



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO INTERDISCIPLINAR CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOÃO VICTOR PRAXEDES NUNES

**UTILIZAÇÃO DA BOBINA DE HELMHOLTZ PARA MEDIÇÃO DO CAMPO
MAGNÉTICO DA TERRA**

CARAÚBAS

2024

JOÃO VICTOR PRAXEDES NUNES

**UTILIZAÇÃO DA BOBINA DE HELMHOLTZ PARA MEDIÇÃO DO CAMPO
MAGNÉTICO DA TERRA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Zenner Silva Pereira

CARAÚBAS

2024

© 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.

N972u Nunes, João Victor Praxedes.
Utilização da bobina de Helmholtz para medição
do campo magnético da Terra / João Victor
Praxedes Nunes. - 2024.
50 f. : il.

Orientador: Zenner Silva Pereira.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. campo magnético. 2. bobina de Helmholtz. 3.
solenóide. I. Pereira, Zenner Silva, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

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.

JOÃO VICTOR PRAXEDES NUNES

**UTILIZAÇÃO DA BOBINA DE HELMHOLTZ PARA MEDIÇÃO DO CAMPO
MAGNÉTICO DA TERRA**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semiárido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Ciência
e Tecnologia.

Defendida em: 11 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Zenner Silva Pereira, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Ana Tereza Abreu Lima, Prof. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Pedro Neri Bandeira de Souza, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico este trabalho aos meus pais e irmãs por
serem a base para o meu desenvolvimento.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Elis Cristina e João Neto, por serem a base para o meu desenvolvimento como pessoa. Agradeço por seus apoios e incentivos incondicionais, seus ensinamentos e lições de vida moldaram o meu caráter.

Agradeço as minhas irmãs, Vitória e Viviane, por estarem ao meu lado fornecendo as condições necessária para trilhar essa jornada.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Zenner Silva, por toda a dedicação e empenho em me guiar neste trabalho de conclusão de curso, seus incentivos e ensinamentos foram fundamentais para a elaboração desse projeto.

Agradeço a todos os meus colegas de universidade com quem compartilhei momentos importantes, e cujo apoio me ajudou a alcançar meus objetivos, em especial a Caellison Bezerra, Nadson Daniel e Randres Cides, que estiveram comigo durante quase todo esse período.

Agradeço aos técnicos do laboratório de Física, Marcos Vinicius e Pedro Bandeira por disponibilizarem seu tempo e conhecimento para realização dos experimentos deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os outros funcionários da UFERSA, cujos serviços são fundamentais para proporcionar as melhores condições a todos que fazem parte dessa instituição.

Não há nada melhor que adversidade. Toda derrota, todo desgosto, toda perda contêm sua própria semente, sua própria lição sobre como melhorar seu desempenho na próxima vez.

Malcom X

RESUMO

A experimentação científica possibilitou a descoberta e melhor compreensão de diversos fenômenos ao longo da história, especialmente nos últimos séculos. Como, por exemplo, o campo magnético um dos fenômenos mais fundamentais que existem. A sua compreensão possibilitou a criação de diversos dispositivos que modelaram o avanço da sociedade. Seguindo o raciocínio acerca da importância da ampla experimentação científica, esse estudo propôs a utilização da bobina de Helmholtz como uma alternativa aos solenoides na prática de medição do campo magnético da Terra no laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA em Caraúbas/RN como forma de aumentar o leque de possibilidades disponíveis para essa prática e comparar os resultados entre ambos para observar se existe um que apresente melhor concordância ao resultado esperado. A metodologia consistiu em realizar a prática de determinação do campo magnético terrestre com ambos os equipamentos em condições semelhantes de operação, de forma a evitar possíveis interferências no experimento. Os resultados indicaram que a bobina de Helmholtz é uma alternativa válida ao solenoide para esse experimento com ambos apresentando erros de 5,3% e 6% respectivamente, em relação ao campo de referência.

Palavras-chave: campo magnético; bobina de Helmholtz; solenoide.

ABSTRACT

Scientific experimentation has made it possible to discover and better understand several subjects throughout history, especially in recent centuries, such as the magnetic field, one of the most fundamental phenomena that exists. Its understanding made it possible to create several devices that shaped the advancement of society to what it is today. Following the reasoning about the importance of broad scientific experimentation, this study proposed the use of the Helmholtz coil as an alternative to solenoids in the practice of measuring the Earth's magnetic field in the Electricity and Magnetism laboratory of UFERSA in Caraúbas/RN as a way to increase the range of possibilities available for this practice and compare the results between both to observe if there is one that presents better agreement to the expected result. The methodology consisted of performing the practice of determining the Earth's magnetic field with both equipment's under similar operating conditions, to avoid possible interference in the experiment. The results indicated that the Helmholtz coil is a valid alternative to the solenoid for this experiment, with both presenting errors of 5.3% and 6%, respectively, in relation to the reference field.

Keywords: magnetic field; Helmholtz coil; solenoid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As linhas de campo e os polos norte e sul	22
Figura 2 - Regra da mão direita para força magnética	24
Figura 3 - Modelagem do campo magnético da Terra	25
Figura 4 – Campo magnético gerado por um elemento infinitesimal de fio	26
Figura 5 – Campo magnético de uma espira circular	27
Figura 6 - Configuração da bobina de Helmholtz	28
Figura 7 – Comparação dos campos de uma bobina simples e uma bobina de Helmholtz ...	29
Figura 8 - Uso da Lei de Ampère na determinação do campo magnético	30
Figura 9 - Aplicação da Lei de Ampère para campo magnético gerado por solenoide	32
Figura 10 - Processo de centralização da bússola	34
Figura 11 - Circuito montado para bobina de Helmholtz	35
Figura 12 - Circuito montado para o Solenoide	36
Figura 13 - Interface do Google Earth com dados geográficos usados	39
Figura 14 - Dados do magnetismo do local	40
Figura 15 - Relação entre o campo magnético da Terra e do solenoide	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Campo do campo do solenoide em função do ângulo	43
Gráfico 2 – Campo ajustado do solenoide em função do ângulo	45
Gráfico 3 – Campo da bobina de Helmholtz em função do ângulo	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da prática com o solenoide	40
Tabela 2 – Corrente média por ângulo (solenoide)	41
Tabela 3 – Campo magnético do solenoide	41
Tabela 4 – Campo magnético da Terra (solenoide)	42
Tabela 5 - Dados da prática com a bobina de Helmholtz.....	45
Tabela 6 – Corrente média por ângulo (bobina de Helmholtz)	46
Tabela 7 – Campo magnético da bobina de Helmholtz	46
Tabela 8 – Campo magnético da Terra (bobina de Helmholtz)	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RN	Rio Grande do Norte
A.C.	Antes de Cristo
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-árido
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
WMM	<i>World Magnetic Model</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Ω	Ohm
M	Micro
Θ	Ângulo defletido
Π	Constante pi
$\int$	Integral
$\times$	Produto vetorial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Campo Magnético.....	18
2.1.1. Origem do Campo Magnético	19
2.1.2. Polos Magnéticos.....	20
2.1.3. Linhas de Campo Magnético.....	20
2.1.4. Força Magnética e a Regra da Mão Direita.....	22
2.1.5. Declinação magnética.....	23
2.1.6. Campo magnético da Terra.....	24
2.2. Lei De Biot-Savart	25
2.2.1. Campo magnético da bobina de Helmholtz.....	25
2.3. Lei De Ampère	28
2.3.1. Campo magnético ao Redor de um Fio Retilíneo Longo	29
2.3.2 Campo Magnético De Um Solenoide	30
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Materiais Utilizados.....	32
3.2. Montagem Do Aparato Experimental – Bobina De Helmholtz.....	33
3.3. Procedimento Experimental – Bobina De Helmholtz	34
3.4. Montagem Do Aparato Experimental – Solenoide.....	35
3.5. Procedimento Experimental - Solenoide	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1. Campo Magnético No Local Do Experimento	37
4.2. Resultados Para O Solenoide.....	39
4.3 Resultados Para a Bobina de Helmholtz	44
5. CONCLUSÃO.....	48
6. REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

O estudo do eletromagnetismo ocupou lugar de destaque na física nos últimos anos, as contribuições advindas dessa área moldaram o estilo de vida da sociedade contemporânea. Equipamentos como motores, geradores, discos rígidos e aparelho de som são alguns dos principais dispositivos que fazem uso dos princípios do eletromagnetismo (MAGALHÃES; SANTOS; DIAS, 2002).

As primeiras observações sobre o magnetismo estão envoltas em lendas. A mais famosa delas, que se passa na Grécia, antes de cristo, relata a história de um pastor de ovelhas chamado Magnes, que notou que a ponta de ferro de seu cajado era atraída por certos tipos de pedras ao longo de seu caminho. Apesar de não se saber ao certo a data de descoberta do magnetismo, os primeiros estudos desse fenômeno são creditados ao pensador e matemático Tales de Mileto (VI a.c) que observou a capacidade que algumas pedras possuíam de atrair a outras (BASSALO, 1994).

