



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO NORTE DO TOCANTINS
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

RONILSON SOUSA SANTOS

**MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO ATRAVÉS DE UM DISPOSITIVO
ELETRÔNICO UTILIZANDO ARDUÍNO E EFEITO HALL**

**ARAGUAÍNA
2023**

RONILSON SOUSA SANTOS

**MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO ATRAVÉS DE UM DISPOSITIVO
ELETRÔNICO UTILIZANDO ARDUÍNO E EFEITO HALL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Universidade Federal do Norte do Tocantins
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do Grau de Licenciatura em Física.
Sob a orientação da Professora Dr. Pâmella
Barreto Gonçalves Troncão.

**ARAGUAÍNA
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S725m Sousa Santos, Ronilson.
MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO ATRAVÉS DE UM DISPOSITIVO
ELETRÔNICO UTILIZANDO ARDUÍNO E EFEITO HALL. / Ronilson Sousa
Santos. – Araguaína, TO, 2023.
46 f.
- Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Araguaína - Curso de Física, 2023.
Orientadora : Pâmella Barreto Gonçalves Tronção
1. Arduíno. 2. Ensino de Física. 3. Efeito Hall. 4. Campo Magnético. I.
Título

CDD 530

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.


**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

RONILSON SOUSA SANTOS


**MEDIDAS DE CAMPO MAGNÉTICO ATRAVÉS DE UM DISPOSITIVO
ELETRÔNICO UTILIZANDO ARDUÍNO E EFEITO HALL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Universidade Federal do Norte do Tocantins
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do Grau de Licenciatura em Física.


Aprovado em: 03 / 07 / 2023

Documento assinado digitalmente
 PAMELLA GONCALVES BARRETO TRONCAÇ
Data: 03/07/2023 16:15:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professora Dr. Pâmella Barreto Gonçalves Troncão
Orientadora

Documento assinado digitalmente
 REGINA LELIS DE SOUSA
Data: 03/07/2023 16:34:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dra. Regina Lélis de Sousa
Membro interno

Documento assinado digitalmente
 FABIO MATOS RODRIGUES
Data: 03/07/2023 16:35:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Fábio Matos Rodrigues
Membro interno

ARAGUAÍNA
2023

“Todos os nossos sonhos podem se tornar realidade se tivermos a coragem de perseguí-los”.

(Walt Disney)

AGRADECIMENTOS

Neste momento estou finalizando uma etapa da minha vida e espero que seja apenas mais uma de muitas outras que virão. Mas, nada disso seria possível sem o apoio e atenção que sempre recebi de toda minha família, onde pude contar em todos os momentos difíceis que foi enfrentado ao longo de minha trajetória.

Nada disso também não seria possível sem o apoio de meus colegas e amigos do curso de Física, mas especial o grupo do “Cafezinho do LEF (Laboratório de Ensino de Física)”, que ao longo de minha trajetória se mostraram companheiros. Eles estavam lá no momento em que precisava de distração e orientação, que são necessidades fundamentais no dia a dia universitário. Gostaria de dar destaque também ao meu amigo do curso de Química Luis Felipe Lima Guimarães, que esteve comigo em todos os momentos desde o início de minha graduação, me mostrando que poderia fazer grandes feitos.

Ao longo de todo o curso, tive o privilégio de ter professores incríveis que me ajudaram muito, em destaque fica a minha orientadora professora Pâmella Gonçalves Barreto Troncão por ter aceitado o convite para ser minha orientadora, e que me guiou durante os momentos difíceis e me auxiliou sempre que necessário e também destaque ao professor Samuel Gomes de Mercena, que me auxiliou e me orientou nas decisões que tive no passado e terei futuras.

Foi uma jornada longa de 4 anos, mas finalmente cheguei ao final. Mas isso também não seria possível sem o apoio de alguns amigos que estão comigo há muitos anos, dentre eles destaco: Higor Sousa Barros, Thiago Sousa Barros, Rhuan Gabriel Cruz, Wanderson Coimbra, Loslorrana Coimbra, Lucas Fernandes, Nathalia Thais e Emilly Barros.

Por fim, agradeço a todos aqueles que passaram por minha trajetória de maneira positiva ou negativa, porque tudo que passei serviu de aprendizado e não estaria aqui sem a contribuição de todos e da UFNT/Física pelo apoio acadêmico e ao LABMADE pelo apoio nas realizações das atividades experimentais.

O desenvolvimento desta pesquisa contou com auxílio financeiro da PROPESQ/UFNT, Edital nº011/2022.

RESUMO

O presente trabalho descreve o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico inovador, utilizando o Arduino e um sensor de Efeito Hall, com o objetivo de estudar campos magnéticos. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Pesquisa em Materiais para Aplicações em Dispositivos Eletrônicos (LABMADE) localizado no campus de Araguaína da Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT). Este trabalho, descreve a concepção e construção de um dispositivo eletrônico que faz uso de materiais de baixo custo como uma alternativa para o estudo de campos magnéticos, pois os equipamentos de laboratórios são caros. Após a aplicação do sistema de hardware e software desenvolvido na plataforma Arduino, foram coletados resultados que sugerem um bom aproveitamento do sensor e a validade de sua aplicação, mostrando ser uma alternativa para o uso em projetos de pesquisa e no ensino de Eletromagnetismo.

Palavras – chaves: Arduino; Ensino de Física; Efeito Hall.

ABSTRACT

This work describes the development of an innovative electronic device using Arduino and a Hall Effect sensor, aiming to study magnetic fields. The research was conducted at the Laboratory of Research in Materials for Electronic Device Applications (LABMADE) located on the Araguaína campus of the Federal University of Northern Tocantins (UFNT). This work presents the design and construction of an electronic device that utilizes low-cost materials as an alternative for studying magnetic fields, as laboratory equipment can be expensive. After implementing the hardware and software system developed on the Arduino platform, results were collected, suggesting a successful utilization of the sensor and validating its application as an alternative for research projects and the teaching of Electromagnetism.

Keywords: Arduino; Physics Education; Hall Effect.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 TRABALHOS CORRELATOS.....	10
1.3 OBJETIVOS.....	11
2. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO SOBRE ELETROMGNETISMO.....	12
2.1 CAMPO MAGNÉTICO.....	12
2.2 EFEITO HALL.....	22
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	25
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PESQUISA.....	25
3.2 TÉCNICA PARA ANÁLISE DOS DADOS.....	26
4. APARATO EXPERIMENTAL	31
4.1 ARDUÍNO.....	31
4.1.1 HARDWARE ARDUÍNO.....	31
4.1.2 SOFTWARE ARDUÍNO.....	32
4.1.3 IDEIA ARDUÍNO.....	33
4.2 MONTAGEM.....	34
4.3 CALIBRAÇÃO.....	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
7. APÊNDICES OU ANEXOS	

1. INTRODUÇÃO

Têm-se conhecimento da existência de campo magnético desde a Grécia Antiga, quando foi descoberta a magnetita. Com o passar dos anos, os estudos sobre campo magnético avançaram, possibilitando novas técnicas de observação e medição desta grandeza, pois esse tipo de medição é crucial para diversas áreas da Física e da Engenharia [1]. Devido à importância tecnológica, se tornou recorrente a busca por novas técnicas de medição do campo magnético.

Vários métodos são criados para medição de campos magnéticos e se destacam aquelas que são baseadas no princípio do Efeito Hall. Este fenômeno denominado Efeito Hall foi descrito por Edwin Hall em 1879. Um renomado físico americano observou que a deflexão de uma corrente elétrica quando aplicado sobre o material um campo magnético. A partir dessa descoberta, foram produzidos os primeiros dispositivos capazes de medir campos magnéticos utilizando o efeito Hall [1].

Com base no princípio do Efeito Hall, que descreve a deflexão de uma corrente elétrica quando um campo magnético é aplicado a um material, e com os avanços da tecnologia, foram desenvolvidos diversos dispositivos inovadores, cada versão mais compacta e precisa, tornando este tipo de material mais acessível ao público. No entanto, a utilização de um sensor de Efeito Hall por si só não é suficiente, pois requer a integração com um sistema eletrônico capaz de coletar e processar os dados provenientes dos controles realizados. Dentre as plataformas que são utilizadas para este tipo de sistema, destaca-se a plataforma Arduino como uma ferramenta acessível e multitarefas [2].

Em um mercado que busca sempre inovações a baixo custo, este trabalho foi criado com o objetivo de apresentar um sistema de medição de campo magnético, utilizando sensores de Efeito Hall e do software e do hardware Arduino, capaz de realizar medições satisfatórias e em tempo real, se destacando por fazer utilização de materiais de baixo custo. Este sistema foi projetado para ser um dispositivo de fácil utilização, para alcançar as pessoas que não possuem muito conhecimentos de programação e de Física, pois permite a visualização dos dados de forma gráfica e intuitiva.

Nos próximos capítulos, serão apresentados detalhes sobre a física envolvida no estudo da história e dos cálculos relacionados aos campos magnéticos. Em seguida, contém a metodologia utilizada na pesquisa, abordando a maneira como o aparato experimental foi construído e configurado. Por fim, serão apresentados os dados obtidos por meio da coleta dos resultados no laboratório.

1.1 JUSTIFICATIVA

A medição do campo magnético é um tema de grande interesse em diversas áreas da ciência e tecnologia, como Física, Engenharia elétrica, Eletrônica, Medicina e Biologia, entre outras. No entanto, muitas vezes os equipamentos disponíveis para medir o campo magnético são caros e de difícil acesso, tornando complicado o desenvolvimento de projetos que necessitam desta informação [3].

Nesse sentido, o uso do Arduíno e do sensor de efeito Hall como alternativa de baixo custo e fácil utilização para medição do campo magnético pode contribuir para a realização de experimentos em diversas áreas do conhecimento. Além disso, o desenvolvimento de habilidades em programação e eletrônica pode ser um diferencial importante para estudantes e pesquisadores que buscam se destacar em suas áreas de atuação [4].

Com o advento da globalização, o acesso a sensores e equipamentos corporativos necessários para a realização de projetos de medição de campo magnético tornou-se muito mais fácil e acessível em termos de custo. Através da conectividade global e do comércio eletrônico, é possível encontrar uma ampla variedade de sensores e equipamentos a preços competitivos em lojas online especializadas, independentemente da localização geográfica. Isso significa que pesquisadores, estudantes e profissionais têm a capacidade de adquirir facilmente os componentes necessários para seus projetos, aproveitando as vantagens da globalização e da produção em massa [5].

1.2 TRABALHOS CORRELATOS

Existem vários trabalhos que fazem utilização de sensores de Efeito Hall para detectar campos magnéticos, nesta perspectiva temos Pinto [6], o qual traz em seu trabalho a construção de um magnetômetro com dois sensores Hall de GaAs, que foram utilizados para medir a magnetização de várias amostras ferromagnéticas e um nanocompósito. O magnetômetro foi calibrado usando uma amostra padrão de Níquel e a coleta de dados foi realizada por meio de uma interface GPIB (*General Purpose Interface Bus* ou Barramento de interface de uso geral) e software Labview. Foram realizadas medidas de histerese em ligas ferromagnéticas e para o nanocompósito foram estudadas a magnetização de saturação, a remanência e o campo coercivo em função da temperatura. Também foi investigada a dependência do efeito exchange-bias com o campo magnético.

