the purpose of facilitating the execution of the analysis of the experimental results, the teaching of physics with programming, in addition to optimizing the effectiveness time of the experimental protocol. The results obtained for the inductance of the analyzed solenoids were compared with the predictions of the mathematical models that describe the inductance for the ideal and real case.

Keywords: Inductance, Didactic Laboratory, Embedded System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem de um microcontrolador	16
Figura 2 - Placa de desenvolvimento	17
Figura 3 - Placas de arduino UNO, exemplificando a comunicação física RX-TX	18
Figura 4 - Imagem de um indutor e o sentido da corrente elétrica	19
Figura 5 - Exemplo de um solenoide.	20
Figura 6 - Representação de um circuito RLC.	21
Figura 7 - Solenoides do laboratório.	24
Figura 8 - Solenoides desenvolvidos pelos alunos da disciplina de laboratório de eletricidade e magnetismo do CMPF.	25
Figura 9 - Esquema de um solenoide e o sistema de coordenadas.	27
Figura 10- Sistema embarcado desenvolvido	30
Figura 11- Sistema embarcado	31
Figura 12- Dados coletados do solenoide do laboratório com 300 espiras e indutância conhecida de: 23,2mH.	33
Figura 13- Dados coletados do solenoide do laboratório com 600 espiras e indutância conhecida de: 9,7mH.	33
Figura 14- Dados coletados do solenoide do laboratório com 900 espiras e indutância conhecida de: 2,25 mH.	34
Figura 15: Dados coletados do solenoide desenvolvido pelos alunos da disciplina de laboratório de eletricidade e magnetismo, com 199 espiras.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados das indutâncias obtidos experimentalmente para solenoides com número de espiras diferentes.	24
Tabela 2 - Solenoide de 199 espiras medida pelo modelo ideal.	25
Tabela 3 - Solenoide de 238 espiras medido pelo modelo ideal.	26
Tabela 4 - Solenoide de 199 espiras, medido pelo modelo proposto.	29
Tabela 5: -Solenóide de 238 espiras, medido pelo modelo proposto.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TCC - Trabalho de Conclusão de Curso

GND - Ground

RCL - Resistor-capacitor-indutor

RLC - Resistor-indutor-capacitor

CMPF - Centro multidisciplinar de Pau dos Ferros

UFERSA- Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. PROBLEMA	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2. Objetivos específicos	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Sistemas Embarcados	15
3.1.1. Microcontroladores	15
3.1.2. Placa de Arduino	16
3.1.3. Comunicação RX-TX	17
3.2. Modelo ideal para indutância de solenoides	18
3.2.1. Indutor	18
3.2.2. Indutância de Solenoides	19
3.3. Circuito Resistor-Capacitor-Indutor (RCL) em série em regime A.C.	21
4. METODOLOGIA DA PESQUISA	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5.1 Protocolo experimental para a mensuração da indutância	24
5.2 Proposta de um modelo matemático para o cálculo da indutância	26
5.3 Automação do protocolo experimental	30
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

1. INTRODUÇÃO

A cada dia que se passa a tecnologia vem se reinventando, tornando o trabalho mais simples e eficiente. No âmbito dos laboratórios didáticos do Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros (CMPF) na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), nos quais os cursos de engenharias estão diretamente ligados, tal fato se torna ainda mais nítido. Isso se deve ao fato de que os estudantes, especialmente os de engenharia do campus, buscam criar suas próprias versões de instrumentos, utilizando a tecnologia como uma tática para entender e assimilar melhor o conteúdo teórico. Além disso, a carência de equipamentos destinados a explorar experimentalmente temas específicos nos laboratórios didáticos voltados aos cursos de engenharia e tecnologia, tem despertado nos estudantes, principalmente aqueles da área de tecnologia, a determinação de querer desenvolver equipamentos que possibilitem o estudo mais minucioso dos modelos teóricos estudados nas disciplinas do curso.

Neste sentido, tem sido despertada uma tempestade de ideias, levando algumas vezes a delinear formas de como aplicar a tecnologia na solução das dificuldades que estão dispostas na realidade, além de aproximar os alunos das suas áreas de atuação. Tal delineamento está submetido a diversas etapas até o estágio de consolidação de como o sistema ou protótipo funciona.

Durante as aulas do componente curricular Laboratório de Eletricidade e Magnetismo do CMPF, tem sido notado os erros obtidos nos resultados experimentais nas atividades práticas que são realizados com os instrumentos do laboratório, e que tem promovido reflexões sobre o fato de que todos os componentes disponíveis possuem suas limitações e que são usados para diferentes propósitos. Tendo em vista essas condições, durante os experimentos observa-se alguns erros que não podem ser explicados apenas como os erros provenientes dos instrumentos. Pensando em tais dificuldades no processo experimental, percebeu-se que os protocolos experimentais podem ser melhorados com a introdução do modelo de um sistema embarcado dedicado, em especial, sua aplicação à mensuração da indutância de indutores voltados ao estudo do eletromagnetismo. Ademais, a automação do protocolo experimental possibilita otimizar o tempo de execução experimental de modo a

empregá-lo no estudo do modelo matemático que descreve a indutância de solenoides reais.

2.PROBLEMA

Nos cursos de graduação nas áreas de engenharia e das ciências exatas e naturais, a forma como é abordada o estudo do eletromagnetismo se dá através de modelos teóricos que levam em conta situações ideais. Durante as aulas práticas nos laboratórios, tem-se deparado com muitas situações nas quais as previsões do modelo teórico ideal não descrevem satisfatoriamente o comportamento observado experimentalmente. Gerando, dessa forma, erros muitas vezes altos que não podem ser explicados apenas pelas incertezas instrumentais, indicando, por conseguinte, que há erros sistemáticos provenientes das limitações do modelo matemático que descreve o fenômeno. O estudo da indutância de um solenoide se encaixa nesta característica: o modelo ideal, por meio do qual é calculada esta grandeza, possui a prerrogativa de que a magnitude do raio do solenoide seja muito menor do que seu comprimento. Tal condição não é satisfeita para os indutores cilíndricos utilizados nos laboratórios didáticos.

Destarte, para estudar o modelo matemático que leve em conta a condição em que o raio e o comprimento do solenoide tenham a mesma ordem de grandeza, é necessário delinear um protocolo experimental para investigar a adequação deste modelo aos dados experimentais. Contudo, na conjuntura do laboratório didático de eletricidade e magnetismo não há um arranjo experimental dedicado à mensuração da indutância de um indutor.

Dessa forma, o problema de pesquisa pode ser consubstanciado por meio das seguintes questões:

- Que protocolo experimental pode ser delineado para estimar a indutância de um solenoide cilíndrico, e que auxilie no estudo do aperfeiçoamento do modelo teórico que define tal grandeza?
- O uso de um sistema embarcado, composto pela placa de desenvolvimento arduino, pode viabilizar a execução do protocolo experimental proposto?