Séculos se passaram desde os estudos de Tales de Mileto, e com a consolidação da física e seu caráter experimental, muitos conceitos fundamentais do eletromagnetismo foram estabelecidos como o de campo magnético, campo elétrico e carga elétrica. No ano de 1820, o físico dinamarquês Hans Christian Ørsted (1777-1851) em um dos seus experimentos colocou um “fio metálico em paralelo a uma agulha magnetizada que estava orientada ao longo do meridiano magnético terrestre. Ao passar uma corrente elétrica constante no fio observou que a agulha era defletida de sua direção original” (CHAIB; ASSIS, 2007, p. 2). Essa foi a primeira vez que se observou a relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos, que até então eram tidos como independentes.

Podemos dizer que a utilização das propriedades do campo magnético, ainda que não se soubesse bem do que se tratava, teve papel fundamental no progresso da humanidade, não só em épocas recentes, mas também em tempos que o conhecimento do magnetismo era mínimo. As grandes navegações utilizavam a bússola como guia em suas jornadas. A bússola pode ser considerada uma das principais ferramentas já criadas pela humanidade, graças a ela diversas incursões ao redor do mundo puderam ser realizadas. O funcionamento da bússola se dá por meio de uma agulha imantada cujo a ponta Norte, devido a atração entre os polos opostos, aponta para o norte geográfico da Terra, uma vez que lá se encontra o sul magnético terrestre. Para além das navegações, o conhecimento acerca do funcionamento do campo magnético da Terra é fundamental para outras áreas da ciência como a geofísica, onde o seu estudo pode ajudar a compreender melhor o funcionamento do núcleo terrestre.

No experimento “Campo magnético da Terra” do Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA em Caraúbas/RN, a forma de determinação do campo é feita através do uso de bússolas que são colocadas no interior de solenoides, e quando estes são percorridos por correntes defletem o ponteiro da bússola por determinados ângulos. Entretanto, os laboratórios dispõem de outro equipamento que pode, mas ainda não, utilizado no lugar dos solenoides, a bobina de Helmholtz.

A bobina de Helmholtz é um dispositivo no qual duas bobinas iguais (mesmo diâmetro e número de espiras) são colocadas em paralelo entre si, e separadas por uma distância igual ao raio delas, uma das principais vantagens desse tipo de configuração é o fato de o campo magnético no seu interior ser aproximadamente uniforme na região entre as bobinas.

A escolha da bobina de Helmholtz também favorece o aprendizado prático de um dos conceitos centrais do eletromagnetismo: a superposição de campos magnéticos. Nesse caso, o campo gerado pelas bobinas somado ao campo magnético terrestre permite que os alunos explorem a relação entre intensidade, direção e uniformidade do campo em experimentos de medição. A experiência prática com esse tipo de equipamento facilita o desenvolvimento de habilidades de análise crítica e resolução de problemas, importantes para a formação de futuros cientistas e engenheiros.

Outra vantagem importante da utilização da bobina de Helmholtz é a possibilidade de reproduzir experimentos de forma mais precisa, permitindo que os resultados sejam comparáveis e repetíveis. Esse fator é essencial para a validação de teorias e conceitos científicos, além de proporcionar uma base mais sólida para a investigação de fenômenos naturais. Ao utilizar equipamentos que geram campos magnéticos uniformes, como as bobinas de Helmholtz, o laboratório se alinha às melhores práticas científicas, fornecendo uma aprendizagem mais eficaz e robusta.

A proposta de implementação dessa metodologia no Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA oferece, portanto, não só uma alternativa viável, mas também uma oportunidade de melhorar a infraestrutura de pesquisa e ensino no campus de Caraúbas/RN. A inserção da bobina de Helmholtz no experimento "Campo Magnético da Terra" não apenas otimiza os resultados das medições, como também amplia a gama de abordagens pedagógicas disponíveis, permitindo que os professores adaptem as atividades práticas de acordo com as necessidades dos alunos e os objetivos curriculares.

Dessa forma, é válido um estudo acerca do comportamento do campo magnético da Terra, e para isso a bobina de Helmholtz possibilita uma alternativa simples para experimentos do tipo “Campo magnético da Terra” do Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA

em Caraúbas/RN. A possibilidade de escolher diferentes formas de realizar práticas científicas amplia a metodologia que pode ser aplicada pelo professor(a), de forma a facilitar a compreensão dos alunos acerca de alguns dos conceitos do eletromagnetismo.

Nesta pesquisa pretende-se, portanto, analisar o comportamento do campo magnético da Terra utilizando por intermédio da bobina de Helmholtz, e se essa configuração é viável em experimentos, de forma conjunta, propor sua implementação na prática “Campo magnético da Terra” do Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA campus Caraúbas/RN.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Campo Magnético

O conceito de campo é uma das ferramentas mais poderosas e abrangentes da física, utilizado para descrever a influência que um corpo ou sistema exerce sobre outro, mesmo na ausência de contato direto. Esse conceito, inicialmente aplicado ao campo gravitacional, foi posteriormente expandido para outras áreas como o eletromagnetismo e a mecânica quântica, servindo como base para a compreensão das interações fundamentais do universo. Na física clássica, um campo pode ser representado como uma entidade contínua, que atribui a cada ponto do espaço uma grandeza física, como uma força, uma energia ou uma direção, capaz de influenciar outros corpos localizados nesse espaço (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Assim como o campo elétrico $\vec{E}$, que descreve o efeito que uma carga elétrica gera sobre outras cargas em seu entorno, o campo magnético $\vec{B}$ é utilizado para explicar as forças que agem sobre partículas carregadas em movimento ou materiais com propriedades magnéticas. Em ambos os casos, o campo é uma maneira de visualizar como as interações ocorrem em uma região do espaço, mesmo quando os objetos não estão em contato direto (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Um exemplo claro disso é a bússola, cujo ponteiro é influenciado pelo campo magnético terrestre, apontando sempre na direção do norte, mesmo que a Terra não esteja fisicamente tocando o dispositivo.

Além das aplicações práticas cotidianas, como no caso dos motores elétricos, transformadores e dispositivos de armazenamento de dados (como os discos rígidos), o campo magnético desempenha um papel crucial em fenômenos naturais de grande escala. Por exemplo, o campo magnético da Terra, conhecido como magnetosfera, protege o planeta dos ventos solares, desviando partículas carregadas que poderiam ser prejudiciais à vida. Esse mesmo campo é responsável pelas auroras boreais e austrais, fenômenos naturais que ocorrem quando essas partículas interagem com a atmosfera terrestre nas regiões polares (ESPACOTEMPO, 2014).

O estudo de campos magnéticos também tem implicações importantes na ciência de materiais. Em materiais ferromagnéticos, como o ferro, os domínios magnéticos se alinham na presença de um campo magnético externo, amplificando o efeito do campo. Esse comportamento é utilizado em várias tecnologias, incluindo dispositivos de memória magnética

e motores. Já em materiais diamagnéticos e paramagnéticos, as respostas ao campo magnético são diferentes, envolvendo fenômenos como a repulsão fraca (diamagnetismo) e a atração moderada (paramagnetismo) pelo campo magnético externo (FITZGERALD; KINGSLEY, 2014).

2.1.1. Origem do Campo Magnético

O fenômeno da produção de campos magnéticos a partir de cargas elétricas em movimento ou por partículas elementares com propriedades magnéticas é um dos pilares da física do eletromagnetismo. Quando uma corrente elétrica percorre um condutor, como em um fio, o movimento das cargas elétricas gera um campo magnético ao redor desse fio. Este princípio é a base dos eletroímãs, dispositivos que utilizam correntes elétricas para criar campos magnéticos intensos e controláveis, os quais podem ser ajustados simplesmente variando a intensidade da corrente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Eletroímãs são amplamente utilizados em diversas aplicações tecnológicas, como motores elétricos, relés, e em grandes equipamentos como guindastes industriais para levantamento de certos tipos de metais, em especial os ferromagnéticos e alguns paramagnéticos, os diamagnéticos são, em geral, repelidos por estes. (ENERGIA NUCLEAR, 2021).

A principal vantagem dos eletroímãs é a capacidade de ligar e desligar o campo magnético, o que os torna muito versáteis. Por exemplo, em máquinas como tomógrafos por ressonância magnética, o controle do campo magnético é essencial para capturar imagens detalhadas do interior do corpo humano. Da mesma forma, os eletroímãs também desempenham um papel importante em sistemas de transmissão e distribuição de energia, como em transformadores, onde a manipulação precisa de campos magnéticos é necessária para a conversão de tensões (Electricity-Magnetism).