No trabalho de Neto [7], foi desenvolvido um sistema para medir a intensidade de campo magnético utilizando um sensor de efeito Hall e um motor que movimenta o sensor em

um trilho com precisão milimétrica. O hardware utilizado é a plataforma Arduino e um software em JAVA é utilizado para plotar um gráfico que relaciona a distância do sensor à fonte do campo magnético com a intensidade desse campo. O objetivo do software é facilitar a visualização dos conceitos físicos relacionados a campos magnéticos e sua distribuição espacial de intensidade [7]. Este trabalho utiliza o software Arduino em C++ para análise dos dados gerados pelo dispositivo eletrônico.

Por fim, temos o trabalho de Endalécio [8], que descreve o desenvolvimento de um sistema de levitação eletromagnética utilizando um sensor de efeito Hall como sensor de posição, em substituição a outros sensores mais caros. O trabalho inclui uma descrição das técnicas de levitação magnética, análise matemática da planta do sistema de levitação, projeto de um controlador para estabilizar o sistema, implementação digital e apresentação dos resultados experimentais [8].

Apesar de Endalécio também utilizar sensores de efeito Hall como uma alternativa mais acessível para os pesquisadores. Seu trabalho possui a finalidade de fazer um sistema de levitação com os sensores, diferente deste trabalho que busca fazer um sistema de medição de campos magnéticos, mais próximos dos trabalhos de Pinto e Neto [6, 7].

O presente trabalho, propõe uma criação de um sistema de software e hardwares capaz de detectar a presença de campo magnético em diferentes materiais, para isso foi utilizado bobinas de multicamadas e a bobina de Helmholtz, além de fazer utilização de amostra ferromagnética, onde busca criar tecnologia inovadora de baixo custo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um dispositivo eletrônico, por meio de um sistema de hardware e software, para a medição de campos magnéticos.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar de forma histórica o desenvolvimento do estudo sobre o eletromagnetismo e suas aplicações;
- Mostrar em que condições o Efeito Hall é apresentado num sistema eletrônico;
- Destacar as aplicabilidades do Arduino como plataforma para controle e processamento de dados em experimentos de Física;
- Desenvolver um dispositivo eletrônico de baixo custo e fácil utilização para medir o campo magnético em diferentes situações.

2. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO SOBRE ELETROMAGNETISMO

O campo magnético pode ser caracterizado como a região do espaço onde um objeto magnetizado ou uma carga elétrica em movimento sofre a ação de uma força magnética [1]. Nesta perspectiva, este trabalho objetiva encontrar a intensidade do campo magnético em diferentes situações, mas para conseguir medir o campo magnético, é necessário entender o princípio do Efeito Hall usados nos sensores. Então, neste capítulo será discutido as propriedades do campo magnético e do Efeito Hall.

2.1 CAMPO MAGNÉTICO

No decorrer do século XIX, os cientistas da época desenvolveram a definição de campo magnético por meio da observação de fenômenos magnéticos e da eletricidade. Os avanços nos estudos do campo magnético ganharam impulso a partir de 1820, quando o físico dinamarquês Hans Christian Oersted observou que a corrente elétrica em um fio era capaz de gerar campo magnético, isso só foi possível graças a uma bússola, que ao se aproximar do fio se desviava da sua posição original [9].

A partir da descoberta de Oersted, de que corrente elétrica poderia produzir campo magnético ao seu redor, os estudos das propriedades envolvendo a eletricidade e o magnetismo ganharam grande destaque na comunidade científica. Consequentemente, outros cientistas como André-Marie Ampère, Carl Friedrich Gauss e Jean-Baptiste Biot iniciaram diversos experimentos para observar o comportamento deste novo fenômeno, nestes estudos eles chegaram na conclusão que estes campos estavam interligados [10].

Estes cientistas estavam fascinados pelo fato de corrente elétrica conseguir produzir um campo magnético a sua volta e na maneira que o campo elétrico e magnético se comportavam de maneira perpendicular entre si. Então, foi a partir do resultado experimentais que Ampère e Gauss chegaram na teoria eletromagnética. Esta teoria trazia a descrição matemática da relação entre eletricidade e magnetismo [10].

Os estudos na área continuaram, foi então que em 1831, uma pesquisa trouxe dados mostrando que era possível gerar corrente elétrica a partir do uso de um campo magnético como mostra a Figura 1, onde tem-se um ímã que ao ser colocado em movimento e passa no centro de uma espira, que está conectada a um medidor de corrente. Ao movimentar o ímã, o medidor mostra que há um fluxo de corrente. Quem descobriu isso foi o Físico Michael Faraday, chamando este fenômeno de indução eletromagnética. Essa descoberta gerou contribuições para o desenvolvimento da teoria eletromagnética e foi muito importante para a geração e transmissão de energia elétrica [10].

O movimento do ímã produz uma corrente na espira.

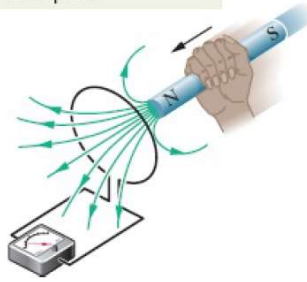


Figura 1: indução eletromagnética [1].

Entretanto, Oersted não foi o responsável por descobrir a existência do campo magnético, pois já havia relatos de fenômenos envolvendo o magnetismo desde a Grécia Antiga. Desta forma atribui-se esta descoberta ao filósofo e cientista grego Tales de Mileto, que no século VI a.C. começou os estudos sobre a magnetita, por ser um mineral que possui propriedades magnéticas intrínsecas. Ele percebeu que este mineral se orientava sempre no mesmo sentido depois de ser suspenso por um fio, foi então que teve a ideia de que o Planeta Terra poderia ter um campo magnético capaz de influenciar aquele material [11].

Na época não era possível ter certeza se a Terra de fato possuía um campo magnético, mas foi então que no final do século XVI o cientista inglês William Gilbert realizou uma série de experimentos com magnetos. Por meio disso ele conseguiu a primeira evidência de que a Terra tinha um campo magnético, mas não foi só isso, ele concluiu que a Terra era um grande ímã, com um polo norte magnético e um polo sul magnético. Ele também observou que a agulha magnética de uma bússola apontava sempre para o polo norte magnético da Terra [11].

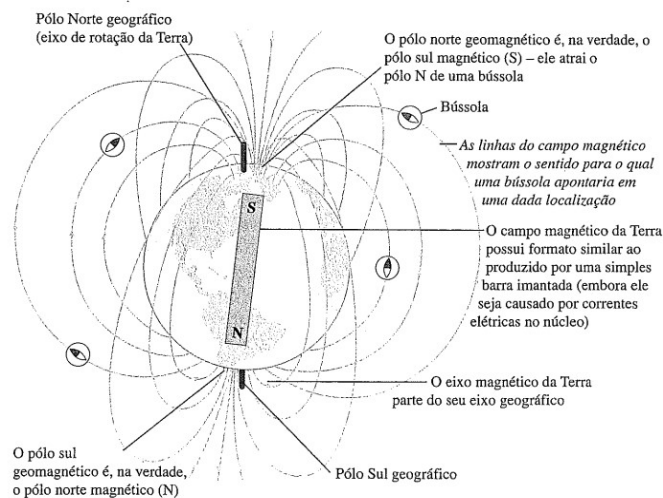


Figura 2: Campo magnético terrestre [12].

Porém, foi somente três séculos depois que o cientista Carl Friedrich Gauss criou um método matemático capaz de mapear o campo magnético da Terra. Para isso ele realizou dados de medições realizadas em locais distintos. Graças a Gauss foi possível produzir modelos mais precisos do campo magnético da Terra, sendo futuramente, por meio da contribuição de outros cientistas o desenvolvimento de novas tecnologias [13].

Devido a estas contribuições, sabemos da existência do núcleo terrestre e sua composição por materiais como ferro e níquel. Além disso, é por meio desse núcleo que o campo magnético terrestre é gerado, pois as correntes elétricas geradas pela convecção do material no núcleo externo geram um campo magnético que se estende para além da atmosfera da Terra e protege o planeta dos ventos solares e dos raios cósmicos [14]. Porém, o campo magnético terrestre sofre com constantes mudanças e devido a isso ainda há muitos cientistas voltados para esse estudo, pois ele é muito importante para a navegação, comunicação por satélite e proteção da vida contra a radiação cósmica [14].

Após a descoberta do campo magnético terrestre e os avanços científicos no estudo de suas propriedades ao longo do século XIX, o campo magnético foi reconhecido como uma grandeza física fundamental. Essas compreensões permitiram o desenvolvimento de inúmeros dispositivos eletrônicos e elétricos que se baseiam nas interações magnéticas, como motores elétricos, geradores e transformadores [15].

Destaca-se também a parte do cálculo do campo magnético, que é uma ferramenta de grande importância para compreender fenômenos físicos e projetar novas tecnologias. Para encontrar o valor do campo magnético, são utilizadas as leis fundamentais: a lei de Biot-Savart e a lei de Ampère. Por meio delas é possível relacionar matematicamente a corrente elétrica e a direção do campo magnético. O campo magnético é uma grandeza vetorial que possui intensidade, direção e sentido, tendo como unidade de medida o Tesla (T) [15].

A lei de Ampère relaciona a circulação do campo magnético em torno de uma linha fechada com uma corrente elétrica que passa por essa linha. Ela é uma das quatro leis de Maxwell que governam o comportamento dos campos elétricos e magnéticos em relação às cargas elétricas e correntes [16].

A lei de Ampère afirma que a circulação de um campo magnético \vec{B} ao longo de uma linha fechada C é diretamente proporcional à corrente elétrica total que atravessa a superfície limitada por C. Matematicamente, a lei de Ampère pode ser expressa como:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{in} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (2.1)$$

Onde,

\vec{B} é o campo magnético;

μ_0 é a permeabilidade magnética do ar;

i é a corrente total;

\vec{dl} é o vetor infinitesimal do comprimento.

Para demonstrar aplicações da lei de Ampère, os exemplos usados são: fio percorrido por corrente, solenoide e tóide. Então, agora será considerado uma corrente elétrica que está fluindo através de um fio longo, reto e uniforme, então o campo magnético ao longo de uma linha circular ao redor do fio pode ser calculado usando a Lei de Ampère [16].