Assim posto, podemos definir os objetivos deste trabalho como sendo:

2.1 Objetivo Geral

o objetivo deste trabalho foi estudar um modelo matemático para a indutância de um indutor cilíndrico e elaborar um protocolo experimental para a estimativa

da indutância de solenoides. Além disso, buscou-se também desenvolver um arranjo experimental automatizado por meio de sistema embarcado.

2.2. Objetivos específicos

- Estudar os meios de efetuar modificações no modelo matemático que descreve a indutância, a fim de possibilitar uma melhor concordância entre o valor previsto pelo modelo e o valor mensurado;
- Validar tanto o arranjo experimental construído quanto o procedimento delineado para a medida da indutância;
- Comparar os resultados previstos pelo modelo ideal e o proposto.

3.REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção vamos explorar os seguintes temas: sistemas embarcados e seu funcionamento; definição de microcontroladores; placa de desenvolvimento Arduino e comunicação via protocolo RX-TX. Além disso, será feita a descrição do modelo sobre o fenômeno de indução, explorando o tema de indutores e a dedução da indução de solenoides, bem como as características do circuito resistor-capacitor-indutor em série com uma fonte alternada.

3.1 Sistemas Embarcados

Um sistema embarcado ou *Embedded System*, são sistemas que possuem *hardware* e *software* trabalhando em conjunto, voltados para um propósito específico (SOUZA, 2023). Dentro de um sistema eletrônico com maior complexidade, os sistemas embarcados são responsáveis por uma atividade específica. Em outras palavras, com o conjunto de operações definidas e em funcionamento, tais sistemas podem ser adaptados a equipamentos com a função de monitorar o funcionamento de uma área em particular. Por exemplo: o funcionamento do semáforo pode ser implementado através de circuitos integrados pela porta lógica *OR*, baseada na estrutura de decisão *OU*. Essa estrutura permite o controle das luzes do sinal de trânsito, atendendo a propósitos específicos, como acendendo somente uma por vez, ascendendo a vermelha, ou a laranja ou a verde. Contudo, por meio dos microcontroladores, tais quais os que compõem o arduino, é possível implementar a mesma lógica para o funcionamento do semáforo utilizando menor número de circuitos integrados, já que tais sistemas são geralmente compactos e eficientes.

3.1.1. Microcontroladores

Os microcontroladores são uma junção de hardware com software, e são utilizados para diversas funções conforme seja programado para desempenhar a função específica. Apesar de compactos, os microcontroladores possuem memória, interfaces de entrada e saída e processador. São bastante utilizados em circuitos de controles projetados para fornecer informações para o controle. Conforme ilustrado na figura 1:

Figura 1- Imagem de um microcontrolador



Fonte: Victor Vision, 2022.

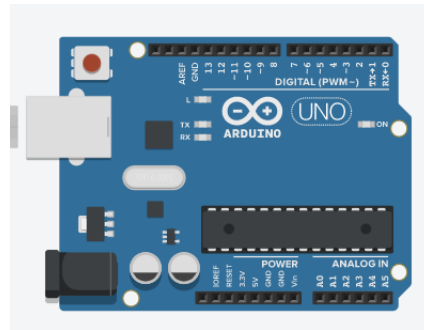
Existem vários modelos de microcontroladores, que com base no propósito irão apresentar diferentes componentes utilizados em sua construção como mostra em (Mello, 2022) as principais classificações destes tipos de microcontroladores:

- **MICROCONTROLADORES ATMEL AVR (ATMEGA, ATTINY, ETC.):** Foram um dos primeiros tipos de microcontroladores desenvolvidos com o propósito de usar memória flash para armazenar a programação implementada a ele.
- **MICROCONTROLADORES PIC MICROCHIP TECHNOLOGY (PIC16, PIC24, ETC.):** Estes microcontroladores possuem a arquitetura criada por Harvard que é capaz de processar os dados em uma taxa de 8 a 32 bits.
- **MICROCONTROLADORES BASEADOS EM ARQUITETURA ARM:** São famosos por terem uma reação em tempo real e otimizarem a forma de resposta.

3.1.2. Placa de Arduino

O Arduino é uma placa de prototipagem eletrônica de código aberto e *hardware* livre, que tem como seu principal componente um microcontrolador, que na sua versão Uno, é o ATMEGA328P, como mostrado na figura 2:

Figura 2 - Placa de desenvolvimento



Fonte: Adaptado de <https://www.tinkercad.com/>

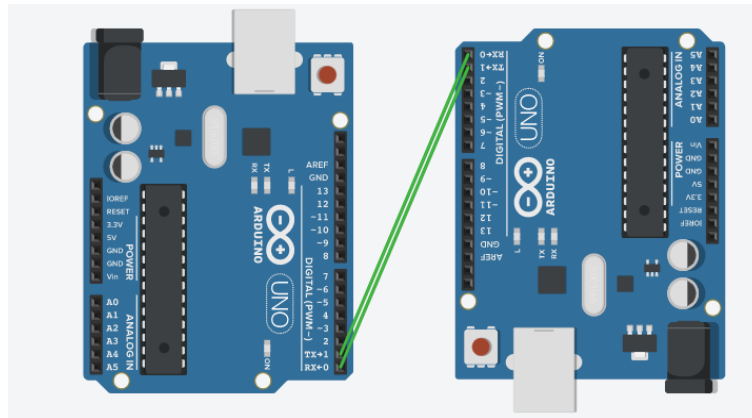
O microcontrolador é bastante utilizado, pois pode reduzir consideravelmente o tamanho de um sistema eletrônico composto por circuitos integrados básicos, além de possibilitar a programação através de um ambiente de desenvolvimento integrado, as IDE's de programação, onde o código é desenvolvido e compilado em linguagem de máquina. Por exemplo, a IDE do arduino onde o funcionamento do sistema é inscrito usando a linguagem de alto nível e transformado em linguagem de máquina para o arduino.

Os componentes utilizados para os sistemas que são desenvolvidos com esta placa possuem diferentes propósitos, podendo assim criar diversos programas usando como base a linguagem de programação C/C++.

3.1.3. Comunicação RX-TX

A comunicação via protocolo RX/TX visa estabelecer uma comunicação de forma serial entre duas placas de desenvolvimento, através de um protocolo implementado RX/TX. A comunicação pode ser feita utilizando comunicação via *bluetooth* ou por meio de fios (conhecido como *jumpers*), como ilustrado na figura a seguir:

Figura 3 - Placas de arduino UNO, exemplificando a comunicação física RX-TX.



Fonte: Adaptado de <https://www.tinkercad.com/>

Esta comunicação proporciona uma troca de dados de forma cruzada entre as placas nos pontos RX, que irão conectar ao ponto TX, e assim sucessivamente. As placas irão operar de modo a ter uma placa primária e uma placa secundária. A placa primária coleta dados e envia as informações para a placa secundária, que recebe tais dados e trata essas informações para alinhá-las de acordo com os propósitos e necessidades do programa.