A segunda forma de produção de campo magnético, associada ao magnetismo intrínseco das partículas elementares, como o elétron, é igualmente fascinante. O elétron, além de sua carga elétrica, possui uma propriedade conhecida como momento magnético de spin. Esse momento de spin confere ao elétron um campo magnético próprio, mesmo que ele não esteja em movimento ao longo de um fio condutor. Nos ímãs permanentes, os campos magnéticos gerados pelos spins dos elétrons dentro do material estão alinhados, resultando em um campo magnético macroscópico que podemos detectar ao redor do ímã. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

A força do campo magnético de um ímã permanente depende da estrutura microscópica do material e da maneira como os momentos magnéticos dos átomos que o compõem estão organizados. Em materiais ferromagnéticos, como o ferro, os momentos magnéticos de grandes grupos de átomos se alinham em regiões chamadas domínios magnéticos. Quando esses domínios estão orientados na mesma direção, o material exibe um campo magnético forte e permanente. No entanto, a exposição a campos magnéticos externos pode reorientar esses domínios, tornando o ímã mais forte ou mais fraco, dependendo das condições (SADIKU, 2012).

2.1.2. Polos Magnéticos

Os polos magnéticos são uma característica fundamental dos ímãs permanentes e estão sempre presentes em pares, conhecidos como dipolos magnéticos. Isso significa que, ao contrário das cargas elétricas, que podem existir de forma isolada (como uma carga positiva sem uma correspondente negativa), não é possível encontrar um polo magnético isolado, seja norte ou sul. Sempre que há um polo norte magnético, ele será acompanhado por um polo sul magnético, o que caracteriza a natureza intrínseca dos campos magnéticos.

Essa configuração de dipolos magnéticos pode ser observada em diversas situações. Quando um ímã é cortado ao meio, o que ocorre não é a separação dos polos, mas sim o surgimento de novos dipolos em cada pedaço resultante. Isso ocorre porque os domínios magnéticos no interior do ímã se realinham de modo que, mesmo nos pedaços menores, ambos os polos estejam presentes. Cada pedaço cortado mantém suas propriedades magnéticas completas, com um novo polo norte e um novo polo sul, independentemente de quantas vezes o ímã seja dividido. Esse fenômeno é conhecido como o princípio da indivisibilidade magnética dos polos, e é uma das evidências mais claras de que os polos magnéticos não podem ser isolados (SADIKU, 2012).

2.1.3. Linhas de Campo Magnético

O campo magnético, sendo uma grandeza vetorial, é representado de maneira diferente das grandezas escalares, pois envolve não apenas um valor numérico (intensidade), mas também uma direção e um sentido específicos. Isso significa que, em qualquer ponto do espaço, o campo magnético pode ser descrito por um vetor, que aponta na direção do campo e cuja magnitude indica a força desse campo naquele local. Para facilitar sua visualização e

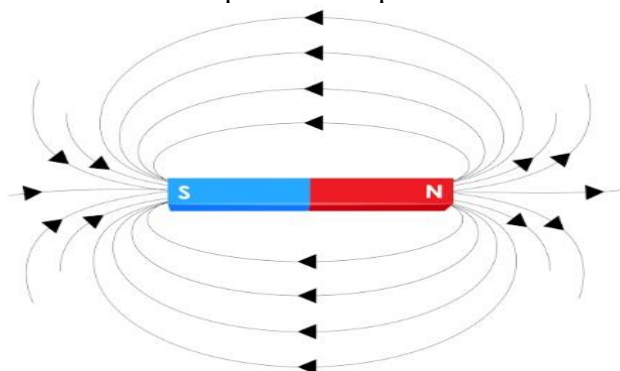
compreensão do comportamento de campos magnéticos em diferentes situações, os físicos utilizam o conceito de linhas de campo magnético.

As linhas de campo magnético, também chamadas de linhas de fluxo magnético, são representações gráficas que mostram a direção do vetor campo magnético $\vec{B}$ em diferentes pontos do espaço. Ao desenhar essas linhas, é importante que elas sejam sempre tangentes ao vetor campo magnético em qualquer ponto, o que significa que a direção do vetor campo em um local específico coincide com a direção da linha naquele ponto. Dessa forma, as linhas de campo não apenas ilustram a direção do campo magnético, mas também a sua intensidade, dependendo da proximidade entre as linhas. Quanto mais próximas essas linhas estiverem, maior será a intensidade do campo magnético naquela região ((YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Um exemplo comum de visualização de linhas de campo magnético pode ser observado ao redor de um ímã em forma de barra (figura 1). As linhas de campo saem do polo norte do ímã e se curvam ao redor, entrando no polo sul. Dentro do ímã, as linhas de campo que entraram no polo sul percorrem o material até o polo norte por onde saem novamente, formando assim, um ciclo fechado. Este padrão visual, muitas vezes demonstrado com limalha de ferro em experimentos de sala de aula, revela a simetria do campo magnético de um dipolo, com as linhas se concentrando nos polos, onde o campo magnético é mais forte.

Os solenoides, bem como a bobina de Helmholtz, por exemplo, são dispositivos compostos por fios enrolados em espiral que, quando percorridos por uma corrente elétrica, geram um campo magnético. O campo magnético no interior desses dispositivos é, aproximadamente, uniforme. As linhas de campo magnético são paralelas e equidistantes entre si dentro do solenoide, o que reflete a uniformidade do campo. Fora dessas configurações, no entanto, as linhas de campo se dispersam, demonstrando que o campo é mais fraco e menos uniforme.

Figura 1 - As linhas de campo saem do polo norte e entram no polo sul



Fonte: Brasil Escola, 2015.

2.1.4. Força Magnética e a Regra da Mão Direita

O campo magnético pode ser definido matematicamente a partir da força que uma partícula eletricamente carregada em movimento experimenta ao atravessar uma região onde existe um campo magnético. A intensidade do campo magnético, ou módulo, pode ser expressa pela equação:

$$B = \frac{F_B}{|q|v} \quad (1).$$

Nesta equação F_B representa o módulo da força magnética que atua sobre a partícula, q é a magnitude da carga elétrica da partícula e v é a velocidade da partícula em questão (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Essa fórmula nos permite calcular o campo magnético com base nas interações entre a partícula e o campo, destacando a relação direta entre a força magnética e a carga em movimento.

Através de experimentos, observou-se que a força magnética sobre a partícula carregada é diretamente proporcional à sua velocidade, assim como ao seno do ângulo formado entre a direção da velocidade e a direção do campo magnético. Isso indica uma relação vetorial entre a força, a velocidade da partícula e o campo magnético, onde o ângulo entre esses vetores influencia diretamente a magnitude da força. A relação vetorial entre essas grandezas é expressa na seguinte equação:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2).$$

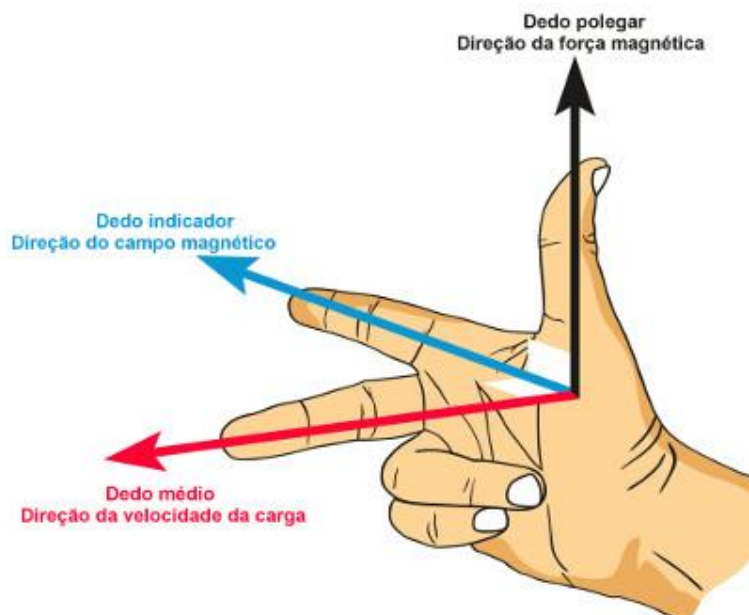
O símbolo $\times$ representa o produto vetorial entre os vetores velocidade e campo magnético. A equação revela que a força magnética é perpendicular tanto à direção da velocidade quanto à do campo magnético.

A equação (2) mostra que a força magnética não atua ao longo da direção do movimento da partícula, mas sim em uma direção perpendicular tanto à sua velocidade quanto ao campo magnético. Por isso, a força magnética não realiza trabalho sobre a partícula, mas altera sua trajetória, fazendo-a se mover em uma curva, como um movimento circular ou helicoidal, dependendo da configuração do campo e da velocidade.

Através da equação 2 é possível perceber a relação do produto vetorial entre as suas componentes. Dessa forma, a maneira mais comum de determinar a orientação da força

magnética é através da regra da mão direita. A figura 2 esboça como a regra deve ser feita, é importante ressaltar que essa regra é feita levando em consideração cargas positivas, para cargas negativas a força apontará na direção oposta da regra da mão direita.