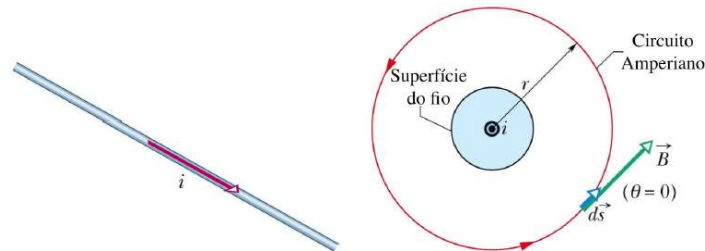


Figura 3: Campo fora e dentro de um fio, gerado por sua corrente [1].

Ao observar a Figura 3, pode-se constatar que o fio está sendo percorrido por uma corrente uniformemente distribuída em seu interior e possui raio (r), a partir disto será encontrado o valor da intensidade do campo (B) dentro e fora do fio. Utilizando a lei de Ampère para calcular o campo no exterior do fio, obtêm-se a seguinte expressão:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B (2\pi r) = \mu_0 i$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (2.2)$$

Agora, será utilizada novamente a Figura 3 para encontrar o campo no interior do fio, sendo adicionada a corrente i' interna a r :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B (2\pi r) = \mu_0 i' = \mu_0 i \frac{r^2}{R^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \frac{r}{R^2} \quad (2.3)$$

Em seguida, será considerado um solenoide para o qual será encontrado o campo em seu interior. Um solenoide é uma soma de espiras empilhadas [1]. Neste exemplo será calculado

o campo apenas no seu interior, devido ao fato dos campos se cancelarem no seu exterior, então, nesta região o campo é aproximadamente zero [1].

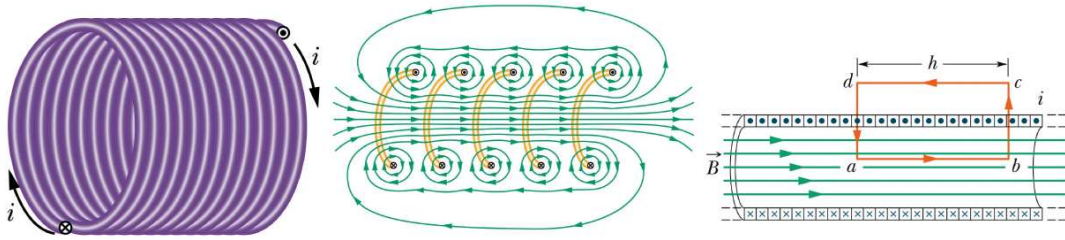


Figura 4: Campo em um solenoide [1].

Considere o circuito mostrado na Figura 4, que contém N espiras com suas correntes atravessando o circuito. Usando a Lei de Ampere expressa pela equação 2.1, tem-se que

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{in}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.4)$$

Entretanto, da segunda até a quarta integral possuem valor igual a zero, pois tem-se $\vec{B} \perp d\vec{l}$, desta forma, apenas a primeira integral não possui valor nulo sendo igual a Bh . Ademais, é possível definir $n = \frac{N}{h}$: número de espiras por unidade de comprimento, tem-se então

$$i_{in} = Ni = nhi \quad (2.5)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{in} \rightarrow Bh = \mu_0 nhi$$

$$B = \mu_0 ni \quad (\text{Solenoide ideal}) \quad (2.6)$$

O último exemplo para demonstrar a Lei de Ampère, será o toróide. Considere então um toróide com raio r , para o qual deseja-se calcular o campo \vec{B} em seu interior como mostra a Figura 5. O toroide é basicamente um solenoide curvado e com as extremidades identificadas.

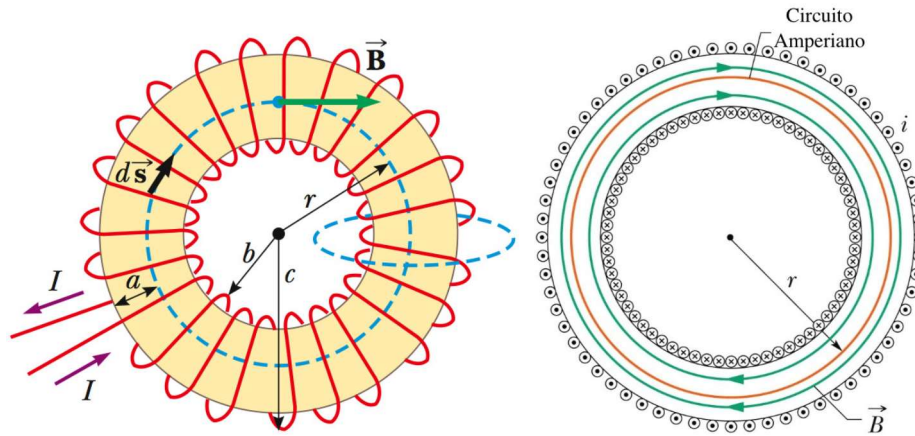


Figura 5: Campo em um toróide [1].

Utilizando a Lei de Ampère, tem-se

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i_{in} \rightarrow B(2\pi r) = \mu_0 Ni$$

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2\pi r} \quad (\text{Toróide}) \quad (2.7)$$

A Lei de Ampère é uma ferramenta para calcular o campo magnético gerado por correntes elétricas em uma variedade de geometrias diferentes. Ela é amplamente utilizada na análise de circuitos elétricos, dispositivos magnéticos e eletromagnéticos, e em aplicações relacionadas à Física de partículas.

Outra lei usada para calcular o campo magnético é a Lei de Biot-Savart, que descreve o campo magnético gerado por uma corrente elétrica estacionária em um ponto específico no espaço. Essa lei estabelece que o campo magnético resultante em um ponto é diretamente proporcional à corrente elétrica, ao vetor posição do ponto em relação ao fio condutor e ao seno do ângulo entre o vetor posição e o vetor da corrente. Foi descoberta independentemente por dois físicos franceses, Jean-Baptiste Biot e Félix Savart, em 1820. A Lei de Biot-Savart é muito útil para calcular o campo magnético gerado por correntes elétricas em diferentes configurações, incluindo espiras circulares [1].

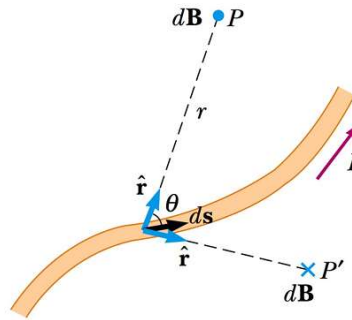


Figura 6: Lei de Biot - Savart para o campo magnético. [17].

Analisando a Figura 6, chegamos na lei de Biot – Savart que nos diz o seguinte:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \quad (2.8)$$

Onde,

$d\vec{B}$ é o vetor campo magnético diferencial produzido no ponto p;

μ_0 é a permeabilidade magnética do ar;

i é a corrente que circula pela espira;

r é a distância entre o ponto P e a extremidade da espira;

$d\vec{l}$ é o vetor infinitesimal do comprimento.

A lei de Biot – Savart pode sofrer alterações na integração, dependendo do material que esteja sendo utilizado para calcular o campo magnético [18]. Será mostrado a seguir o cálculo do campo para um fio reto, um fio curvado e uma espira circular.

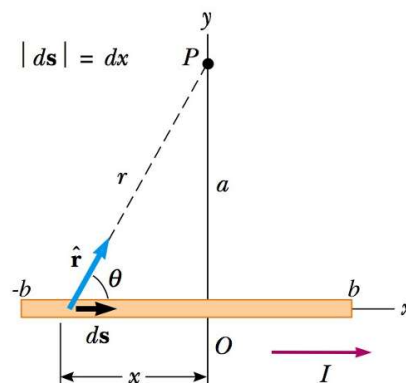


Figura 7: Campo magnético gerado por um fio reto [17].

Para encontrar o campo magnético em um fio reto percorrido por corrente, como ilustra a Figura 7, a contribuição devido a um elemento $d\vec{s}$ do fio é $dx \sin\theta$. Todos os elementos $d\vec{B}$ do fio apontam para fora da página, na direção \hat{z} . Para a magnitude precisa-se calcular:

$$d\vec{s} \times \hat{r} = (dx \sin\theta) \hat{z} \quad (2.9)$$

Agora aplicando a equação 2.9 na equação 2.8, temos

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dx \sin\theta}{r^2} \quad (2.10)$$

utilizando a notação para $r^2 = x^2 + a^2$ e $\sin\theta = a/\sqrt{x^2 + a^2}$, obtêm-se

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{a dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (2.11)$$

Para encontrar o valor do campo magnético basta integrar ambos os lados,

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{-b}^b \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (2.12)$$

Resolvendo a integração obtêm-se o seguinte:

$$\int \frac{dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{y}{x\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (2.13)$$

Então, aplicando a expressão de 2.13 na equação 2.12, temos

$$B = \frac{\mu_0 i a}{4\pi} \left[\frac{x}{a^2 \sqrt{x^2 + a^2}} \right]_{-b}^b \quad (2.14)$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi a} \frac{2b}{\sqrt{b^2 + a^2}} \quad (2.15)$$

Para um fio infinito, onde $b \rightarrow \infty$, tem-se que

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} \quad (2.16)$$

Agora, será considerado um fio curvado como mostra a Figura 8. No caso de um fio curvo pode-se considerar que ele é composto por vários elementos de comprimento infinitesimais, cada um gerando um campo magnético proporcional à corrente elétrica que passa por ele. Para calcular o campo magnético total gerado pelo fio curvo, utiliza-se a lei de Biot-Savart para somar os campos magnéticos gerados por cada elemento do fio.

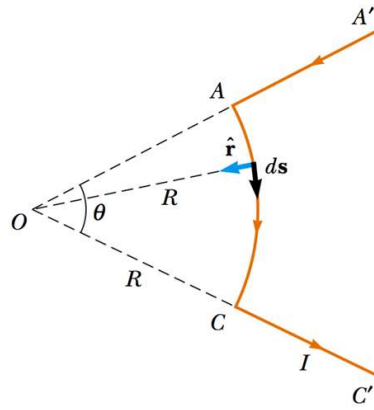


Figura 8: Campo magnético em um fio curvado [17].

A contribuição do campo no ponto O devido ao elemento (ds) do fio é mostrada da Figura 8. Os elementos AA' e CC' não contribuem, pois neles $d\vec{s} \parallel \hat{r}$. Em todos os pontos de AC , temos que $d\vec{s} \perp \hat{r}$, portanto $|d\vec{s} \times \hat{r}| = |d\vec{s}|$. A direção do campo magnético O é entrando na página. Pela lei de Biot – Savart, tem-se:

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{ds}{R^2} \quad (2.17)$$

Para encontrar o valor do campo magnético é necessário integrar a equação 2.17,

$$\begin{aligned} \int dB &= \frac{\mu_0 i}{4\pi R^2} \int ds \\ B &= \frac{\mu_0 i}{4\pi R^2} (\theta R) \\ B &= \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \theta \end{aligned} \quad (2.18)$$

Quando considera-se que o material trabalhado é uma espira completa temos que $\theta = 2\pi$, então tem-se que o valor do campo magnético será

$$B = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (2.19)$$

Por fim, tem-se a espira completa nela também será aplicado a Lei de Biot-Savart para calcular o campo magnético gerado por uma espira circular. Para isso, é necessário integrar a contribuição de cada elemento infinitesimal de corrente que compõe a espira, levando em conta a distância entre o elemento e o ponto em que se quer calcular o campo. Para tanto, considere uma espira circular percorrida por corrente como mostra a Figura 9. Ao observarmos a Figura 9 pode-se analisar que a contribuição do campo magnético no ponto P que está localizado no eixo x da espira, deve-se ao elemento $d\vec{s}$ do fio.