3.2. Modelo ideal para indutância de solenoides

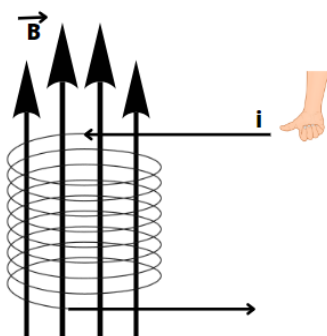
Nesta subseção, com o intuito de melhorar o entendimento do modelo ideal para a indutância, foi explorado a definição de indutor, como atua e como é desenvolvido, e em seguida foi apresentado a indutância de um solenoide através do modelo ideal abordado nos livros didáticos.

3.2.1. Indutor

Os indutores são componentes eletrônicos, bastante utilizados em circuitos elétricos. Esses dispositivos possuem a capacidade de armazenar energia em forma de campo magnético, segundo Halliday (2012, p. 591), um indutor pode ser usado para produzir um campo magnético com as propriedades desejadas. O tipo mais simples de indutor é o solenoide (ou, mais precisamente, a parte central de um solenoide longo). São construídos a partir de um fio enrolado em torno de um núcleo tomando a forma de uma bobina, onde o material utilizado é algum tipo de material ferromagnético. Pelas espiras de um solenoide, que está sendo usado como indutor, flui uma corrente elétrica e esta,

por sua vez, produz um fluxo magnético no centro do solenoide. Esta característica é descrita pela autoindução, que se caracteriza como a capacidade que um indutor tem de gerar uma tensão de forma induzida, com base na corrente que flui entre as espiras. A tensão induzida possui polaridade que pode ser positiva ou negativa, de acordo com a direção da corrente elétrica. Entendido isto, temos um exemplo de um indutor:

Figura 4- Imagem de um indutor e o sentido da corrente elétrica.



Fonte: Autoria própria.

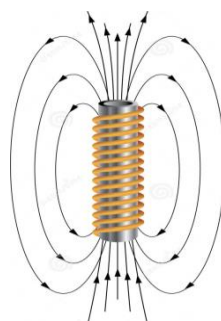
Através desta imagem, pode-se verificar o sentido da corrente elétrica, o indutor expresso como um espiral, em torno de um núcleo, e o campo magnético criado pelo indutor na parte central do mesmo. Os indutores podem ser utilizados, junto com capacitores e resistores, para formar circuitos ressonantes.

3.2.2. Indutância de Solenóides

A indutância é a relação entre o fluxo magnético que percorre o circuito e a intensidade produzida pela corrente elétrica, que produz o campo magnético. A indutância irá depender do número de espiras, com isso, se aumentar o número de espiras de um solenoide, por exemplo, aumenta a intensidade de indutância da bobina.

A partir das propriedades desejadas, um indutor pode ser utilizado para produzir um campo magnético. Em (HALLIDAY, 2012) O tipo mais simples de indutor é o solenoide longo, ou de forma mais objetiva a sua parte central, como expressado na Figura 5:

Figura 5 - Exemplo de um solenoide



Fonte: Autoria própria.

Portanto, como o tipo mais simples é o solenoide longo, sabendo que as espiras conduzem corrente, e a corrente produz um fluxo magnético Φ_B no centro do indutor. Com isso, a equação que descreve tal comportamento é expressa por:

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} \quad (1)$$

onde, N é o número de espiras e i é corrente que flui pelas espiras do indutor. Tendo em vista que, as espiras de um solenoide estão unidas através do campo magnético, o produto de $N\Phi_B$ É chamado de enlaçamento de fluxo magnético. Portanto, a indutância L é a medida de enlaçamento do fluxo magnético que é produzido pelo indutor por unidade de corrente.

Contudo, outra maneira de representar a indutância de um indutor é pela expressão:

$$L = \frac{N\mu_0 A}{l} \quad (2)$$

onde μ_0 , A e l são, respectivamente, a permeabilidade magnética do vácuo, a área da seção reta do indutor e o comprimento deste. A equação (2) é mais conveniente para determinar a indutância, pois depende apenas das informações geométricas do indutor, independente da corrente elétrica que flui sobre este. As equações (1) e (2) para o cálculo da indutância são apenas aplicáveis para uma situação ideal, na qual o comprimento do indutor é muito maior do que seu raio. O sistema internacional define o henry (H), como unidade padrão da indutância, como é expressado em:

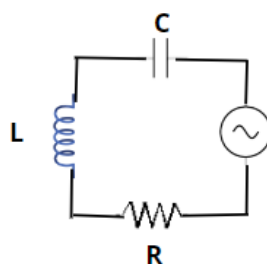
$$\begin{aligned}\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A \\ &= 4\pi \times 10^{-7} H/A\end{aligned}$$

3.3. Circuito Resistor-Capacitor-Indutor (RCL) em série em regime A.C.

Um circuito RLC ou RCL, é um circuito elétrico que contém uma resistência (R), um capacitor (C), e uma bobina (L), onde estes componentes são conectados em série com uma fonte de tensão elétrica alternada. Através deste circuito, é criado um sistema que pode ser utilizado em várias aplicações. São conhecidos como circuitos de segunda ordem por serem descritos por equações diferenciais com derivadas de segunda ordem.

Ao aplicar tensão ao circuito RCL, a corrente flui pelos componentes, onde cada um deles desempenha uma função diferente no funcionamento do circuito. O capacitor tem a função de armazenar energia em um campo elétrico, a resistência converte parte da energia elétrica em calor e a bobina armazena energia magnética em um campo magnético. A maneira como esses componentes se combinam pode levar a alguns fenômenos, tais como: oscilações e ressonância, bastante úteis em aplicações que envolvem produção de sinais elétricos de frequência específica, em sistemas de comunicação e em eletrônica de potência. Um exemplo deste tipo de circuito é como mostra a imagem abaixo:

Figura 6 - Representação de um circuito RLC



Fonte: Autoria própria.

Na imagem 6, temos um circuito RLC, conectados em série e sendo alimentado por uma fonte de tensão alternada, onde como base as tensões atuam sobre cada componente acontecem fenômenos diferentes.

As oscilações em um circuito RCL, necessariamente são variações de corrente ou de tensão em um período de tempo, esses tipos de oscilações podem acontecer de duas formas: a amortecida e a não amortecida, o que irá determinar é a relação dos valores do resistor, capacitor e indutor. Os tipos de oscilações amortecidas ocorrem quando a resistência R é elevada o suficiente para dissipar energia, fazendo com que reduza de forma gradual essas oscilações. As oscilações não amortecidas são o contrário, neste cenário o valor da resistência tem que ser muito baixo para que as oscilações continuem de forma indefinida.