Figura 2 - Regra da mão direita para força magnética



Fonte: Brasil Escola, 2018

2.1.5. Declinação magnética

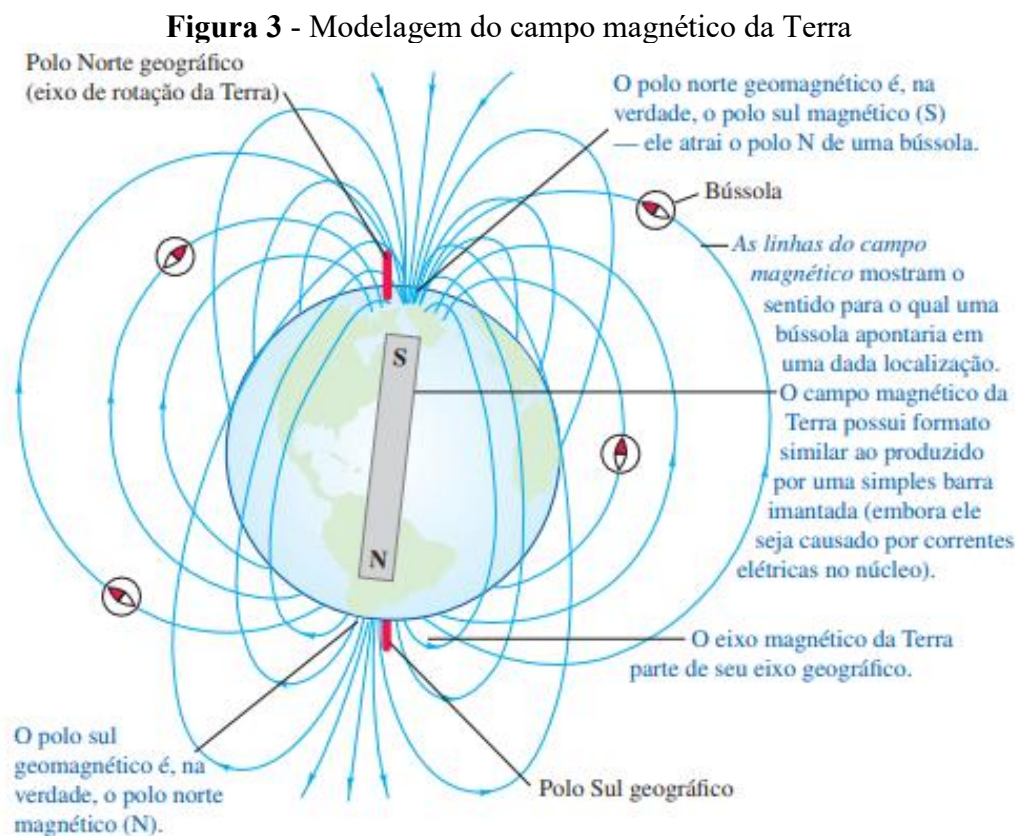
O conhecimento da declinação magnética é de fundamental importância em trabalhos de topografia e engenharia, uma vez que é empregado na orientação de direções, cálculo de azimute e determinação do norte verdadeiro. A definição do contexto geográfico se apoia nas observações astronômicas. O meridiano magnético, determinado pela bússola através da agulha imantada, está em constante flutuação devido à influência magnética da Terra. O planeta age como um corpo magnético, com sua direção em constante mudança, enquanto a agulha magnética permanece alinhada com as linhas de força magnética ao seu redor. Essa orientação da agulha magnética estabelece o meridiano magnético em um ponto e momento específicos (SOUZA, 1997).

Apesar de suas variações, o meridiano magnético serve como uma referência constante em levantamentos topográficos. Os meridianos verdadeiro e magnético formam um ângulo variável conhecido como declinação magnética, medida a partir da direção do norte verdadeiro

até o norte magnético, no sentido leste ou oeste. A declinação é positiva quando aponta para o oeste e negativa quando aponta para leste (SOUZA, 1997).

2.1.6. Campo magnético da Terra

A repulsão e atração entre os polos também se aplica ao campo magnético terrestre. A Terra age como um grande ímã, com polos norte e sul magnéticos que interagem com o campo magnético de outros ímãs, como a agulha de uma bússola. Quando aproximamos um ímã permanente de uma bússola, o ponteiro da bússola, que é um pequeno ímã, irá alinhar-se de acordo com o campo magnético do ímã externo, com o polo norte da bússola sendo atraído para o polo sul do ímã. Esse comportamento tem sido usado ao longo da história, particularmente nas grandes navegações, e ainda é de extrema importância para a orientação e a exploração geográfica (YOUNG; FREEDMAN, 2009). A figura 3 mostra o comportamento do campo magnético da Terra.

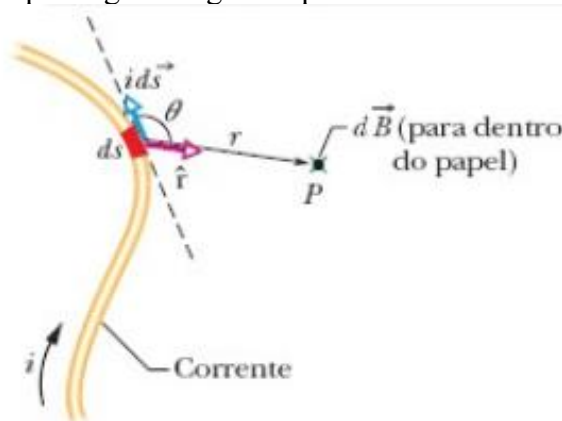


Fonte: Young; Freedman, 2016

2.2. Lei De Biot-Savart

A lei de Biot-Savart é a forma de calcular o campo magnético gerado por um pequeno elemento de fio percorrido por uma corrente em um ponto ao seu redor. Para se chegar à expressão é necessário dividir, mentalmente, o fio em elementos infinitesimais ds e para cada elemento associar um vetor $\vec{ds}$ cujo módulo é ds , e a orientação é a da corrente que o percorre. É preciso utilizar também de um vetor $\vec{r}$ cujo módulo é a distância entre o ponto no qual o campo será medido e o elemento de fio que o gera (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). A figura 4 dá uma ideia desse processo.

Figura 4 – Campo magnético gerado por um elemento infinitesimal de fio



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, 2016

Com base nesse processo chegamos a seguinte equação:

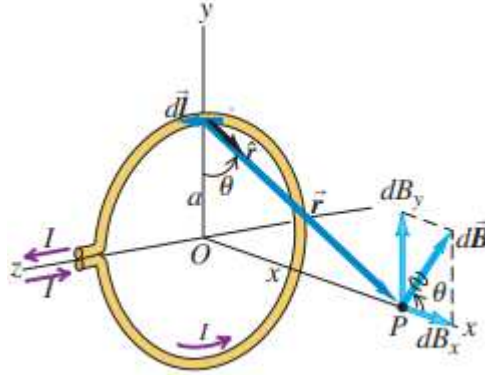
$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \vec{ds} \times \vec{r}}{r^2} \quad (3).$$

Que é chamada de Lei de Biot-Savart, onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo seu valor é de $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, e i é o valor da corrente no fio. Esse resultado expressa o campo magnético gerado por um elemento infinitesimal de fio, para calcular o campo total é necessário fazer a integração de todos os elementos infinitesimais (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

2.2.1. Campo magnético da bobina de Helmholtz

O campo magnético de uma espira pode ser determinado a partir da lei de Biot-Savart. A figura 5 apresenta detalhes importantes para esse desenvolvimento, para fins de melhor entendimento, o índice x será substituído por a, e o índice a será representado por z nos cálculos.

Figura 5 – Campo magnético de uma espira circular



Fonte: Young; Freedman, 2016

Dessa forma, temos:

$$\vec{d_B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \vec{d_s} \times \vec{r}}{r^2}$$

Integrando ambos os lados

$$\int d_B = \int \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d_s}{r^2}$$

Resultando em:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{(z^2 + a^2)} \cdot 2\pi R \quad (4).$$

Como o foco é o campo no centro da espira, calculando em função de z por meio do cosseno do ângulo, teremos:

$$B_Z = B \cdot \cos\theta$$

$$B_Z = \frac{\mu_0}{2} \frac{i \cdot R}{(z^2 + a^2)} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right)$$

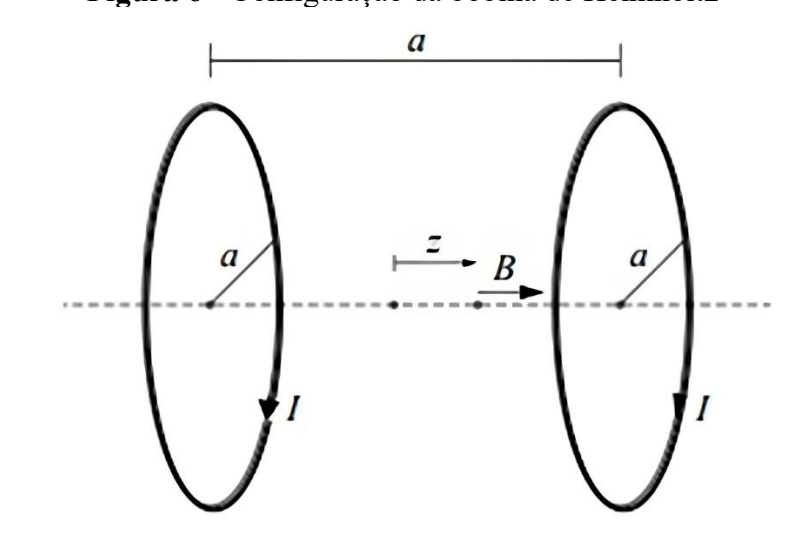
$$B_Z = \frac{\mu_0}{2} \frac{i \cdot R^2}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Para N espiras:

$$B_z = \frac{\mu_0}{2} \frac{i \cdot R^2}{(z^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5).$$

A partir do cálculo do campo magnético para um conjunto de espira é possível deduzir o campo magnético da bobina de Helmholtz. A bobina de Helmholtz é um tipo de configuração na qual duas bobinas idênticas são postas de forma paralela e separadas por uma distância igual aos seus raios. A figura 6 ilustra esse tipo de configuração.