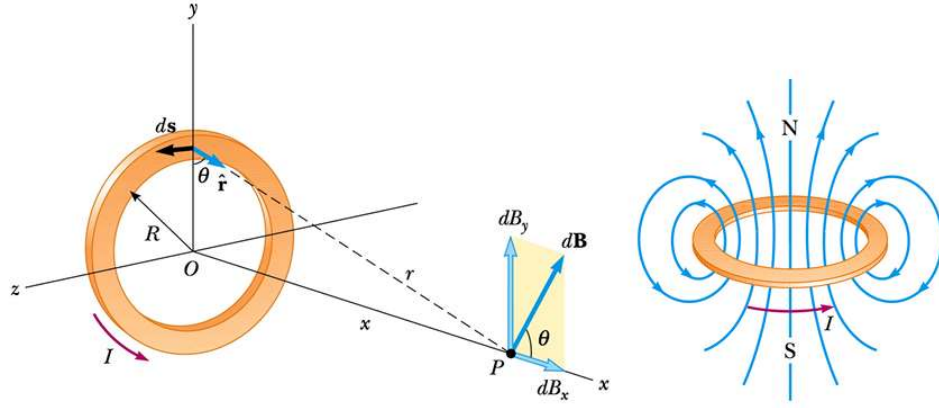


Figura 9: Campo magnético para uma espira circular [17].

Ao observar a Figura 9 acima nota-se que $d\vec{s} \perp \hat{r}$, portanto, $|d\vec{s} \times \hat{r}| = ds$, com isso tem-se que,

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{ds}{x^2 + R^2} \quad (2.20)$$

As componentes destacadas na Figura 9 de $d\vec{B}$: dB_x ao longo do eixo e $dB_y = dB_{\perp}$ na direção perpendicular. A partir desta simetria, tem-se que $dB_{\perp} = 0$, então será calculado o valor de dB_x , integrando $dB_x = dB \cos \theta$, onde $\cos \theta = R/\sqrt{x^2 + R^2}$, utilizando os dados da equação 2.14, tem-se que

$$\begin{aligned} B_x &= \oint dB \cos \theta \\ B_x &= \oint \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{ds}{x^2 + R^2} \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} \\ B_x &= \frac{\mu_0 i R}{4\pi(x^2 + R^2)^{3/2}} \oint ds \\ B_x &= \frac{\mu_0 i R}{4\pi(x^2 + R^2)^{3/2}} (2\pi R) \\ B_x &= \frac{\mu_0 i R^2}{2(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (2.21) \end{aligned}$$

Quando $x = 0$, o resultado se torna igual a equação 2.19,

$$B_x = B = \frac{\mu_0 i}{2R} \quad (2.22)$$

Porém, se considerar o valor de $x \gg R$, tem-se então uma nova adequação para a equação 2.22.

$$B \approx \frac{\mu_0 i R^2}{2x^3} \quad (2.23)$$

2.2 EFEITO HALL

O efeito Hall pode ser definido como uma diferença de potencial produzido em um condutor elétrico ou semicondutor, normal a uma corrente elétrica e a um campo magnético aplicado perpendicular à essa corrente. O efeito foi descoberto pelo físico americano Edwin Hall em 1879 enquanto investigava as propriedades elétricas dos metais [18].

O efeito Hall ocorre quando um campo magnético é aplicado perpendicularmente ao fluxo de uma corrente elétrica em um condutor como mostra a Figura 10. As partículas carregadas no condutor experimentam uma força que é perpendicular tanto à direção da corrente quanto à direção do campo magnético. Essa força resulta em um acúmulo de carga em um lado do condutor e uma depleção de carga no outro lado, criando uma diferença de tensão no condutor que é perpendicular à corrente e ao campo magnético [19].

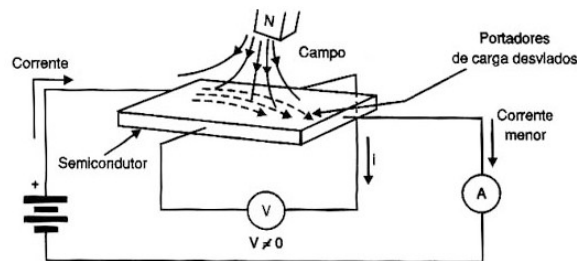


Figura 10: Ilustração explicativa do Efeito Hall [2].

A diferença de tensão, conhecida como tensão Hall, é proporcional à força do campo magnético e à corrente que flui através do condutor. O efeito Hall pode ser usado para medir a força e a direção dos campos magnéticos, tornando-se uma ferramenta valiosa em muitos campos, incluindo Engenharia, Física e Ciência dos materiais [19].

Além de suas aplicações práticas, o efeito Hall desempenhou um papel significativo no desenvolvimento de nossa compreensão da Física do Estado Sólido. Ao analisar o efeito Hall em diferentes materiais, os pesquisadores podem determinar o tipo de portadores de carga (elétrons ou buracos) e suas propriedades, como densidade e mobilidade. Esta informação é essencial para projetar e otimizar dispositivos eletrônicos e estudar as propriedades dos materiais [20].

O efeito Hall também é usado para estudar o comportamento de portadores de carga em semicondutores, revelou muitos fenômenos interessantes, incluindo o efeito Hall quântico e o efeito Hall anômalo. O efeito Hall quântico, descoberto na década de 1980, é uma manifestação notável do efeito Hall que ocorre em sistemas de elétrons bidimensionais em um forte campo magnético. O efeito Hall anômalo, por outro lado, é um fenômeno que ocorre em determinados

materiais onde a tensão Hall é gerada mesmo na ausência de um campo magnético externo, devido a um momento magnético intrínseco no material [20].

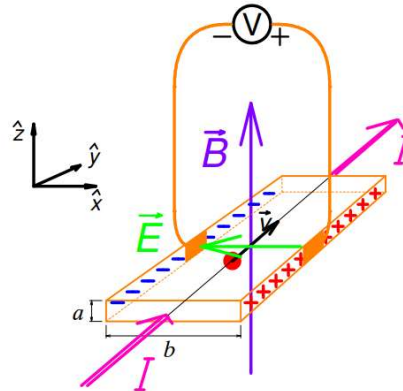


Figura 11: Medida da voltagem Hall [21].

Neste parágrafo, discutiremos como as características do filme condutor influenciam a voltagem medida, conhecida como voltagem Hall que pode ser observada na Figura 11. Suponhamos que tenhamos um campo elétrico na amostra, representado por $\vec{E} = E_x \hat{x}$ na situação de equilíbrio dinâmico. A voltagem medida pelo volômetro pode ser relacionada com a componente x do campo elétrico usando a lei das malhas. Ao aplicarmos a lei das malhas, percorremos inicialmente o volômetro, indo do sinal "+" até o sinal "-", descendo pelo fio do volômetro até a borda esquerda da amostra, atravessando a amostra na direção \hat{x} , por fim, retornando ao volômetro pelo fio. Então usando a relação de $\int \vec{E} \cdot d\vec{l}$ que conta com contribuição do volômetro. Os fios contribuem com zero e o trajeto na amostra contribui com bE_x supondo um campo uniforme. Então vale

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{l} = V_{Hall} + bE_x = 0 \quad (2.24)$$

Suponhamos que exista apenas uma espécie de portador de carga no material do filme condutor. Seja "q" a carga dessa espécie e " \vec{v}_d " sua velocidade de deriva. Na condição de equilíbrio, a força magnética é exatamente cancelada pela força elétrica transversal. Portanto, podemos afirmar que

$$qE_x \hat{x} + q\vec{v}_d \times B\hat{z} = 0 \quad (2.25)$$

Com a densidade numérica ($\rho_{\#}$) dos portadores, podemos relacionar a velocidade de deriva com a densidade de corrente. Tem-se

$$\vec{j} = \rho_{\#} q \vec{v}_d \quad (2.26)$$

e por outro lado

$$\vec{j} = \frac{I}{ab} \hat{y} \quad (2.27)$$

Então obtém-se

$$\vec{v}_d = \frac{I}{ab\rho_{\#}q} \hat{y} \quad (2.28)$$

Inserindo a equação (2.28) na (2.25), podemos calcular E_x

$$E_x = -\frac{I B}{ab\rho_{\#}q} \quad (2.29)$$

Substituindo o resultado da equação (2.29) na equação (2.4), têm-se

$$V_{Hall} = \frac{I B}{a \rho_{\#} q} \quad (2.30)$$

Com este resultado é possível afirmar que o efeito Hall permite determinar o sinal dos portadores de carga. No geral, o efeito Hall é um fenômeno fascinante com uma ampla gama de aplicações práticas e teóricas, tornando-o um conceito essencial na Física e na Engenharia modernas. O efeito Hall é amplamente utilizado em dispositivos de medição e controle de campos magnéticos, conhecidos como sensores de efeito Hall. Esses sensores são utilizados em diversas aplicações, como em sistemas de navegação, detecção de objetos, sistemas de controle de motores elétricos, sistemas de segurança, entre outros [2].

A aplicação mais comum do sensor de efeito Hall é na medição da intensidade do campo magnético. Esse sensor pode ser usado para medir a presença de um ímã em um determinado local, para medir a variação do campo magnético ao longo do tempo ou para medir o campo magnético em um determinado ponto [2].

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PESQUISA

Esta pesquisa, de natureza qualitativa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Materiais para Aplicações em Dispositivos Eletrônicos (LABMADE) que se encontra no Centro de Ciências Integradas (CCI) da Universidade Federal do Norte do Tocantins (UFNT).

Na primeira etapa, os estudos foram voltados para entender a linguagem de programação, desenvolvimento de sistemas e funcionamento da placa de Arduino e no software Arduino. O objetivo era desenvolver um programa capaz de controlar o aparato experimental, para que os valores medidos pudessem ser analisados e comparados com a literatura. A utilização do Arduino está condicionada ao fato de ser uma plataforma *open-source* de desenvolvimento criada com o objetivo de ser fácil de programar e usar, destinada a pessoas que desejam criar objetos ou ambientes interativos, como artistas, designers e estudantes [22].

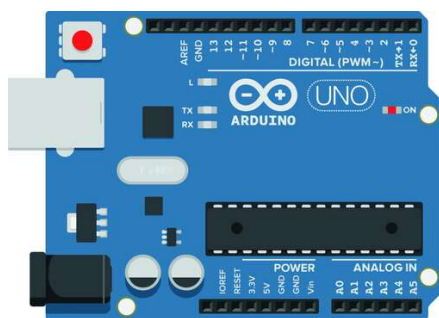


Figura 12: Placa de Arduino uno [23].