O fenômeno de ressonância ocorre quando a frequência de um sinal de entrada é igual a frequência comum do circuito, com isso a tensão que atua sobre o capacitor será igual a tensão sobre o indutor. Sabemos que nesta configuração, a tensão e corrente elétricas do circuito podem apresentar uma defasagem entre si. Tal diferença de fase pode ser obtida pela equação que descreve a diferença de fase:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_C - X_L}{R}\right) \quad (3)$$

No caso especial no qual o circuito esteja em ressonância, a diferença de fase φ é nula. Para que esta situação seja satisfeita, as tensões elétricas sobre o capacitor (V_C) e o indutor (V_L) devem ser iguais. Monitorando esta condição por meio de multímetros, que monitoravam as tensões V_C e V_L , registrava-se a frequência na qual o circuito estava na condição de ressonância. Sabemos que a frequência de ressonância é dada por:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Dessa forma, conhecida a frequência de ressonância e o valor da capacitância do capacitor conectado ao circuito, é possível determinar a indutância pela expressão 5:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_R^2 C} \quad (5)$$

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

No que se refere a sua natureza, este trabalho é uma pesquisa aplicada e, no que diz respeito aos seus objetivos, é do tipo exploratória.

Portanto, de modo a atingir os objetivos descritos, a metodologia empregada nesta pesquisa, que possuiu um caráter experimental, foi empregada o uso de uma abordagem dedutiva no estudo do modelo matemático para a definição da indutância, e de uma abordagem indutiva para investigar, por meio da experimentação, a adequação do modelo teórico ao resultado da mensuração da indutância e da implementação do sistema embarcado para a mensuração desta grandeza. De fato, de acordo com Fachin (2005), “há uma reciprocidade entre os métodos indutivo e dedutivo”, portanto no percurso metodológico de uma investigação é possível valer-se de ambos os métodos.

A partir do referencial teórico foi realizado o estudo do modelo matemático que descreve a indutância de um solenoide, tanto da perspectiva de uma situação ideal quanto da real. Ainda por meio do referencial teórico, de modo a estabelecer os fundamentos do funcionamento dos sistemas embarcados e, a partir de então, desenvolvido a proposta de automação do arranjo experimental dedicado à mensuração da indutância.

Com relação ao delineamento do protocolo experimental, foram previamente utilizados indutores cujas indutâncias fossem conhecidas. Por meio de um arranjo experimental composto pelos instrumentos e equipamentos do laboratório de eletricidade, foi implementado um circuito oscilante com o objetivo de estimar a indutância do indutor e comparar com o valor informado pelo fabricante do dispositivo. Esse procedimento validou o protocolo experimental para a estimativa da indutância para qualquer indutor.

A etapa final consistiu em implementar o sistema embarcado no protocolo delineado, utilizando-o como uma ferramenta de monitoramento das tensões elétricas sobre os componentes eletrônicos que o compõem. Por meio desses parâmetros foi estimada a indutância de um indutor cilíndrico e o seu resultado confrontado com aqueles provenientes da previsão do modelo ideal e do modelo proposto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Protocolo experimental para a mensuração da indutância

Para embasar a necessidade de reescrever o modelo matemático para a indutância, foi delineado um processo experimental com o intuito de obter experimentalmente esta grandeza e comparar com previsões do modelo ideal e do proposto. Tal processo foi executado por meio de um arranjo experimental constituído por um circuito composto por resistor, capacitor e indutor (solenóide) conectados em série com uma fonte de tensão elétrica alternada como pode se observar na figura 6.

Para validar o protocolo experimental, utilizou-se de indutores com indutâncias conhecidas que fazem parte do patrimônio do laboratório de eletricidade e magnetismo figura 7. Na tabela 1, estão expostos os resultados para a frequência de ressonância (f_R), os valores experimentais (L_E) para a indutância e os valores conhecidos (L_C), informados pelo fabricante e o erro percentual calculado em relação ao valor conhecido.

Figura 7- Solenóides do laboratório



Fonte: Autoria própria

Tabela 1: Resultados das indutâncias obtidos experimentalmente para solenóides com número de espiras diferentes.

N°	300	600	900
L_C (H)	2,25E-03	9,70E-03	2,32E-02
L_E (H)	2,12E-03	9,43E-03	2,28E-02
f_R (HZ)	11.390	5.400	3.470
E%	5,78%	2,77%	1,55%

Dessa forma, aplicar o protocolo experimental descrito para medir indutância de qualquer indutor cuja indutância não seja conhecida com segurança. Neste trabalho foram utilizados dois indutores cilíndricos produzidos por estudantes que cursaram a disciplina de laboratório de eletricidade em semestres anteriores.

Figura 8: Solenoides desenvolvidos pelos alunos da disciplina de laboratório de eletricidade e magnetismo do CMPF.



Fonte: Autoria própria.

Partindo desse resultado foi calculada a discrepância entre o valor obtido por meio da expressão que define a indutância para o modelo ideal de solenoide e o obtido experimentalmente.

Tabela 2 - Solenoide de 199 espiras medida pelo modelo ideal

Parâmetros do Solenoide	Indutância pelo Modelo Ideal	Indutância Medida	E%
-------------------------	------------------------------	-------------------	----

N = 199	$L = 1,06 \cdot 10^{-5} H$	$L = 1,65 \cdot 10^{-3} H$	99,95%
$R = 3,53 \cdot 10^{-2} m$			
$A = 3,90 \cdot 10^{-3} m^2$			
$L = 9,25 \cdot 10^{-2} m$			

Tabela 3 - Solenoide de 238 espiras medido pelo modelo ideal.

Parâmetros do Solenoide	Indutância pelo Modelo Ideal	Indutância Medida	E%
N = 238	$L = 3,67 \cdot 10^{-6} H$	$L = 8,98 \cdot 10^{-4} H$	99,59%
$R = 2,07 \cdot 10^{-2} m$			
$A = 1,35 \cdot 10^{-3} m^2$			
$L = 1,10 \cdot 10^{-1} m$			

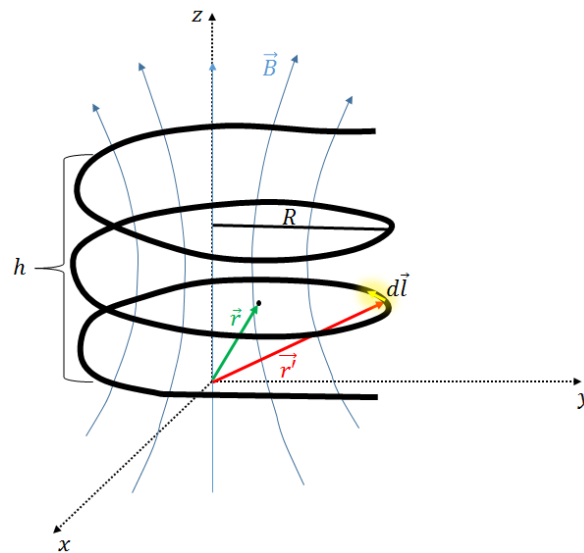
5.2 Proposta de um modelo matemático para o cálculo da indutância

A discrepância calculada através da expressão do erro absoluto subsidiou a reflexão acerca da maneira pela a qual a expressão da indutância poderia ser reescrita para que a diferença entre os resultados experimentais e os previstos pelo modelo pudesse ser menor. As proposições que fundamentaram o processo dedutivo para a obtenção da nova expressão para a indutância foram:

- O campo magnético no interior do solenoide é função da coordenada z sobre seu eixo de simetria;
- A taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético no interior do solenoide foi substituída pela taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético médio ao longo do comprimento do solenoide.