Figura 6 - Configuração da bobina de Helmholtz



Fonte: IFSC São Paulo, 2022

Adotando z como o eixo que atravessa o centro das bobinas e a como o raio, é possível chegar à equação. Como a distância entre as duas bobinas é igual ao raio delas, z será $a/2$. Substituindo esse valor na equação 5 e multiplicando por 2 devido as duas bobinas, obtemos a equação 6 que representa o campo magnético da bobina de Helmholtz.

$$\vec{B} = \frac{8}{5^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot i \cdot N}{a} \hat{z} \quad (6).$$

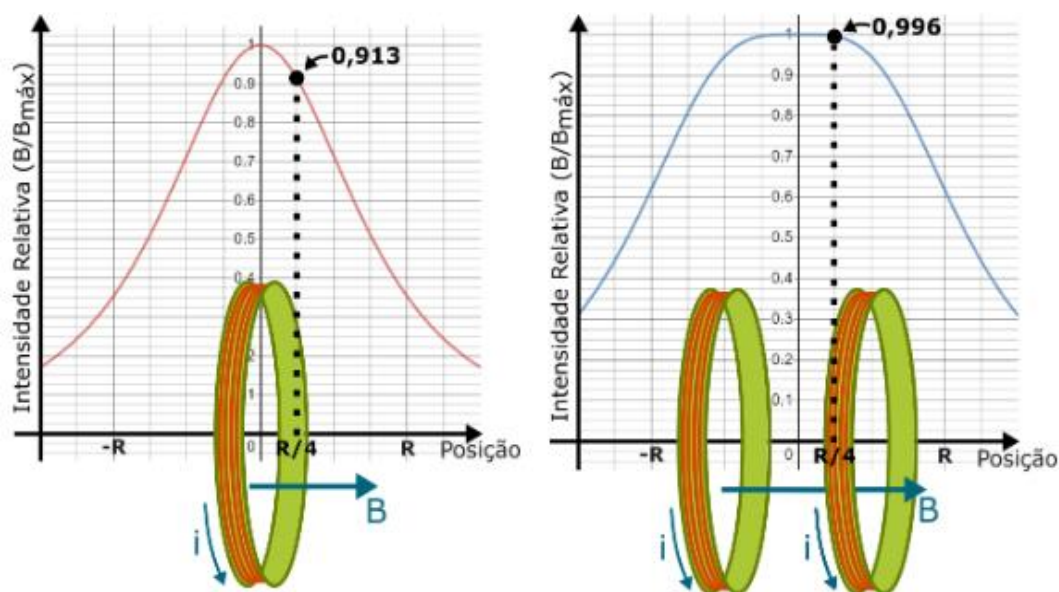
Nessa equação, o N representa o número de espiras da bobina de Helmholtz e o a representa o raio de ambas, já que são iguais.

Essa configuração, ao contrário do uso de uma única bobina, possibilita a geração de um campo magnético quase uniforme entre as bobinas, útil para diversos propósitos. Em

galvanômetros, a uniformidade do campo magnético permite o uso de bússolas maiores e mais sensíveis, melhorando a medição de corrente. Além disso, essas bobinas têm aplicações importantes na calibração de equipamentos de navegação, magnetização e desmagnetização de peças ferromagnéticas e no ajuste da direção de feixes de íons. Um exemplo notável de sua aplicação foi na descoberta da relação entre carga e massa dos elétrons, realizada por J. J. Thomson em 1897. As bobinas de Helmholtz também desempenharam um papel significativo no estudo das propriedades dos íons de diferentes átomos, em conjunto com os Tubos de Goldstein e os raios anódicos, já que era necessário gerar um campo magnético homogêneo em uma área extensa (SILVESTRIN, 2020).

A figura 7 ilustra as diferenças entre os campos magnéticos de uma bobina simples e de uma bobina de Helmholtz. O achatamento do topo da curva da Bobina de Helmholtz indica a maior uniformidade do campo magnético característico desse dispositivo. Considerando como homogênea a região onde a variação da intensidade do campo magnético é inferior a 1%, essa área se estende até $0,31R$ na Bobina de Helmholtz, enquanto na bobina simples se limita a $0,08R$. Assim, a região com variação de até 1% do campo máximo é quase quatro vezes maior na Bobina de Helmholtz (SILVESTRIN, 2020).

Figura 7 – Comparação dos campos de uma bobina simples e uma bobina de Helmholtz



Fonte: Silvestrin, 2020

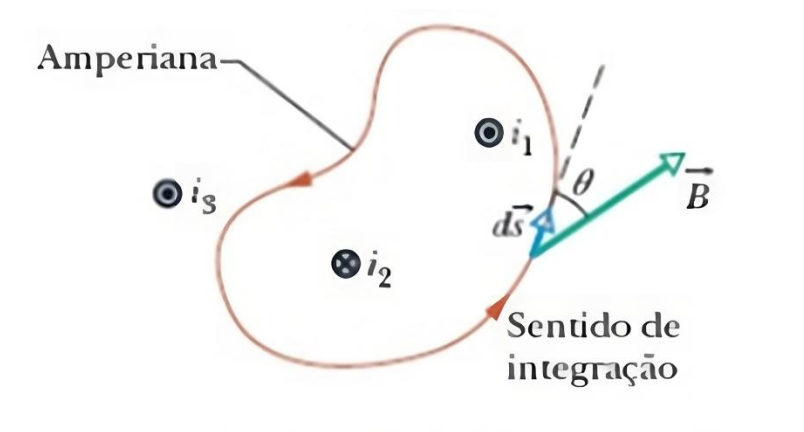
2.3. Lei De Ampère

Em muitas situações a aplicação da lei de Biot-Savart pode ser um pouco exaustiva, entretanto, para certos tipos de simetria é possível determinar o campo magnético por meio da aplicação da lei de Ampère (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016). Essa lei, que é baseada na lei de Biot-savart, é expressa pela seguinte equação:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{env} \quad (7).$$

O círculo na integral representa que a integração é de uma curva fechada chamada de amperiana. Com o auxílio da figura 8 é possível demonstrar o processo por trás da lei de Ampère (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Figura 8 - Uso da Lei de Ampère na determinação do campo magnético



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, 2016

Na figura é mostrado a seção reta de três fios percorridos por correntes perpendiculares ao plano do papel (o x indica que a corrente está entrando no papel, enquanto o ponto indica que a corrente está saindo do papel) i_1 , i_2 e i_3 , e uma amperiana, no sentido anti-horário (o sentido da amperiana determina o sentido da integração), cerca duas dessas correntes. Utilizando-se das propriedades do produto escalar, e observando que somente as correntes i_1 e i_2 estão enlaçadas pela amperiana chegamos a uma expressão para esse exemplo:

$$\oint B \cos \theta ds = \mu_0 (i_1 - i_2) \quad (8).$$

2.3.1. Campo magnético ao Redor de um Fio Retilíneo Longo

Envolvendo um fio retilíneo longo em uma amperiana circular e concêntrica de raio r , tanto $\vec{B}$ quanto $\vec{ds}$ serão tangentes a amperiana e paralelos entre si. Dessa forma, o produto escalar entre eles resultará em seus respectivos módulos, e como o módulo de $\vec{ds}$ é o comprimento da curva fechada, $2\pi r$, a equação 8 se torna:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (9).$$

Que expressa o campo magnético para o fio longo retilíneo (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

2.3.2 Campo Magnético De Um Solenoide

Um solenoide é um dispositivo condutor composto por diversas espiras uniformemente espaçadas, e alinhadas sobre um mesmo eixo, é dito ideal quando o seu comprimento é infinito e as espiras que o compõe são bem próximas, nesse tipo de distribuição o campo magnético fora do solenoide é zero. Para calcular o campo magnético produzido pelo solenoide aplicamos a amperiana da forma que está vista na figura 9. Devemos aplicar a lei de Ampère aos quatro percursos da amperiana e integrá-los, nos percursos bc e da $\vec{B}$ e $\vec{ds}$ são perpendiculares, logo a integral será nula devido ao produto escalar, o percurso cd também resultará em zero, pois $\vec{B}=0$ fora do solenoide. Dessa forma, $\oint \vec{B} \cdot \vec{ds}$ só não será zero no percurso ab , no qual seu valor será Bh . Já a corrente envolvida pela amperiana, considerando n o número de espiras por unidade de comprimento, será a corrente total vezes o número de espiras inh . Logo, pela lei de Ampère:

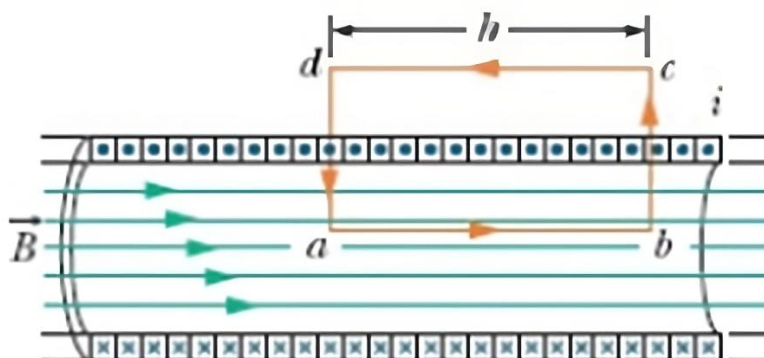
$$Bh = \mu_0 inh \quad (10).$$

Rearranjando a Eq.10 obtemos o campo magnético para o solenoide:

$$B = \mu_0 in \quad (11).$$

Que representa o campo magnético gerado por um solenoide ideal (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Figura 9 - Aplicação da Lei de Ampère para campo magnético gerado por solenoide



Fonte: Halliday; Resnick; Walker, 2016

3. METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi dividida em duas etapas distintas. A primeira etapa consistiu em uma pesquisa bibliográfica extensiva, na qual foram estudados os conceitos e teorias relevantes do eletromagnetismo, com foco nos campos magnéticos. Para isso, fez-se a consulta de livros de autores renomados na área de física, sendo eles a 10ª edição de "Fundamentos de Física: Eletromagnetismo" de Halliday e Resnick, a 12ª edição de "Física III: Eletromagnetismo" dos autores Young & Freedman, a 5ª edição de "Elementos do Eletromagnetismo" de M. N. O. Sadiku, e, por fim, a 7ª edição de "Máquinas Elétricas" de Fitzgerald e Kingsley. Além dos livros citados, também se fez a consulta de sites e artigos pertinentes ao tema abordado. Esta fase teve como objetivo principal compreender e consolidar os fundamentos teóricos relacionados ao funcionamento do eletromagnetismo.

A segunda etapa envolveu a realização de dois experimentos sobre a determinação do campo magnético da Terra, sendo estes realizados na central de Laboratórios I da UFERSA em Caraúbas/RN. O primeiro utilizou um solenoide, e o segundo utilizou a bobina de Helmholtz. O objetivo desta etapa era obter resultados do campo magnético para cada um dos equipamentos, a fim de que pudessem ser comparados, dessa forma verificando experimentalmente se a bobina de Helmholtz produziria resultados tão bons quanto o solenoide. Além disso permitiu observar na prática os conceitos aprendidos durante a revisão bibliográfica.

3.1. Materiais Utilizados

- Bobina de Helmholtz (25 espiras cada bobina);
- Solenoide (51 espiras);
- 5 resistores de 330Ω ;
- Fonte de Alimentação DC;
- Placa protoboard;
- Suporte de isopor;
- Fios de conexão;
- Bússola;

3.2. Montagem Do Aparato Experimental – Bobina De Helmholtz

A preparação do aparato experimental referente ao primeiro experimento buscou uma montagem que resultasse na maior uniformidade possível para o campo magnético dentro da bobina de Helmholtz. Para isso, era necessário que a bússola ficasse nivelada e no centro do equipamento. Foi utilizado um suporte improvisado de isopor entre as bobinas para servir de base à bússola. Como a estrutura de plástico que compõe a bobina de Helmholtz possui uma altura de separação de 4cm, e a bússola possui uma altura de 1cm, a altura adequada do suporte foi de 1,5cm. Quanto à largura do suporte, foi necessário apenas o mínimo para se apoiar entre as duas bobinas, que no caso da bobina de Helmholtz é também o seu raio, neste caso 4,25cm, uma vez que a bobina de Helmholtz utilizada possuía diâmetro de 8,5cm. Para verificar o nivelamento do suporte, foi utilizado um nível, instrumento comum usado para medir inclinações em áreas planas. Como o suporte não estava totalmente nivelado, colocou-se um pedaço de papel até atingir um nível razoável. A figura 10 a seguir ilustra o suporte de isopor e o nível utilizado nesta preparação inicial.

Figura 10 - Processo de centralização da bússola



Fonte: Autoria própria, 2024

Outro fator importante durante a preparação do experimento foi posicionar a bússola dentro da bobina de Helmholtz de forma que sua agulha esteja perpendicular ao campo gerado pela bobina. Isso permite uma análise posterior dos resultados por meio das relações de um

triângulo retângulo. Feito as preparações necessárias para garantir que a bússola estivesse centralizada na bobina de Helmholtz foi possível fazer o restante das conexões. Foi ligado o terminal positivo da fonte de alimentação em série com um conjunto de 5 resistores de 330Ω , utilizados para limitar a corrente no circuito e conectados em paralelo na sua montagem na placa protoboard. Em série com os resistores, foi conectado um multímetro na função de amperímetro para fazer a medição da corrente no circuito. Por fim, a bobina de Helmholtz foi conectada em série ao multímetro e o circuito foi fechado conectando o terminal de saída da bobina ao terminal negativo da fonte. O circuito resultante montado com a bobina de Helmholtz pode ser visto a seguir na figura 11:

Figura 11 - Circuito montado para bobina de Helmholtz



Fonte: Autoria própria, 2024

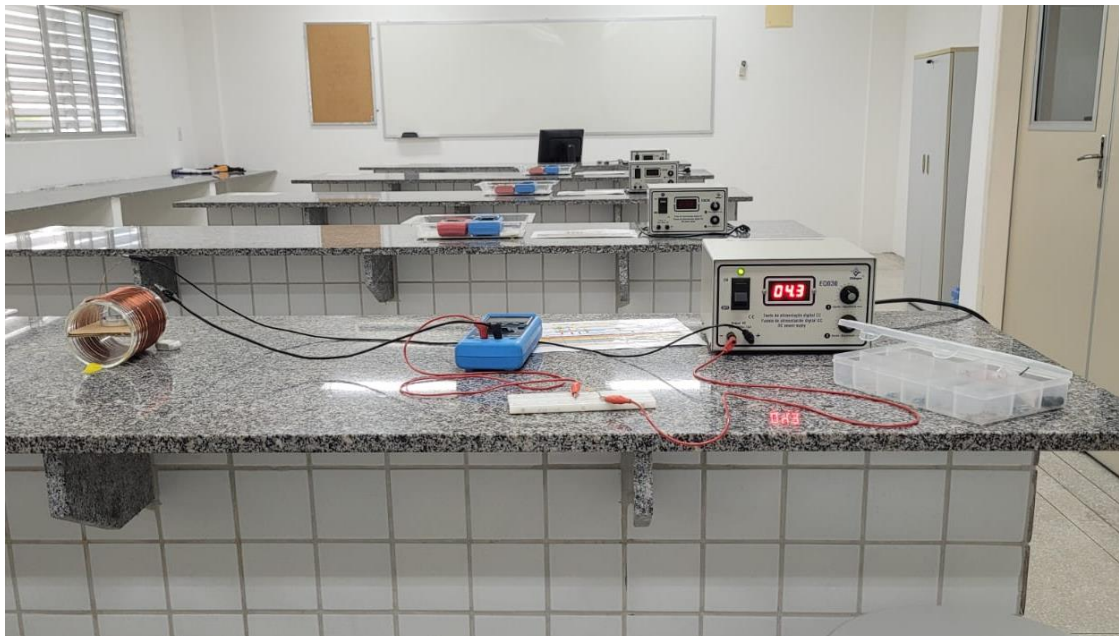
3.3. Procedimento Experimental – Bobina De Helmholtz

Com o circuito já configurado, deu-se início ao procedimento experimental. Nesta etapa, variou-se a tensão da fonte de alimentação para obter as correntes necessárias a fim de defletir o ponteiro da bússola em ângulos fixos de 5° a 50° com intervalos de 5° , anotando os valores de corrente lidos pelo amperímetro. Este procedimento foi repetido 3 vezes para se obter um valor médio das correntes para os ângulos, os quais foram utilizados para realizar os cálculos de campo magnético posteriormente analisados na seção 4.

3.4. Montagem Do Aparato Experimental – Solenoide

A montagem do aparato experimental para o segundo experimento também visou alcançar a maior uniformidade possível para o campo magnético dentro do solenoide. Utilizou-se um dos solenoides já empregados na prática 'Campo Magnético da Terra' do Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA campus Caraúbas/RN que possuem densidade de espira de 455,35e/m. Como este já possuía uma estrutura de suporte em seu centro para acomodar a bússola, foi necessário apenas posicionar a bússola no centro do solenoide, formando um ângulo de 90° entre seu ponteiro norte e o campo a ser gerado pelo solenoide. As demais conexões seguiram a mesma estrutura utilizada no experimento com a bobina de Helmholtz, conectando o terminal positivo da fonte em série com 5 resistores de 330Ω, ligados em paralelo na placa de protoboard. Em série aos resistores, foi conectado um multímetro na função de amperímetro para medir a corrente no circuito. Por fim, o solenoide foi conectado em série ao multímetro, e o circuito foi fechado, ligando o terminal de saída do solenoide ao terminal negativo da fonte. O circuito resultante montado com a bobina de Helmholtz pode ser visto na figura 12 a seguir.