Deste modo foi construído um dispositivo eletrônico (os materiais necessários a montagem e o modelo de montagem serão discutidos no próximo capítulo), que pode ser facilmente conectado a um computador e foi programado via IDE (*Integrated Development Environment*, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) utilizando a linguagem C++ [23]. Para realizar a coleta de dados, foi necessário a montagem do dispositivo eletrônico junto ao aparato experimental, nele o sensor de efeito Hall (este sensor utiliza o princípio do efeito Hall para detectar tensões referente ao campo magnético) é o responsável por reconhecer a existência do campo magnético e transferir para ao computador, o valor da tensão referente ao campo magnético detectado, por meio da plataforma Arduino. Nesta plataforma é possível verificar os valores da tensão de forma gráfica e numérica, esses valores estão inicialmente em Bits e é necessário realizar a conversão para Volts unidade do Sistema Internacional (S.I.).

Para converter um valor em bits para um valor de tensão usando um sensor de efeito Hall, é necessário levar em consideração a resolução do conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador ou plataforma utilizada, bem como a faixa de tensão de operação do sensor.

A resolução do ADC determina o número de bits que podem ser usados para representar a tensão medida. Por exemplo, se o ADC tiver uma resolução de 10 bits, ele poderá representar valores de tensão em 1024 níveis diferentes ($2^{10} = 1024$) [24].

Para converter o valor em bits para uma tensão correspondente, é necessário conhecer a faixa de tensão de operação do sensor de efeito Hall. Por exemplo, se o sensor opera em uma faixa de tensão de 0 a 5 volts, cada nível de bits do ADC representará uma fração dessa faixa de tensão [24]. Para realizar a conversão, podemos utilizar a seguinte equação:

$$\text{Tensão} = (\text{Valor em bits} / \text{Resolução do ADC}) * \text{Faixa de tensão do sensor}$$

Em seguida, foram realizadas medidas de campos magnéticos através do sensor de efeito Hall no LABMADE, esses dados fazem parte do processo de calibração do sensor e verificação da validade dos dados obtidos. Os testes foram feitos com a bobina de Helmholtz e com as bobinas de multicamadas, todas essas medidas foram feitas a partir de tensões geradas pelos sensores, que são proporcionais ao campo magnético, a descrição das bobinas citadas será detalhada no próximo capítulo.

A última etapa do trabalho, teve como objetivo a medida dos diferentes tipos de materiais: ferromagnéticos e diamagnéticos. Sendo realizada também novos testes de calibração do aparato experimental para obter a melhor precisão possível. Por fim, realizou-se a coleta dos dados e foi verificado que os resultados estão de acordo com a literatura.

3.2 TÉCNICA PARA ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos são comparados com a literatura e analisados de forma algébrica e gráfica. O campo magnético gerado por uma bobina não possui simetria, ou seja, deve-se verificar o valor do campo utilizando a Lei de Biot - Savart. Então, para encontrar o valor do campo magnético gerado pela bobina é necessário realizar uma integral. A Figura 12 representa a análise vetorial utilizada para encontrar o campo.

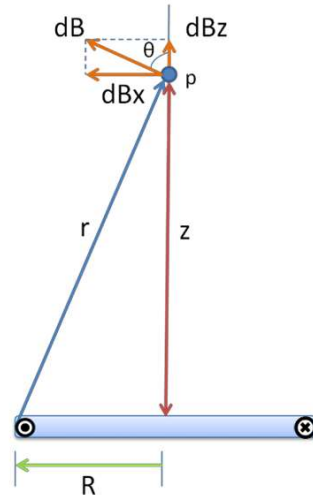


Figura 13: Análise vetorial [6].

Pode-se observar que z é a distância do ponto P ao centro da bobina. Note que essa configuração é válida somente para pontos no eixo central da bobina. Ao observar a Figura 13, nota-se que o campo magnético está na direção z , então temos que:

$$d\vec{B}(z) = dB_x + dB_z \quad (3.1)$$

Ao analisar a simetria, observa-se que há um ponto equivalente e diametralmente oposto, então tem-se que a soma vetorial de dB_x irá se anular. Consequentemente a equação 3.1 se torna:

$$\int dB(z) = \int dB_z = \int dB \cos \theta \quad (3.2)$$

Os resultados da análise vetorial são descritos na equação 3.3,

$$dB = \int \frac{\mu_r i}{4\pi r^2} \cos \theta dl \quad (3.3)$$

Na equação 3.4 e 3.5, é descrito o raio r e o $\cos \theta$, respectivamente:

$$r^2 = R^2 + z^2 \quad (3.4)$$

$$\cos \theta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}} \quad (3.5)$$

Agora, será substituído as equações 3.4 e 3.5 na equação 3.3 e têm-se que:

$$B(z) = \int dB_x = \frac{\mu_r i}{4\pi r} \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}} \int dl \quad (3.6)$$

$$B(z) = \int dB_x = \frac{\mu_r i R}{4\pi(R^2 + z^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} dl \quad (3.7)$$

$$B(z) = \int dB_x = \frac{\mu_r i R}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (3.8)$$

Para N espiras, têm-se a equação 3.9.

$$B(z) = \frac{N\mu_0 i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (3.9)$$

Como o ponto de medida do campo magnético é a metade do raio devido a configuração de Helmholtz, tem-se que $z = \frac{R}{2}$. Portanto:

$$B(z) = \frac{\mu_r i R}{2 \left(R^2 + \left(\frac{R}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \quad (3.10)$$

Então, para N espiras, considerando o valor de $\mu_r = \mu_0$, tem-se que:

$$B(z) = \frac{N\mu_0 i}{2R \left(\frac{5}{4} \right)^{3/2}} \quad (3.11)$$

Entretanto, no aparato experimental utilizado têm-se a utilização de duas bobinas de multicamadas e portanto, haverá uma soma da contribuição delas, a equação 3.12 pode ser escrita como:

$$B(z) = \frac{N\mu_0 i}{2R \left(\frac{5}{4} \right)^{3/2}} + \frac{N\mu_0 i}{2R \left(\frac{5}{4} \right)^{3/2}} \quad (3.12)$$

Resolvendo esta soma, finalmente chega-se no resultado, expresso pela equação 3.13.

$$B(z) = \frac{N\mu_0 i}{R \left(\frac{5}{4} \right)^{3/2}} \quad (3.13)$$

Onde μ_0 é o valor da permeabilidade no vácuo, o qual corresponde a $4\pi 10^{-7} Tm/A$, $N = 1200$ voltas para a bobinas de multicamadas e 130 voltas para bobina de Helmonstz e a constante $(5/4)^{3/2}$ é oriundo da simplificação da equação do campo magnético [25]. Essa configuração nos mostra que o campo magnético gerado pela bobina é proporcional ao número de espiras N, à corrente elétrica I que flui através das espiras é inversamente proporcional ao raio R da bobina. Além disso, o campo magnético depende da distância do ponto P ao centro da bobina

Contudo, para realizar os gráficos da análise dos resultados foi utilizado a plataforma *Spyder* (Anaconda 3), podendo ser utilizada para diferentes projetos. Usou-se ela para projetar gráficos e fazer cálculos por meio da criação de códigos computacionais na linguagem Python. Em seguida é anexado os dados obtidos e conferidos os resultados como mostra a Figura 14.

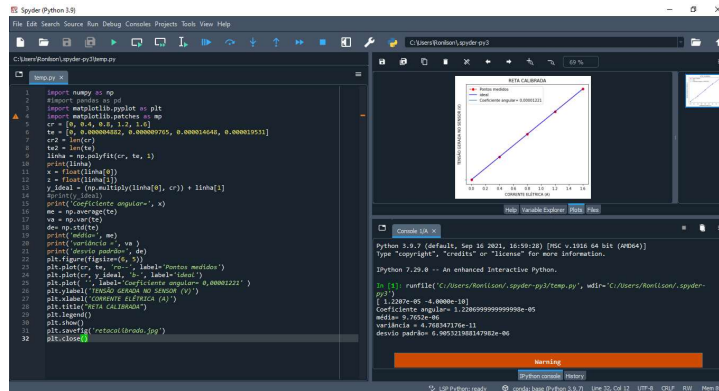


Figura 14: Plataforma Spyder (Python 3.9)

Fonte: Dados da pesquisa.

É possível observar o programa da Figura 13, abaixo

```

import numpy as np
#import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as mp

cr = [0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6]
te = [0, 0.000004882, 0.000009765, 0.000014648, 0.000019531]
cr2 = len(cr)
te2 = len(te)
linha = np.polyfit(cr, te, 1)
print(linha)
x = float(linha[0])
z = float(linha[1])
y_ideal = (np.multiply(linha[0], cr)) + linha[1]
#print(y_ideal)
print('Coeficiente angular=', x)
me = np.average(te)
va = np.var(te)
de = np.std(te)
print('média=', me)
print('variância =', va)
print('desvio padrão=', de)
plt.figure(figsize=(6, 5))
plt.plot(cr, te, 'ro--', label='Pontos medidos')
plt.plot(cr, y_ideal, 'b-', label='ideal')
plt.plot("", label='Coeficiente angular= 1')
plt.ylabel("TENSÃO GERADA NO SENSOR (V)")
plt.xlabel("CORRENTE ELÉTRICA (A)")

```

```
plt.title("RETA CALIBRADA")  
plt.legend()  
plt.show()  
plt.savefig('retacalibrada.jpg')  
plt.close()
```

No *Spyder*, os gráficos contêm os pontos medidos e como seria os pontos ideais daquela amostra. Com criação de outros códigos, pode-se resolver equações de forma mais fácil e simples. Dentro das necessidades os códigos foram voltados para resolver equações como a da variância, do desvio padrão e da média [26].

4. APARATO EXPERIMENTAL

4.1 ARDUÍNO

Quando se fala de Arduino, pode-se está se referindo ao hardware Arduino, ao software Arduino ou apenas da ideia Arduino. Devido a esta grande variação de utilidades torna, este produto tão popular e de grande sucesso entre pesquisadores [22]. Então para compreender a definição de Arduino é necessário englobar estes três aspectos.

4.1.1 HARDWARE ARDUÍNO

O hardware Arduino é um microcontrolador baseado em um Microchip ATmega328P. O microcontrolador é o "cérebro" do Arduino e é responsável por controlar as entradas e saídas da placa. A placa do Arduino é projetada para ser compacta e fácil de usar, com uma interface amigável que permite que os usuários se conectem facilmente a outros componentes eletrônicos. As placas Arduino são compostas por uma série de pinos que permitem que os usuários se conectem a outros componentes eletrônicos, como sensores, displays, motores, entre outros [27].



Figura 15: Componentes presentes em uma placa de Arduino [23].