Com base no método dedutivo, o modelo matemático para a indutância do solenoide foi expresso em termos dos seus parâmetros geométricos (raio e comprimento). Visando deixar mais claro e intuitivo o raciocínio empregado para a elaboração do modelo matemático, a figura 9, expõe o esquema de um solenoide real e o sistema de coordenadas através do qual foram escritos os vetores de posição para o cálculo do campo magnético.

Figura 9: Esquema de um solenoide e o sistema de coordenadas.



Fonte: Autoria própria.

Pela simetria do problema, pode-se escrever o vetor que localiza o ponto do espaço no qual o campo magnético será calculado e o que localiza o vetor que define o elemento infinitesimal de comprimento em coordenadas cilíndricas. Portanto,

$$\vec{r} = r\hat{\rho} + z\hat{k} \quad (6)$$

$$r' = R\hat{\rho} + z'\hat{k} \quad (7)$$

$$\vec{R} = r - r' = (r - R)\hat{\rho} + (z - z')\hat{k} \quad (8)$$

$$d\vec{l} = R d\theta \hat{\theta} \quad (9)$$

Lembrando que a Lei de Biot-Savart pode ser escrita em termos dos parâmetros apresentados acima, obtemos:

$$d\vec{b} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{l} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} \quad (10)$$

Substituindo as equações (8) e (9) em (10) é possível mostrar que o campo magnético escrito em coordenadas cilíndricas é dado por:

$$\vec{B} = \frac{N\mu_0 i R}{2l} \left[\frac{z-l}{\sqrt{R^2+(z-l)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R^2+z^2}} \right] \hat{k} \quad (11)$$

Perceba que para cada valor da coordenada r (distância entre o ponto de interesse para o valor campo magnético e o eixo de simetria) e da coordenada z (que define a altura em relação à uma das bases do solenoide). A expressão para calcular o fluxo magnético é dada por:

$$\phi_B = NBA \quad (12)$$

onde N , $\hat{n}$ e da são, respectivamente, o número de espiras do solenoide, o versor perpendicular à área delimitada pelas espiras e o elemento infinitesimal de área.

$$\phi_B(z) = \frac{N^2 \mu_0 R A i}{2l} f(z), \quad (13)$$

onde,

$$f(z) = \left(\frac{z-l}{\alpha} - \frac{z}{\beta} \right) \text{ e } \alpha = \sqrt{R^2 + (z-l)^2}, \beta = \sqrt{R^2 + z^2}$$

Está evidente que para cada valor do parâmetro z , haverá um valor para o fluxo magnético. Portanto, aplicando a outra prerrogativa indicada no percurso metodológico, vamos definir o fluxo magnético médio ao longo do comprimento do solenoide:

$$\overline{\phi_B} = \frac{1}{l} \int_0^l \phi_B(z) dz \quad (14)$$

$$\overline{\phi_B} = \frac{N^2 \mu_0 A i}{2l^2} \int_0^l \phi_B(z) dz \quad (15)$$

Dessa forma, o fluxo médio do campo magnético ao longo do comprimento do solenoide é expresso por:

$$\overline{\phi_B} = \frac{N^2 A \mu_0}{l^2} (R - \sqrt{R^2 + l^2}) i \quad (16)$$

Levando em conta a lei de indução de Faraday que:

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt},$$

e sabendo que

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\left[\frac{N^2 A \mu_0}{l^2} (R - \sqrt{R^2 + l^2}) \right] \frac{di}{dt},$$

a indutância de um solenoide real será o valor absoluto da expressão entre colchetes:

$$L = \frac{N^2 A \mu_0}{l^2} (R - \sqrt{R^2 + l^2}) \quad (17)$$

Caso o sentido do campo magnético seja considerado na direção contrária ao sentido de crescimento do eixo z , o resultado da equação acima será positivo, portanto, como sabemos que a indutância é uma grandeza positiva, o sinal negativo obtido é devido ao sistema de referência adotado.

Partindo da expressão (17), é possível calcular a indutância dos solenoides utilizados.

Tabela 4: Solenóide de 199 espiras, medido pelo modelo proposto.

Parâmetros do Solenoide	Indutância pelo Modelo Proposto	Indutância Medida	E%
N = 199	$L = 1,45 \cdot 10^{-3} H$	$L = 1,65 \cdot 10^{-3} H$	12,12 %
$R = 3,53 \cdot 10^{-2} m$			
$A = 3,90 \cdot 10^{-3} m^2$			
$l = 9,25 \cdot 10^{-2} m$			

Tabela 5: -Solenóide de 238 espiras, medido pelo modelo proposto.

Parâmetros do Solenoide	Indutância pelo Modelo Ideal	Indutância Medida	E%
N = 238	$L = 7,24 \cdot 10^{-4} H$	$L = 8,98 \cdot 10^{-4} H$	19,37 %
$R = 2,07 \cdot 10^{-2} \text{ m}$			
$A = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$			
$l = 1,10 \cdot 10^{-1} \text{ m}$			

Com uma primeira aproximação, foi possível diminuir a discrepância entre os resultados experimentais e o previsto pelo modelo teórico. Contudo, o modelo precisa ser refinado de modo a obtermos uma melhor concordância entre os resultados, além de melhorar os componentes do arranjo experimental, já que o erro está sendo comparado com o valor experimental obtido.

5.3 Automação do protocolo experimental

No processo de automação foi necessário entender, com base nos instrumentos do laboratório de eletricidade e magnetismo, como eram realizadas as medições das indutâncias, por qual equação era possível realizar este cálculo. Para que fosse possível a partir de tais informações desenvolver de forma automatizada um sistema que realizaria essas medições de forma prática.

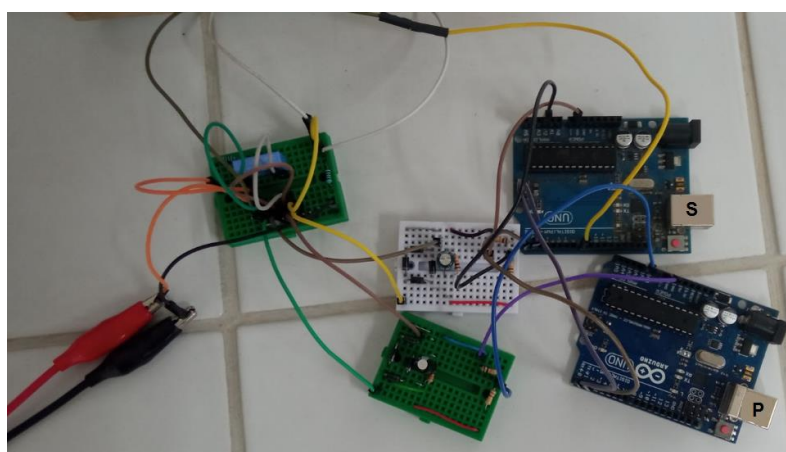
As imagens 10 e 11, mostram o sistema embarcado desenvolvido, composto pelo circuito RCL implementado em *protoboard*, o arduino primário e secundário, um gerador de função e o solenoide desenvolvido pelos alunos.