Figura 12 - Circuito montado para o Solenoide



Fonte: Autoria Própria, 2024

3.5. Procedimento Experimental - Solenoide

Com o circuito devidamente configurado e preparado para os testes, deu-se início ao procedimento experimental. Nesta fase do experimento, procedeu-se com a variação da tensão da fonte de alimentação, com o objetivo de gerar as correntes elétricas necessárias para provocar a deflexão do ponteiro da bússola. Essa deflexão foi cuidadosamente monitorada, e os ângulos observados variaram de 5° a 50° , sendo que essa faixa foi dividida em intervalos de 5° . Para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados, este procedimento foi repetido três vezes. Essa repetição permitiu calcular um valor médio das correntes correspondentes a cada um dos ângulos testados. Os valores médios obtidos foram, então, utilizados nas análises de campo magnético que foram realizadas posteriormente. Os resultados dessas análises estão apresentados na seção 4 deste estudo, onde discutimos detalhadamente as implicações dos dados coletados e suas correlações com as teorias estabelecidas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Campo Magnético No Local Do Experimento

O campo magnético é uma grandeza física que pode variar significativamente de um local para outro. Considerando essa variação, é fundamental ter conhecimento do campo magnético no local onde se pretende realizar experimentos, como, por exemplo, na determinação do campo magnético da Terra. Essa determinação pode ser feita utilizando dispositivos como a bobina de Helmholtz ou solenoides, que servem como instrumentos de medição. Compreender o campo magnético local é essencial, pois esses dados serão utilizados como referência para a interpretação e análise dos resultados obtidos durante os experimentos.

Para o presente trabalho, foram utilizados os dados disponíveis no site da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), uma agência do governo dos Estados Unidos que se dedica ao monitoramento de diversos aspectos geográficos e climáticos. A NOAA realiza o cálculo do campo magnético em diferentes locais ao redor do mundo, utilizando informações de latitude, longitude e altura em relação ao nível do mar. Esses cálculos são baseados no *World Magnetic Model* (WMM), que é o modelo padrão adotado por sistemas que dependem do campo magnético terrestre para suas operações.

O site da NOAA fornece informações detalhadas sobre o campo magnético terrestre em uma determinada localização, a partir dos dados geográficos mencionados, que incluem latitude, longitude e elevação em relação ao nível do mar. Para a obtenção desses dados geográficos, recorreu-se ao Google Earth, um serviço desenvolvido pelo Google que oferece um mapeamento tridimensional do globo terrestre, permitindo uma visualização clara e precisa das características geográficas.

Os dados obtidos do Google Earth para a Central de Laboratórios I da UFERSA-Caraúbas em março de 2024 foram os seguintes: latitude de 5°46'31"S, longitude de 37°34'08"W e uma elevação em relação ao nível do mar de 164 metros. Esses dados foram fundamentais para o cálculo e a análise do campo magnético na região. A figura 13 apresenta uma visão da interface do Google Earth, com os dados indicados em destaque, proporcionando uma melhor compreensão da localização e das características geográficas relevantes para o experimento.

Figura 13 – Interface do Google Earth com dados geográficos usados



Fonte: Adaptado do Google Earth, 2024

Com os dados geográficos obtidos, foi possível aplicá-los no site da NOAA, o que resultou em uma tabela com diversos resultados referentes ao magnetismo no local (Figura 14), como a declinação magnética, a inclinação, os valores das componentes horizontal e vertical do campo magnético terrestre e, o principal para este estudo, a intensidade do campo magnético da Terra no local, com valor de $B=26,307\mu\text{T}$. O valor médio da variação entre esses dados de um ano para o outro também é apresentado, além da incerteza dos valores apresentados, que é extremamente baixa e pode ser desprezada.

Figura 14 - Dados do magnetismo do local

Magnetic Field							
Model Used: WMM-2020							
Latitude: 5° S							
Longitude: 37° W							
Elevation: 164.0 m Mean Sea Level							
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2024-04-06	-20.6876°	-25.4752°	23,807.2 nT	22,272.1 nT	-8,410.4 nT	-11,342.8 nT	26,371.2 nT
Change/year	0.0935°/yr	-0.4441°/yr	-65.2 nT/yr	-47.3 nT/yr	59.4 nT/yr	-195.3 nT/yr	25.2 nT/yr
Uncertainty	0.35°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

Fonte: Adaptado da National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024

4.2. Resultados Para O Solenoide

Os valores obtidos nas três medições de corrente para ângulos fixos do procedimento experimental realizado com o solenoide foram dispostos na tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Dados da prática com o solenoide

	1ª medição	2ª medição	3ª medição
Θ°	I (mA)	I (mA)	I (mA)
5	4,11	4,49	4,33
10	8,01	9,02	8,56
15	12,88	13,83	13,16
20	17,69	18,55	18,09
25	22,59	23,80	23,05
30	26,91	28,79	28,09
35	33,84	35,02	34,16
40	39,95	42,14	40,58

45	65,87	69,15	67,53
50	80,11	83,77	82,24

Fonte: Autoria própria, 2024

Para uma melhor análise, também foi feito a média dos valores das correntes para cada ângulo, resultando na Tabela 2:

Tabela 2 – Corrente média por ângulo (solenóide)

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
I(mA)	4,31	8,53	13,21	18,11	23,12	27,93	34,34	40,89	67,55	82,04

Fonte: Autoria própria, 2024

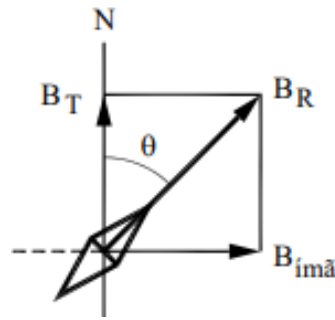
Com esses valores de corrente foi possível calcular o campo magnético gerado pelo solenoide a partir da Eq. 11. Os resultados estão dispostos na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Campo magnético do solenoide

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
B_S (μT)	2,466	4,864	7,559	10,363	13,229	15,982	19,645	23,397	38,653	46,944

Fonte: Autoria própria, 2024

Com os valores do campo gerado pelo solenoide, foi possível realizar o cálculo do campo magnético da terra no local. Para isso, é necessário entender que a bússola estava com sua agulha apontada para a direção norte graças a componente horizontal do campo magnético da Terra. Por sua vez, o solenoide gerou um campo magnético perpendicular a agulha da bússola devido ao posicionamento da bússola no interior do equipamento, dessa forma a direção resultante do ponteiro da bússola pode ser interpretado como a soma vetorial dos vetores campo magnético da Terra e campo magnético gerado pelo solenoide, como ilustrado na figura 15, onde o $B_{imã}$ representa o campo do solenoide.

Figura 15 - Relação entre o campo magnético da Terra e do solenoide

Fonte: IFSC/USP, 2022

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{B_S}{B_T} \quad (12).$$

Rearranjando a Eq. 12 obtemos o valor do campo magnético da Terra em função do campo magnético gerado pelo solenoide:

$$B_T = \frac{B_S}{\operatorname{tg} \theta} \quad (13).$$

A utilização da Eq. 13 para os valores do campo magnético gerado pelo solenoide resultou em uma série de valores para o campo magnético da Terra representados na tabela 4. A explicação para as duas últimas colunas estarem destacadas em vermelho será dada mais adiante.

Tabela 4 – Campo magnético da Terra (solenóide)

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
B_T (μT)	28,189	27,585	28,210	28,472	28,369	27,681	28,062	27,883	38,652	39,390