O Arduino Uno, que foi o modelo utilizado e pode ser observado na Figura 15, possui 14 pinos digitais que podem ser configurados como entradas ou saídas e seis pinos analógicos que podem ser usados para medir a tensão. As portas analógicas possuem conversores analógico-digitais (ADC) que variam de 0 a 1023, onde 0 representa 0 volts e 1023 representa 5 volts, enquanto que as portas digitais apresentam valores bem definidos de 0 a 5 volts, sendo que 0 indica ausência de sinal e 5 volts representa que o dispositivo está detectando sinal [27]. Além disso, a placa possui um conector USB que permite que o usuário se conecte a um computador para programação e comunicação de dados.

Um sinal analógico é uma representação contínua de uma grandeza física, como uma tensão ou corrente, que pode assumir qualquer valor dentro de uma faixa específica. Ele é caracterizado por uma variação suave ao longo do tempo. No Arduino, os sinais analógicos são

tipicamente lidos usando um conversor analógico-digital (ADC), que converte a tensão analógica em um valor digital correspondente. O ADC mapeia a amplitude do sinal analógico em uma escala de valores digitais discretos, geralmente de 0 a 1023 para um Arduino UNO (resolução de 10 bits) [28].

Por outro lado, um sinal digital é uma representação discreta de uma grandeza física, onde a informação é expressa como um conjunto de estados distintos, geralmente representados por dois valores: 0 e 1 (ou LOW e HIGH). Esses valores digitais são manipulados pelo microcontrolador como bits, que podem ser processados de forma lógica. No Arduino, os sinais digitais são lidos ou escritos diretamente por meio das portas digitais do microcontrolador, que podem ser configuradas como entradas ou saídas digitais. A principal diferença prática entre os sinais analógicos e digitais no Arduino está na quantidade de informações que eles podem representar um exemplo é a Figura 16 [28].

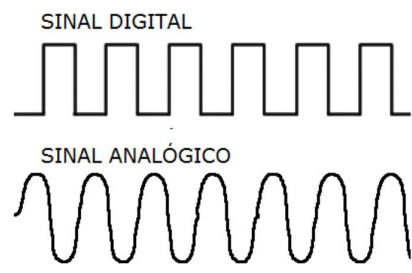


Figura 16: Diferença entre o sinal analógico e digital [28].

A placa Arduino é projetada para ser compatível com uma ampla gama de componentes eletrônicos, o que a torna uma plataforma de prototipagem muito flexível e adaptável. É possível usar sensores para medir temperatura, umidade, luz, som e movimento, por exemplo e conectando a motores, displays, alto-falantes e outros dispositivos para criar projetos interativos e personalizados [28].

No geral, o hardware Arduino é projetado para ser fácil de usar, versátil e adaptável, permitindo que os usuários criem uma ampla gama de projetos eletrônicos, desde simples LEDs piscantes até projetos mais complexos de automação e robótica [23].

4.1.2 SOFTWARE ARDUINO

O software Arduino é uma parte importante da plataforma Arduino, pois permite aos usuários programar a placa e controlar seus componentes eletrônicos. O principal software usado para programar a placa Arduino é o Arduino IDE, que é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que pode ser baixado gratuitamente da internet. O Arduino IDE é compatível com várias plataformas, incluindo Windows, Mac e Linux [28].

O Arduino IDE é projetado para ser fácil de usar, mesmo para usuários iniciantes. Ele vem com uma interface gráfica de usuário (GUI) intuitiva que facilita a criação e o upload de programas para a placa Arduino. O IDE suporta a linguagem de programação Arduino, que é baseada em C++ e é fácil de aprender [28].

```
int pinoAnalogico = A0; //PINO ANALÓGICO (MEDE A INTENSIDADE DO CAMPO MAGNÉTICO)
int pinoDiigital = 8; //PINO DIGITAL (DETECTA A PRESENÇA DO CAMPO MAGNÉTICO)
void setup ()
{ pinMode(pinoAnalogico, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA
  pinMode(pinoDiigital, INPUT); //DEFINE O PINO COMO ENTRADA
  Serial.begin(9600); } //INICIALIZA A SERIAL
void loop ()
{ Serial.println(analogRead((pinoAnalogico))-553);
  Serial.println(analogRead(pinoAnalogico) *((5.0 / 1024.0));
  //IMPRIME NO MONITOR SERIAL UM VALOR DE TENSÃO QUE REPRESENTA A INTENSIDADE DO
  CAMPO MAGNÉTICO
  delay(100); //INTERVALO DE 500 MILISSEGUNDOS }
```

Figura 17: IDE Arduino.

Fonte: Dados da pesquisa.

O Arduino IDE apresenta várias ferramentas de ajuda, para que os seus usuários possam identificar e corrigir erros em seus programas. A plataforma também oferece uma diversidade de opções de suporte a bibliotecas de software, elas podem ser usadas para adicionar funcionalidades extras à placa Arduino. Porém o Arduino IDE não é a única opção no mercado, pois existem outros softwares disponíveis que podem ser usados para programar a placa Arduino, incluindo o PlatformIO, o CodeBlocks e o Eclipse [27].

Muitas pessoas partilham da ideia de que programação é a parte mais difícil do projeto [23]. Entretanto, a programação deve ser tratada como uma ferramenta para facilitar as atividades de estudantes e pesquisadores, pois com um programa é possível fazer o computador resolver equações ou acender um led [23]. Na Figura 17 é possível observar o programa utilizado para controlar o sensor de efeito Hall KY-24. Por meio deste programa conseguiu-se receber os dados oriundos do sensor e fazer a análise para dar prosseguimento à pesquisa.

4.1.3 IDEIA ARDUÍNO

A principal vantagem em escolher o Arduino é a sua acessibilidade, pois tanto em termos de preço quanto em termos de facilidade de uso, ele se adequa às necessidades. Quando comparado a outras plataformas de prototipagem, o Arduino é relativamente barato e oferece diversos tipos de recursos [23].

O preço do Arduino Uno que foi o modelo utilizado, por exemplo, é bastante acessível em relação a outras placas eletrônicas de prototipagem, e pode ser adquirido facilmente em lojas especializadas ou pela internet. Isso permite que estudantes, hobistas e profissionais

iniciantes possam explorar a eletrônica e a programação de forma mais acessível, sem gastar muito dinheiro em componentes eletrônicos [23].

Outra vantagem do Arduino é sua facilidade de uso. A placa é projetada para ser fácil de usar, com uma interface simples e intuitiva. O software de programação, o Arduino IDE, é gratuito e pode ser baixado facilmente na internet. A linguagem de programação usada, o Arduino Language, é fácil de aprender e é baseada na linguagem C, o que facilita a transição para outras plataformas de programação [28].

Além disso, o Arduino é uma plataforma de hardware livre e de código aberto, o que significa que seus documentos são disponibilizados gratuitamente para que outras pessoas possam estudar, aprender e modificar o código e o hardware. Isso ajuda a criar uma comunidade ativa de usuários que podem compartilhar conhecimentos, recursos e experiências [27].

Essas características tornam o Arduino uma plataforma acessível e fácil de usar, o que o torna ideal para quem está iniciando no mundo da eletrônica e da programação, mas também é útil para profissionais que desejam criar protótipos eletrônicos de forma rápida e econômica.

4.2 MONTAGEM

A ideia é construir um sistema de hardware e software para proporcionar uma forma alternativa de baixo custo para medir campo magnético. Pensando nisso, foi desenvolvido um dispositivo eletrônico com o Arduino e um sensor de Efeito Hall.

Os materiais necessários para montar o aparato experimental que envolve a parte de hardware e software, capaz de medir a presença do campo magnético foram os seguintes:

1. Placa Arduino UNO – plataforma com uma placa de circuito impresso com micro controlador, Microchip ATmega328P;

2. Placa Protoboard – é uma ferramenta eletrônica amplamente utilizada para prototipagem, ou seja, para elaboração de circuitos eletrônicos, pois facilita o manuseio e teste dentro do projeto;

3. Jumpers – pequenos fios metálicos responsáveis pelas conexões entre as partes de circuito e a placa Arduino;

4. Sensor de Efeito Hall U18411 – é um transdutor com capacidade de detectar campo magnético através da diferença de potencial produzida entre dois terminais do mesmo;

5. Sensor de Efeito Hall KY24 Hall A3144 – é um transdutor com capacidade de detectar a presença de campo magnético como o U18411, possuindo um diferencial de levantar dados analógicos;

6. Bobina de Helmholtz – Compõem-se de duas bobinas idênticas e paralelas, espaçadas com a mesma distância do raio, gerando campo magnético a partir de uma corrente elétrica;

7. Bobina de Multicamadas – é um componente eletrônico composto por várias camadas de material isolante intercaladas por camadas de condutores.

8. Fonte de Corrente elétrica – aparelho elétrico capaz de fornecer certos valores de corrente elétrica ou tensão;

9. Computador – responsável por compilar o programa, além de receber os processados na placa Arduíno e fazer a leitura dos resultados. A comunicação é realizada através da porta serial.

Para desenvolver as atividades da pesquisa, foi utilizado as dependências do Laboratório de Pesquisa em Materiais para Aplicações em Dispositivos Eletrônicos – LABMADE, do CCI na Universidade Federal do Norte do Tocantins – UFNT.

Em seguida, foi utilizado a plataforma Arduíno para desenvolver um código computacional capaz de controlar o sensor de Efeito Hall como mostra a Figura 17. A lógica consistia na detecção da presença do campo magnético na região de interação do sensor de efeito Hall US1881.

Porém, estava sendo impresso picos elevados sob presença de campo magnético no monitor serial e proporcionava apenas valores digitais. Dessa maneira, fez-se necessário alterar a lógica de programação e alterar o sensor de efeito Hall US1881 pelo sensor Ky24 Hall A3144. Este novo sensor gera um levantamento de dados analógicos, ou seja, o valor da intensidade do campo magnético. Para conectar o sensor ao Arduíno é necessário fazer a configuração da Figura 18 e posteriormente o aparato experimental na Figura 19.

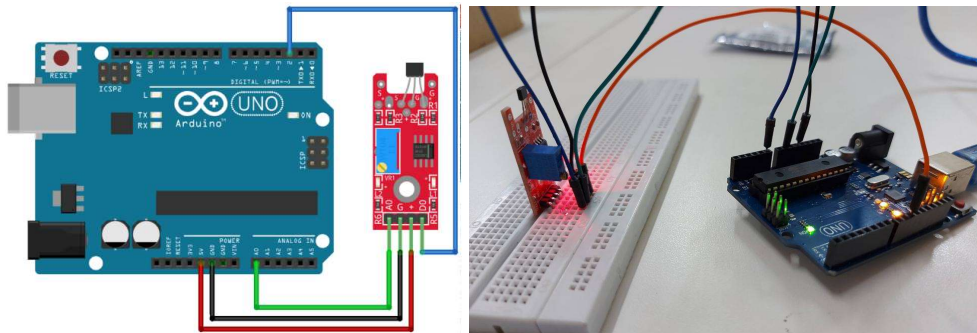


Figura 18: Configuração do sensor e o Arduino [2] e dispositivo feito no laboratório, respectivamente.