Figura 10: Sistema embarcado desenvolvido



Fonte: Autoria própria.

Figura 11: Sistema embarcado



Fonte: Autoria própria.

Para a confecção do sistema em questão, de início foi implementado um algoritmo que seria capaz de medir a tensão sobre um capacitor, com um funcionamento similar ao de um multímetro. Logo em seguida, foi desenvolvido um novo algoritmo que atuaria medindo a tensão sobre o indutor, combinando esses dois algoritmos em um único programa com o objetivo de medir as tensões sobre o indutor e o capacitor, bem como a frequência do circuito.

Para validar o processo que estava sendo automatizado, fez-se o uso de equipamentos do laboratório para verificar se o resultado coletado era aproximado do resultado medido utilizando os multímetros, osciloscópio e gerador de função, para aumentar ou diminuir a frequência, além do circuito RCL implementado. Foi possível observar que as medições não estavam coerentes, levando em consideração que quando medidos de formas separadas funcionavam normalmente. Então, foi considerado uma série de novas

discussões, até que foi constatado que tal diferença estaria ligada ao único ponto comum da placa de desenvolvimento, por mais que tenha várias portas de GND, ou seja, portas comuns, que compartilham o mesmo ponto de referência em toda a placa.

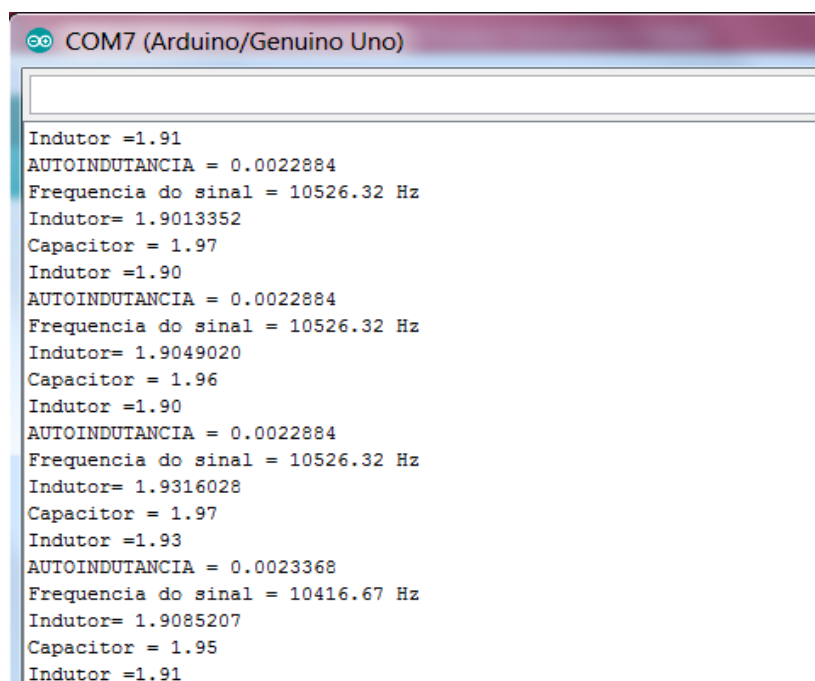
Para resolver tais erros, foi implementada a comunicação RX/TX de forma física entre duas placas de desenvolvimento arduino. Na placa principal assim denominada pelo protocolo, coletou os dados de tensão sobre o capacitor e enviava os dados para a placa secundária que fazia a medição da tensão sobre o indutor, coletava a frequência e tratava os dados. Implementando este protocolo, foi possível chegar a bons resultados usando o sistema embarcado, uma vez que, utilizando duas placas, foi resolvido o problema de referência.

Com base nos resultados obtidos acerca do modelo mais preciso, é possível validar o protocolo experimental, como visto anteriormente, com base em um menor percentual de erro para a indutância. Com isso, foi adicionado ao programa, o cálculo com base neste no modelo, mandando os comandos para a placa, para que na condição do circuito em ressonância, fosse calculado o valor da indutância do indutor em questão, através da equação proposta descrita por 17.

Com o sistema pronto, foram feitos diversos ensaios para verificar se o mesmo estava funcionando de forma satisfatória. Assim, provando que a realização da implementação proposta que, com base no arranjo experimental utilizado, mostra que o sistema está apto a medir a indutância de qualquer solenoide, assim como os desenvolvidos pelos alunos durante o projeto de laboratório. Dessa forma, torna-se necessário apenas conectá-lo ao sistema e encontrar a frequência em que o circuito estará em ressonância, para que o cálculo seja realizado, como mostra o exemplo da interface do programa arduino.

Como resultados, obteve-se capturas de tela de diversos testes que mostram diferentes bobinas, a indução calculada pelo sistema embarcado demonstrado através das imagens a seguir, e a aproximação dessas medidas com o valor informado pelo fabricante, utilizando um capacitor de 100 nF e dois resistores de 100 Ω .

Figura 12: Dados coletados do solenoide do laboratório com 300 espiras e indutância conhecida de: 2,25 mH



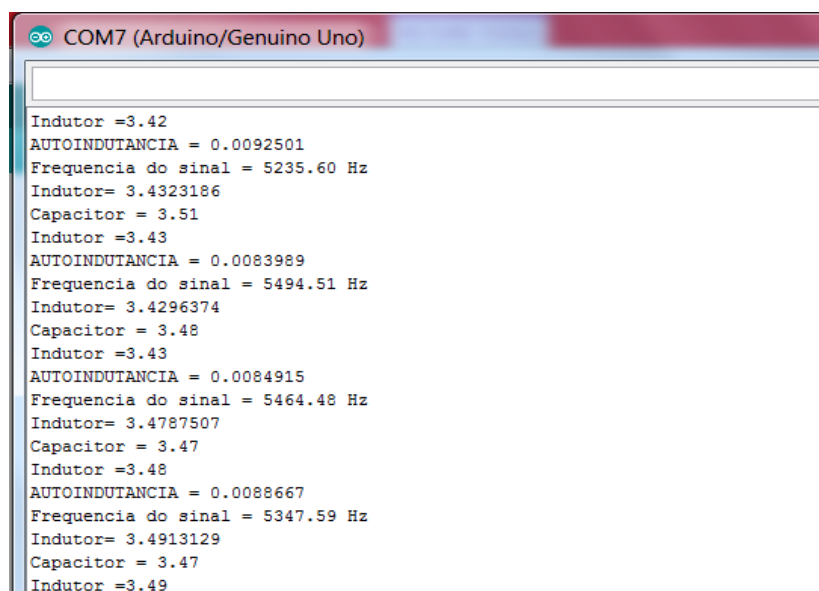
```

COM7 (Arduino/Genuino Uno)

Indutor =1.91
AUTOINDUTANCIA = 0.0022884
Frequencia do sinal = 10526.32 Hz
Indutor= 1.9013352
Capacitor = 1.97
Indutor =1.90
AUTOINDUTANCIA = 0.0022884
Frequencia do sinal = 10526.32 Hz
Indutor= 1.9049020
Capacitor = 1.96
Indutor =1.90
AUTOINDUTANCIA = 0.0022884
Frequencia do sinal = 10526.32 Hz
Indutor= 1.9316028
Capacitor = 1.97
Indutor =1.93
AUTOINDUTANCIA = 0.0023368
Frequencia do sinal = 10416.67 Hz
Indutor= 1.9085207
Capacitor = 1.95
Indutor =1.91
  
```

Fonte: Autoria própria.

Figura 13: Dados coletados do solenoide do laboratório com 600 espiras e indutância conhecida de: 9,7 mH



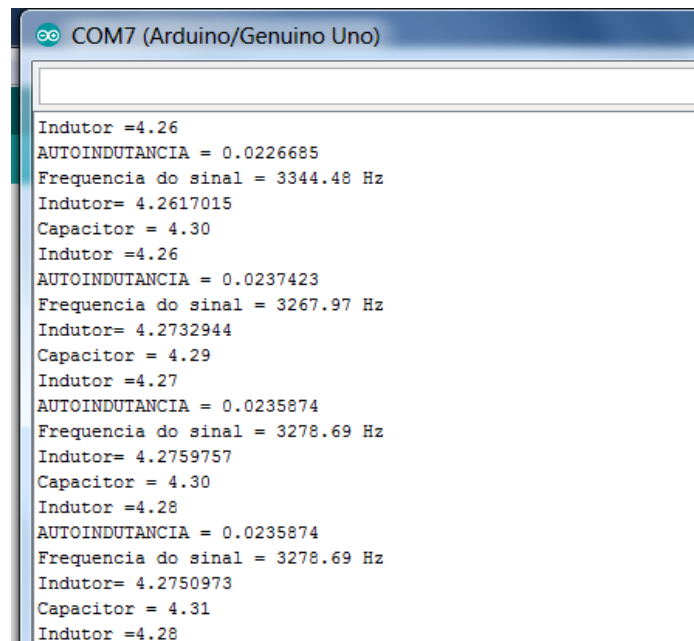
```

COM7 (Arduino/Genuino Uno)

Indutor =3.42
AUTOINDUTANCIA = 0.0092501
Frequencia do sinal = 5235.60 Hz
Indutor= 3.4323186
Capacitor = 3.51
Indutor =3.43
AUTOINDUTANCIA = 0.0083989
Frequencia do sinal = 5494.51 Hz
Indutor= 3.4296374
Capacitor = 3.48
Indutor =3.43
AUTOINDUTANCIA = 0.0084915
Frequencia do sinal = 5464.48 Hz
Indutor= 3.4787507
Capacitor = 3.47
Indutor =3.48
AUTOINDUTANCIA = 0.0088667
Frequencia do sinal = 5347.59 Hz
Indutor= 3.4913129
Capacitor = 3.47
Indutor =3.49
  
```

Fonte: Autoria própria.

Figura 14: Dados coletados do solenoide do laboratório com 900 espiras e indutância conhecida de: 23,2 mH



```

COM7 (Arduino/Genuino Uno)

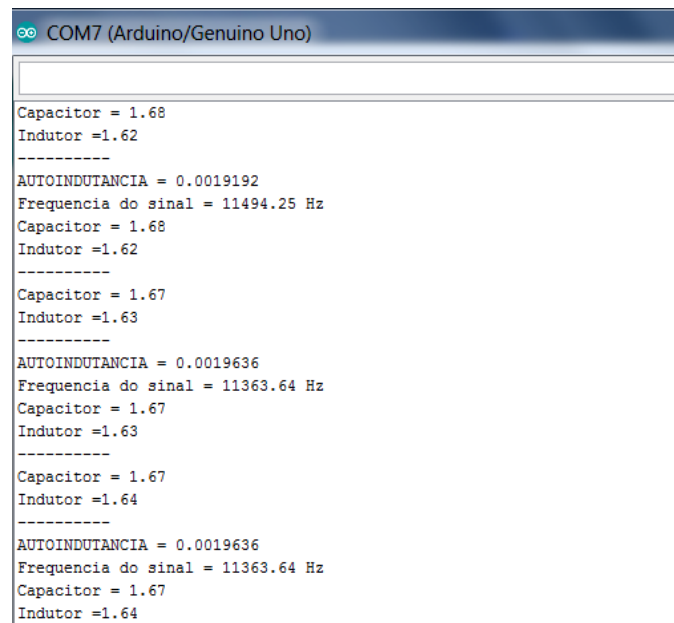
Indutor =4.26
AUTOINDUTANCIA = 0.0226685
Frequencia do sinal = 3344.48 Hz
Indutor= 4.2617015
Capacitor = 4.30
Indutor =4.26
AUTOINDUTANCIA = 0.0237423
Frequencia do sinal = 3267.97 Hz
Indutor= 4.2732944
Capacitor = 4.29
Indutor =4.27
AUTOINDUTANCIA = 0.0235874
Frequencia do sinal = 3278.69 Hz
Indutor= 4.2759757
Capacitor = 4.30
Indutor =4.28
AUTOINDUTANCIA = 0.0235874
Frequencia do sinal = 3278.69 Hz
Indutor= 4.2750973
Capacitor = 4.31
Indutor =4.28
  
```

Fonte: Autoria própria.

Neste primeiro caso, temos a bobina do laboratório que tem uma indutância conhecida de 23,2 mH, como na figura 14. Observe que o valor apresentado na interface do sistema embarcado para a indutância é bastante aproximado, sendo em alguns pulsos até igual ao da indutância conhecida. Como o apresentado nas figuras, os valores das tensões na hora da comparação para indicar que o circuito está em ressonância é um pouco diferente, o que pode ser explicado devido a pequena variação adicionada ao código, que permitem que essas tensões sejam um pouco diferentes, levando em consideração que há ruídos e não necessariamente elas consigam sempre ficar iguais devido a estes ruídos, assim como mostra nas Tabelas 4 e 5. Os valores conhecidos das bobinas do laboratório e o valor medido pelo sistema embarcado, além do percentual de erros.