Fonte: Dados da pesquisa.

O sensor de efeito hall ky-24 possui 4 terminais: A0: terminal analógico; G: terminal neutro; +: terminal positivo, D0: terminal digital. Para conecta-lo ao Arduíno deve-se ligar o A0 ao A0 do Arduíno, Conectar G ao GND do Arduíno, Conectar + ao 5V do Arduíno, Conectar D0 ao 8 digital do Arduíno.

Este arranjo experimental foi baseado nas condições estruturais da bobina de Helmonstz, utilizando dois transformadores de acordo com as condições de Helmholtz, ambas espaçadas com uma distância igual ao raio. Também foi utilizado duas bobinas de multicamadas também, como mostra as Figuras 19 e 20.

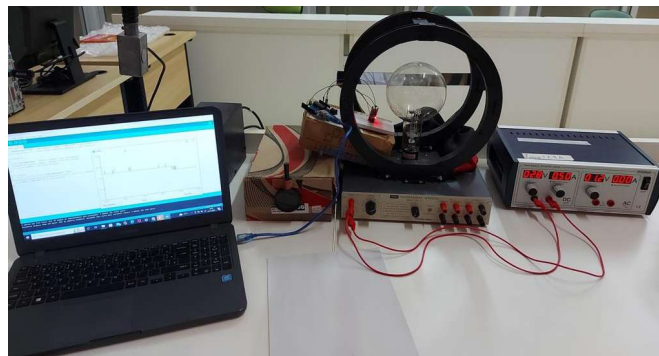


Figura 19: Aparato experimental no laboratório com bobina de Helmholtz.

Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 20: Aparato experimental no laboratório com bobina de multicamadas.

Fonte: Dados da pesquisa.

Desta forma é possível coletar os valores da tensão referente ao campo magnético, criar tabelas e gráficos comparativos com os resultados coletados.

4.3 CALIBRAÇÃO

Nesta etapa, foi colocado o dispositivo eletrônico para o processo de calibração e verificar a validade dos dados obtidos. Como já foi mencionado anteriormente, o sensor Ky24 Hall A3144 foi o escolhido para detectar a presença do campo magnético, baseado no Efeito Hall (pode ser definido como uma diferença de potencial produzido em um condutor elétrico ou semicondutor, normal a uma corrente elétrica e a um campo magnético aplicado perpendicular à essa corrente). O processo de calibração ocorreu em dois momentos, primeiro com a bobina de 1200 voltas e depois com a bobina de multicamadas com 130 voltas (bobina de Helmholtz). Estes materiais podem ser observados nas Figuras 19 e 20.

Na primeira etapa é utilizado a bobina de 1200 voltas. A partir dela o sensor gerou os dados que estão presentes na Tabela 1. O valor da tensão referente ao campo magnético gerado é inicialmente dado em Bits e posteriormente convertido para Volts, multiplicado por $\frac{5}{1024}$. Os valores do campo magnético são oriundos da equação 3.13. Na Tabela 1 observa-se que os valores da tensão e do campo magnético variam de acordo com a corrente elétrica.

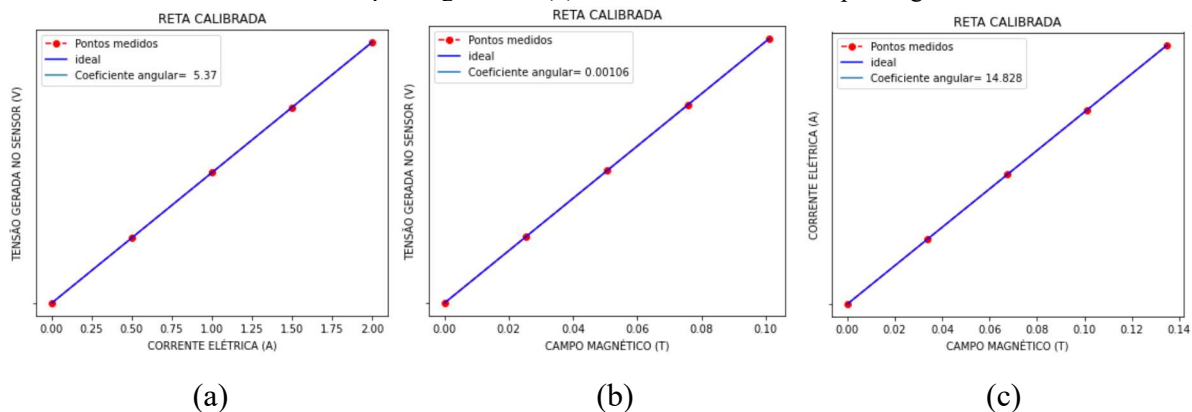
Tensão (V)	Corrente Elétrica (A)	Campo Magnético (T)
$2,68 \cdot 10^{-5}$	0,5	$3,37 \cdot 10^{-2}$
$5,37 \cdot 10^{-5}$	1,0	$6,74 \cdot 10^{-2}$
$8,06 \cdot 10^{-5}$	1,5	$1,01 \cdot 10^{-1}$
$1,07 \cdot 10^{-4}$	2,0	$1,35 \cdot 10^{-1}$

Tabela 1: Valores encontrados nas medidas utilizando a bobina de 1200 voltas.

Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que na primeira coluna encontra-se os valores da tensão que foram encontrados pelo sensor de Efeito Hall, a segunda coluna representa os valores de corrente elétrica inseridos na fonte conectada ao experimento e na terceira coluna estão os valores do campo magnético gerados pela bobina de 1200 voltas. Esses valores podem ser observados nos gráficos da Figuras 21, as quais apresentam os pontos medidos e a reta ideal em relação a eles.

Figura 21: Valores encontrados utilizando a bobina com 1200 volts para (a) Tensão x Corrente Elétrica, (b) Tensão x Campo Magnético e (c) Corrente Elétrica x Campo Magnético.



Fonte: Dados da pesquisa.

Para encontrar o valor do campo magnético são necessárias duas bobinas coaxiais que estão separadas por um raio r de 0,016 m, possuindo um número N de espiras cada, conforme mostra a Figura 20. Também é necessário conhecer o valor da corrente elétrica i , que passa no interior da bobina de 1200 volts.

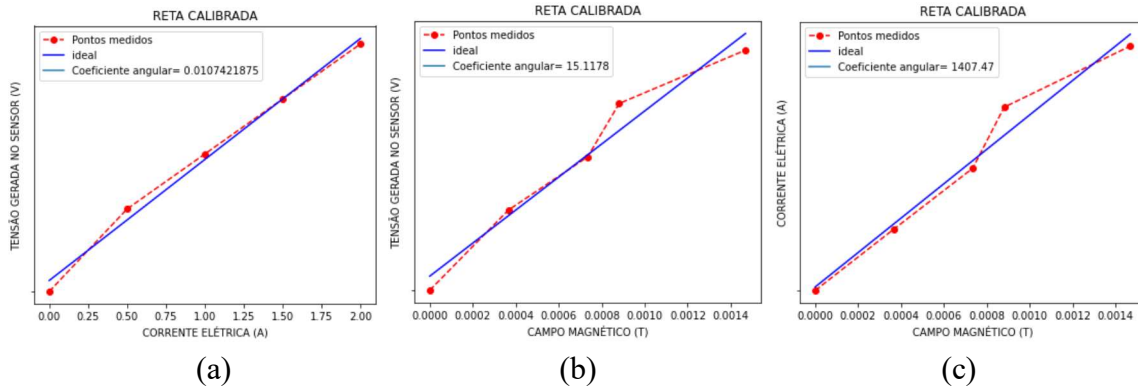
Na Tabela 2, têm-se os valores de calibração para diferentes valores de corrente em relação à bobina de Helmholtz, nela é possível observar que os valores da tensão são diretamente proporcionais à corrente que o sensor encontra na bobina de Helmholtz. A equação utilizada para calcular o valor do campo será a mesma, mas diferente da primeira bobina usada, o valor de N será 130 voltas e o raio r de 0,016 m. Posteriormente, esses valores podem ser observados nas Figuras 21, as quais apresentam os pontos medidos e a reta ideal em relação a eles.

Tensão (V)	Corrente Elétrica (A)	Campo Magnético (T)
$7,32 \cdot 10^{-6}$	0,5	$3,65 \cdot 10^{-4}$
$1,22 \cdot 10^{-5}$	1,0	$7,34 \cdot 10^{-4}$
$1,70 \cdot 10^{-5}$	1,5	$8,81 \cdot 10^{-4}$
$2,20 \cdot 10^{-5}$	2,0	$1,47 \cdot 10^{-3}$

Tabela 1: Valores encontrados nas medidas utilizando a bobina de 130 voltas.

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 22: Valores encontrados utilizando a bobina com 130 voltas da (a) Tensão x Corrente Elétrica, (b) Tensão x Campo Magnético e (c) Corrente Elétrica x Campo Magnético.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observando os resultados da calibração em ambos os experimentos, pode-se constatar que foi obtido valores melhores utilizando a bobina de 1200 voltas, conseqüentemente, ela foi escolhida para o processo de medições. Na Figura 22, nota-se que devido ao campo magnético ser muito pequeno o sensor acaba sofrendo com o ruído e os valores não são simétricos como os gráficos da Figura 21.

Medidas variando a posição do sensor também foram realizadas utilizando a bobina de Helmholtz. Uma delas ocorreu com o sensor no centro entre as 2 bobinas separadas por uma distância r , a qual possui raio $r/2$. A Figura 22 mostra as diferentes distâncias do aparato, nas quais as 3 medidas foram realizadas. As bobinas foram separadas por uma distância de 6 cm, valor correspondente à largura da protoboard como é possível observar na Figura 19.

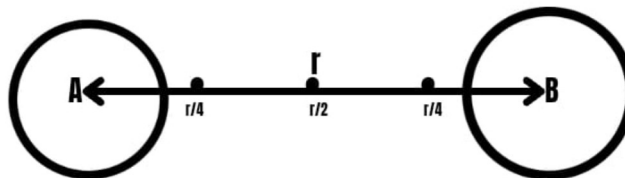


Figura 23: Modelo do arranjo experimental realizado.