Contudo, pode-se medir a indutância de quaisquer indutores, de forma que o resultado informado pela interface arduino está coerente com o valor estimado para o indutor, podendo medir de forma direta e automatizada estes valores das induções para quaisquer solenoides com um pequeno percentual de erro como mostrado na Figura 15, que pode ser melhorado com possíveis melhorias ao circuito do sistema embarcado.

Figura 15: Dados coletados do solenoide desenvolvido pelos alunos da disciplina de laboratório de eletricidade e magnetismo, com 199 espiras.



```
COM7 (Arduino/Genuino Uno)

Capacitor = 1.68
Indutor =1.62
-----
AUTOINDUTANCIA = 0.0019192
Frequencia do sinal = 11494.25 Hz
Capacitor = 1.68
Indutor =1.62
-----
Capacitor = 1.67
Indutor =1.63
-----
AUTOINDUTANCIA = 0.0019636
Frequencia do sinal = 11363.64 Hz
Capacitor = 1.67
Indutor =1.63
-----
Capacitor = 1.67
Indutor =1.64
-----
AUTOINDUTANCIA = 0.0019636
Frequencia do sinal = 11363.64 Hz
Capacitor = 1.67
Indutor =1.64
```

Fonte: Autoria própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou entender um sistema embarcado dedicado à mensuração da indutância de indutores cilíndricos levando em consideração que no laboratório didático de eletricidade e magnetismo no *campus* CMPF, não possui um arranjo experimental dedicado à medida da indutância de um indutor cilíndrico. Além disso, o estudo da implementação de um sistema embarcado, voltado à automação da coleta de dados, pode abrir novas possibilidades de pesquisa sobre a instrumentação aplicada ao ensino, em especial, ao ensino de física e de programação. A partir da metodologia utilizada que é uma pesquisa aplicada e, no que diz respeito aos seus objetivos, é do tipo exploratória, além de ser de caráter experimental.

Para que fosse possível uma percepção da elaboração de um protocolo experimental para a estimativa da indutância de um solenoide e desenvolver um arranjo experimental automatizado por meio de um sistema embarcado composto por duas placas arduino, foram desenvolvidos três objetivos específicos. O primeiro tratou de estudar os possíveis meios para que fosse possível efetuar modificações no modelo matemático que descreve a indutância, para conseguir uma melhor concordância entre o valor previsto pelo modelo e o valor mensurado. Com base nisso, verificou-se que o modelo proposto para o cálculo da indução foi satisfatório, partindo da verificação em que o erro caiu consideravelmente na comparação entre o modelo ideal apresentado nos livros didáticos e o modelo proposto. Validando assim, o arranjo experimental, e o procedimento para medir a medida da indutância.

Com isso, a hipótese do trabalho de que um novo modelo que descreve o modelo ideal para estimar a indutância de um solenoide cilíndrico, que auxilie no estudo do aperfeiçoamento do modelo teórico e o uso de um sistema embarcado composto por placas de desenvolvimento arduino, para automatizar a execução do protocolo experimental, se confirmou eficaz, levando em consideração os testes medindo a indutância de indutores que os fabricantes já nos fornecia, para validar o protocolo experimental, além de também utilizar o sistema embarcado composto pelas placas de arduino, para auxiliar de forma automatizada a medição desta indutância, onde o resultado teve um erro muito baixo que pode

facilmente ser explicado por erros experimentais. Esses erros podem estar relacionados aos ruídos das *protoboards*, além do uso de *jumpers* que podem ser a fonte desses pequenos erros.

Sendo assim, é possível desenvolver com base em um novo modelo físico, adaptado do modelo ideal acerca da medição de solenoides cilíndricos, usando como aparato um sistema embarcado, composto por duas placas de desenvolvimento arduino, que permitiram medir a indutância de solenoides, levando em consideração, os componentes utilizados tais como resistores, capacitores e indutores, fio *jumpers* e a *protoboard*, que permitiram desenvolver o sistema embarcado, que será útil para medir a indutância de quaisquer indutores cilíndricos, assim como, os solenoides desenvolvidos pelos alunos do componente curricular de eletricidade e magnetismo.

Em pesquisas futuras, pode-se melhorar os circuitos auxiliares desenvolvendo-o em circuito impresso, que pode diminuir ruídos causados pelos componentes físicos e com isso, melhorar mais ainda os resultados, acerca deste modelo. Assim como, o desenvolvimento de uma interface mobile, para permitir mudar parâmetros de forma mais fácil, como também verificar de forma manual os valores coletados pelo sistema, além de previsão de erros sem que seja necessário a planilha eletrônica, entre outras possíveis melhorias não implementadas devido ao pouco tempo de pesquisa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CACPNRJ. Contador de Frequência usando Arduino - Cap Sistema. Disponível em: <<https://capsistema.com.br/index.php/2020/05/01/contador-de-frequencia-usando-arduino/>>. Acesso em: 3 fevereiro. 2023.

Conexão serial entre dois arduinos / TX RX - Curso de Arduino #63. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=L2oUQQU2CJs>>. Acesso em: 28 março. 2023.

FACHIN, O. Fundamentos de Metodologia. 5 a edição. São Paulo. Editora Saraiva, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009 vol 3.

LEAL, U. Medir capacitância usando Arduino. Disponível em: <<https://www.arduinoautomacao.com.br/blog/medir-capacitancia-usando-arduino>>. Acesso em: 3 fevereiro. 2023.

Lendo frequências e duty cycle com Arduino. Disponível em: <<https://luizbitencourt.wordpress.com/2015/05/04/lendo-frequencias-e-duty-cycle-com-arduino/#:~:text=Com%20o%20valor%20lido%20e>>. Acesso em: 3 fevereiro. 2023.

MAKIYAMA, M. O que é Arduino: para que serve, benefícios e projetos. Disponível em: <<https://victorvision.com.br/blog/o-que-e-arduino/>>. Acesso em 13 março. 2023.

NUNES, L. Comunicação serial Arduino via protocolo UART. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/blog/comunicacao-serial-arduino-via-protocolo-uart/#:~:text=Basta%20que%20conecte%20o%20pino>>. Acesso em: 15 fevereiro. 2023.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W.; YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. Física III: eletromagnetismo. 12. ed. São Paulo, SP: Pearson Addison Wesley, c2008-2009 vol 3.

SOUZA, F. Aprenda interpretar um diagrama esquemático. Disponível em: <<https://embarcados.com.br/interpretar-um-diagrama-esquemático/>>. Acesso em: 1 março. 2023.

SOUZA, F. O que são sistemas embarcados? Disponível em: <<https://embarcados.com.br/o-que-sao-sistemas-embarcados/>>. Acesso em: 2 março. 2023.

String.toFloat() | Documentação de Referência do Arduino. Disponível em: <<https://arduinogetstarted.com/pt/reference/arduino-string-tofloat#:~:text=Converte%20uma%20String%20v%C3%A1lida%20para%20float>>. Acesso em: 3 abril. 2023.