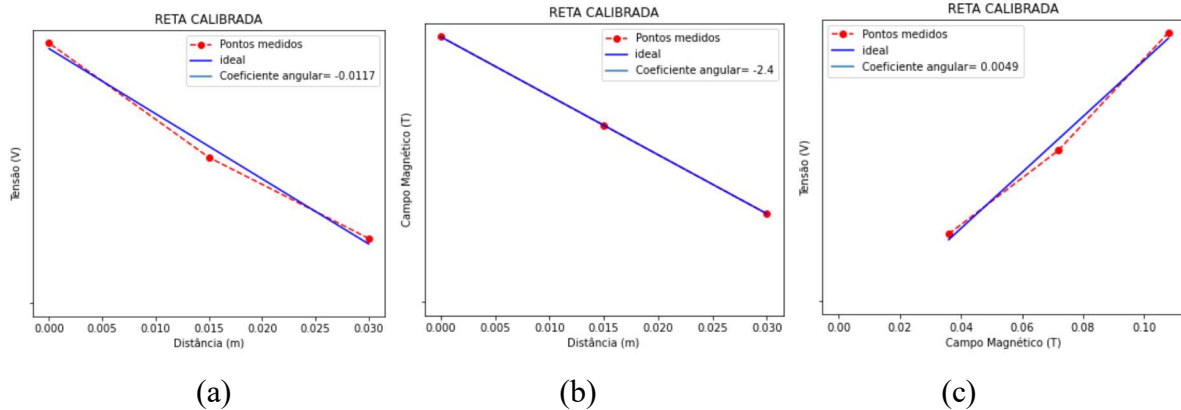
Fonte: Dados da pesquisa.

Pontos (z)	Tensão (V)	Campo Magnético (T)
$r/2$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$
$r/4$	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$7,19 \cdot 10^{-2}$
0	$4,69 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$

Tabela 3: Valores para as medições do aparato experimental utilizando a bobina com 1200 voltas da Figura 20.

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 24: Valores encontrados utilizando a bobina com 1200 voltas da (a) Tensão x Distância, (b) Corrente Elétrica x Campo Magnético e (c) Tensão x Campo Magnético.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observando os dados da Tabela 3 nota-se que nos pontos $r/4$ o valor da tensão obtido foi o mesmo, isso mostra que o sensor está bem calibrado. Foi calculado o valor do campo magnético referente às distâncias (m) observadas na Figura 24, com uma corrente elétrica fixa de 2,0 A.

Nesta etapa, não foi possível realizar medidas com materiais magnéticos devido à falta deles no laboratório. Porém, foi possível constatar que os campos magnéticos dos materiais utilizados são proporcionais às distâncias, exatamente como mostra a literatura.

Foram obtidos bons valores de tensão pelo sensor, pois os valores foram diretamente proporcionais, valores estes relacionados com a intensidade do campo magnético. Espera-se futuramente realizar medidas com materiais, de forma que se possa ter uma variedade maior de resultados satisfatórios acerca do dispositivo eletrônico confeccionado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do desenvolvimento deste trabalho, foi possível criar um dispositivo eletrônico que ajudou a promover inovação tecnológica de baixo custo para a região utilizando uma plataforma bem acessível como o Arduíno. Trabalhos que antes eram necessários grandes laboratórios completos de equipamentos, agora está ao alcance dos pesquisadores e alunos desta universidade.

Foram utilizados dois equipamentos diferentes para a calibração, o primeiro utilizando as bobinas de 1200 voltas se mostraram mais eficazes por possui um campo magnético com maior intensidade, pois ao utilizar um material de menor campo magnético foi constatado pequenas interferências nos valores, consideradas normais devido a escala que estava sendo observada.

Este material, contribui também para o ensino de Física nas escolas durante as aulas de eletromagnetismo, mais especificamente no estudo de campo magnético, como pode-se observar na dissertação do Me. Stefano Fernandes Silva, que traz a elaboração de um dispositivo eletrônico para abordagem experimental de campo magnético aplicado ao Ensino de Física [29].

Por fim, as principais contribuições deste projeto são múltiplas. Além de avançar nas investigações sobre propriedades magnéticas em diferentes materiais, ele também desempenha um papel fundamental na formação e capacitação de estudantes, que são essenciais para a sustentação das atividades de pesquisa do grupo. Através do envolvimento ativo nesse projeto, os alunos têm a oportunidade de aprimorar suas habilidades práticas, desenvolver um pensamento científico mais sólido e adquirir conhecimentos valiosos no campo da Física e da eletrônica. Essa formação proporciona uma base sólida para o futuro acadêmico e profissional desses estudantes, contribuindo para a disseminação do conhecimento e o avanço da ciência.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Halliday, David, Resnick, Robert e Walker, Jearl, Fundamentos de Física Volume 3 Eletromagnetismo, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2007.
- [2] BRAGA, Newton. Como funciona os sensores de Efeito Hall. Guarulhos. 1 imagem. Disponível em: < <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-ossensores-de-efeito-hall-art1050>>, acesso em: 27 de Março de 2023.
- [3] Xie, H., Zhong, H., e Wang, X. (2020). Medição de Campo Magnético: Técnicas, Dispositivos e Aplicações. Revista de Instrumentação e Medição do IEEE, vol. 23, nº 6, pp. 36-47. doi: 10.1109/MIM.2020.9191604
- [4] DE SOUZA, Anderson R.; PAIXÃO, Alexsander C.; UZÊDA, Diego D.; DIAS, Marco A.; DUARTE, Sergio; DE AMORIM, Helio S. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Sociedade Brasileira de Física**, [S. l.], p. 1-5, 21 mar. 2011
- [5] SANTOS, A.M.; SILVA, J.R. **Globalização e acesso a tecnologias: um estudo sobre equipamentos de baixo.** Revista de Estudos em Tecnologia e Sociedade, vol. 10, nº 2, pp. 57-72, 2021.
- [6] PINTO, Janeth Fernandez. **Magnetometria por efeito hall.** 2010. 76 p. Dissertação de Mestrado (Pos-Graduação em Física) - Academico, Recife, 2010.
- [7] REZENDE NETO, Antônio L.; MAGAGNIN JUNIOR, Ari; NEIVA, Eduardo C. Resende; FARINHAKI, Ricardo. Sistema de Medição de Campo Magnético Baseado no Efeito Hall e Arduino. 46 f. Monografia Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.
- [8] ENDALÉCIO, Alan Dantas de Medeiros. **Estudo e Implementação de um Sistema de Levitação Eletromagnética Utilizando Sensores de Efeito Hall:** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. Orientador: Richard Magdalena Stephan. 2013. 69 p. Dissertação de Mestrado (Departamento de Eletrônica e de Computação) - Academico, Rio de Janeiro, 2013.
- [9] AUGUSTO, Nemésio. ELETROMAGNETISMO MAGNETISMO. **Universidade Federal de Sergipe**, Sergipe, v. 1, p. 1-9, 2020.
- [10] DE OLIVEIRA, Carlos Jacinto; DOS SANTOS, Antonio Carlos Santana. O Campo Magnético. *In*: DE OLIVEIRA, Carlos Jacinto; DOS SANTOS, Antonio Carlos Santana. **Eletricidade e Magnetismo II.** FORTALEZA: Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE, 2015. cap. 5, p. 9-30.
- [11] HETEM, Gregorio; PEREIRA, Jatenco. RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA. *In*: FUNDAMENTOS de Astronomia. São Paulo: VITAE, 2010. cap. 4, p. 41-46.

- [12] H. D. Young & R. A. Freedman, "Física III: Eletromagnetismo, 12a. ed." Pearson, São Paulo, Brasil, 2009.
- [13] QUINTAL, João Ricardo. **UMA PROPOSTA DE ENSINO DO CONCEITO CAMPO MAGNÉTICO UTILIZANDO APLICAÇÕES DO COTIDIANO**. Orientador: Wilma Machado Soares Santos. 2003. 70 p. PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO (Graduando) - Acadêmico, Sergipe, 2003.
- [14] ROSAS, A. W. P. UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE TÓPICOS DE ELETROMAGNETISMO. Produto Educacional Mestrado em Ensino de Física, São Luiz, p. 1-39, 2020.
- [15] JÚNIOR, Francisco Ramalho; SOARES, Paulo Antônio de Toledo Soares; FERRARO, Nicolau Gilberto. Eletromagnetismo: CAMPO MAGNÉTICO. *In*: OS FUNDAMENTOS da Física. 9. ed. [S. l.]: Editora Moderna, 2007. v. 3, cap. 13, p. 278-313. ISBN 9788516056599.
- [16] TIPLER, Paul A. Física para Engenheiros, Sexta edição, Vol. 2, 2009.
- [17] Serway, Raymond A. e Jewett Jr, John W., Princípios de Física Volume 3 Eletromagnetismo, Ed. Thomson São Paulo, 2006
- [18] NUSSENZVEIG, Moysés H. Curso de Física Básica, v. 3, Primeira edição, 1997.
- [19] E. H. Hall, "On a New Action of the Magnet on Electric Currents" American Journal of Mathematics. 2, 287 (1879).
- [20] Hurd. C. H, The Hall Effect in Metals and Alloys. Plenum Press, New York- London, 1972.
- [21] UFJF, **O efeito Hall**. Notas de aulas [S. l.], 200,. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/fisica/files/2013/10/FIII-06-07-O-efeito-Hall.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2023.
- [22] DE SOUZA, Marco Polo Moreno. **Curso Básico de Arduino**. Ji-Paraná/RO: [s. n.], 2017.
- [23] TARCSAY, Hugo. **Arduino - Protótipo De Irrigação Por Aspersão**. [S. l.], 5 dez. 2020. Disponível em: <https://www.instructables.com/Arduino-Prot%C3%B3tipo-De-Irriga%C3%A7%C3%A3o-Por-Aspers%C3%A3o/>. Acesso em: 30 abr. 2023.
- [24] VIEIRA, Marcelo Andrade da Costa. SEL 0414 – Sistemas Digitais. *In*: VIEIRA, Marcelo Andrade da Costa. **Conversores A/D e D/A**. [S. l.], 2019.
- [25] BARRETO, P. G.; DE BARROS, A. E. A., Eletromagnetismo: uma viagem do macro ao micro. Editora Livraria da Física. 1ª Edição, São Paulo, 2017.
- [26] CRUZ, Felipe. Python: Escreva seus primeiros programas. São Paulo–SP: Casa do Código, p. 241, 2015.

[27] OLIVEIRA, Cláudio Luís Vieira; ZANETTI, Humberto Augusto Piovesana; NABARRO, Cristina Becker Matos; GONÇALVES, Júlio Alberto Vansan. **Aprenda Arduino Uma abordagem prática**. Duque de Caixas: [s. n.], 2018. 181 p. v. 1. ISBN 978-85-52946-03-8.

[28] PIMENTA, Amanda. **Hack.ATOMIC hackerspace: ARDUINO**. Vale do Paraíba: [s. n.], 2014.

[29] SILVA, Stefânio Fernandes. **Elaboração de dispositivo eletrônico para abordagem experimental de campo magnético aplicado ao Ensino de Física**. 2023. 83 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Norte do Tocantins no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF)) - Araguaina, 2023.

ANEXOS

- **Imagens dos materiais usados no aparato experimental**

1. Placa Arduíno UNO



2. Placa Protoboard



3. Jumpers e conectores



4. Sensor de Efeito Hall KY24 Hall A3144



5. Bobina de Helmholtz



6. Bobina de Multicamadas



7. Fonte de Corrente elétrica



8. Computador