Fonte: Autoria própria, 2024

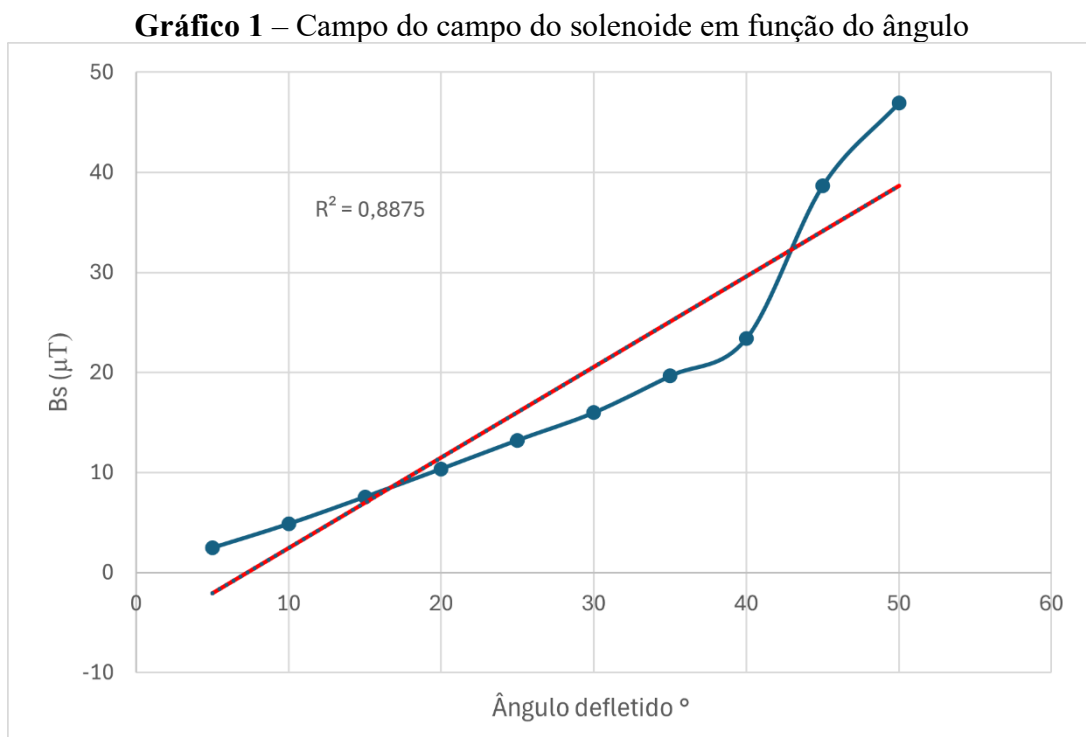
Calculando a média para o campo magnético B_T obteve-se um valor de $30,249\mu\text{T}$. Aplicando os resultados obtidos anteriormente na equação do erro tem-se:

$$e = \left| 1 - \frac{26,371 \times 10^{-6}}{30,249 \times 10^{-6}} \right| \cdot 100\%$$

$$e = 12,82\%$$

O erro percentual apresentado de 12,82% em relação ao campo de referência pode ser considerado baixo, levando em conta as condições ao qual o experimento está exposto. Diversos fatores podem ter influenciado negativamente a qualidade do resultado, como a qualidade da fonte de alimentação, da placa protoboard, bem como de possíveis interferências eletromagnéticas no local do experimento.

Complementar à análise de erro, também foi feita uma simples análise gráfica dos dados de intensidade de campo magnético para o solenoide e seus ângulos respectivos. Para tanto se fez uma plotagem dos dados da tabela 3 resultando no gráfico 1. O parâmetro que se buscou calcular foi o coeficiente de determinação também conhecido como R^2 , este parâmetro indica proporcionalmente a relação de variância entre as variáveis dependente e independente, podendo variar entre 0 e 1. Quanto mais próximo o R^2 for de 1 melhor será a relação entre as variáveis e a qualidade do modelo adotado, enquanto, quanto mais próximo de 0 pior será a qualidade do modelo em relação aos dados (Data Science Team, 2020).



Fonte: Autoria própria, 2024

A linha azul representa a relação do campo magnético gerado pelo solenoide em função do ângulo defletido da bússola, já a reta vermelha representa a linha de tendência para o que se esperava de uma relação linear. Observou-se então, a partir de uma análise do gráfico, uma boa

relação entre os dados, isso fica evidente ao observar o R^2 com valor de 0,8875 demonstrando assim uma boa qualidade do modelo adotado. Entretanto, ao observar a linha azul é perceptível a variação acentuada na sua inclinação em função dos últimos dois valores em relação aos demais, esse tipo de variação brusca não é desejado nesse caso, pois influencia negativamente a linearidade entre os dados, e o valor médio final do campo magnético da Terra obtido com o solenoide. As duas últimas colunas da tabela 4 foram destacadas em vermelho indicando que os valores obtidos fugiram do resultado estimado.

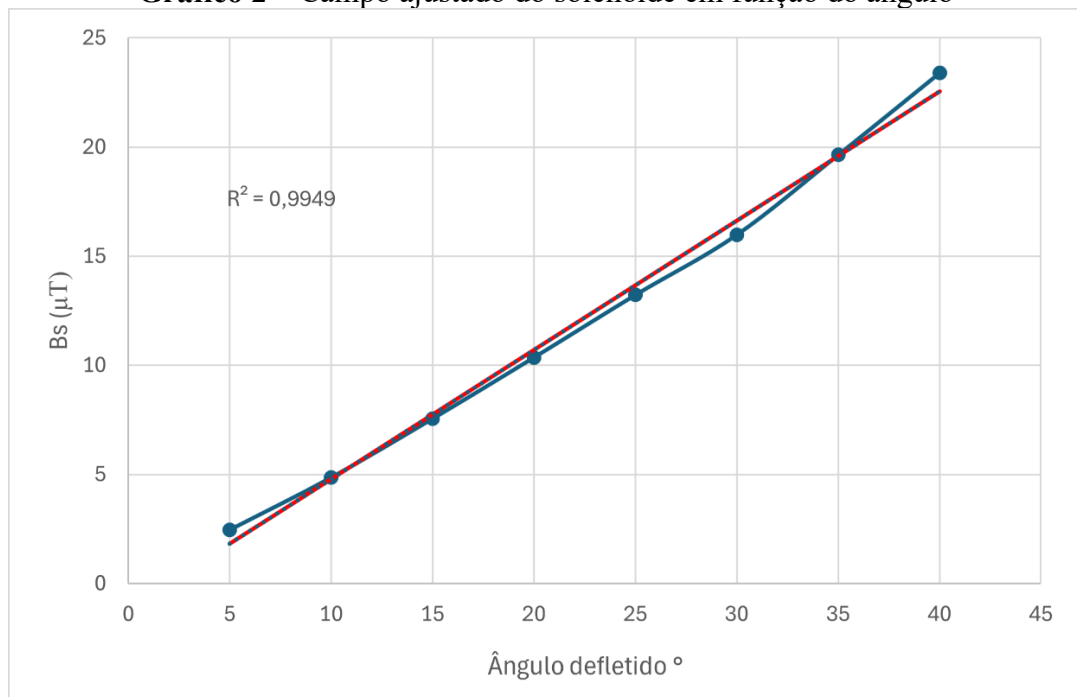
Os dois últimos valores medidos apresentaram uma divergência acima de 38% na intensidade do campo magnético em relação aos anteriores, valor muito acima do esperado para esse tipo de experimento. Dessa forma, para uma melhor análise, retirou-se os valores medidos das duas últimas colunas da tabela 3 dos cálculos realizados. Consequentemente houve mudança no valor médio do campo magnético da Terra que passou a ser de $28,056\mu\text{T}$. Para esse ajuste, o erro percentual passou a ser de:

$$e = \left| 1 - \frac{26,371 \times 10^{-6}}{28,056 \times 10^{-6}} \right| \cdot 100\%$$

$$e = 6\%$$

O erro obtido com o ajuste dos dados foi aproximadamente metade do erro sem o ajuste. Isso evidencia que os dados retirados não se adequaram conforme o esperado e tiveram, de uma maneira negativa, impacto significativo no erro.

O gráfico 2 foi elaborado também usando os dados ajustados. O desvio entre as linhas diminuiu significativamente indicando uma maior confiança nos dados. O R^2 ajustado foi de 0,9949 valor muito próximo de 1, mostrando assim uma excelente adequação do modelo, o que corrobora com a diminuição do erro apresentado. O novo valor do erro, assim como do R^2 após o ajuste foram muito bons para o caso do solenoide, conforme esperado, uma vez que essa maneira de medir o campo magnético da Terra já é a forma padrão utilizada no Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da UFERSA em Caraúbas/RN.

Gráfico 2 – Campo ajustado do solenoide em função do ângulo

Fonte: Autoria própria

4.3 Resultados Para a Bobina de Helmholtz

Os resultados das três medições de corrente para ângulos fixos do procedimento experimental realizado com a bobina de Helmholtz foram dispostos na tabela 5 a seguir:

Tabela 5 - Dados da prática com a bobina de Helmholtz

	1ª medição	2ª medição	3ª medição
Θ°	I (mA)	I (mA)	I (mA)
5	3,94	4,15	4,27
10	8,22	8,51	8,50
15	12,55	12,43	12,73
20	17,01	17,30	17,23
25	22,01	22,51	22,14
30	26,95	28,01	27,21

35	33,01	32,88	33,35
40	39,70	41,16	39,62
45	46,70	47,98	47,58
50	54,72	56,65	56,39

Fonte: Autoria própria, 2024

Para uma simplificação da análise, foi feito a média dos valores das correntes para cada ângulo, resultando na Tabela 6:

Tabela 6 – Corrente média por ângulo (bobina de Helmholtz)

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
I(mA)	4,12	8,41	12,57	17,18	22,22	27,39	33,08	40,16	47,42	55,92

Fonte: Autoria própria, 2024

A aplicação dos valores médios de corrente na Eq. 6 resultou em uma série de valores para o campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz. A tabela 7 ilustra esses campos dados em microteslas (μT) em função dos ângulos:

Tabela 7 – Campo magnético da bobina de Helmholtz

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
B_H (μT)	2,179	4,448	6,649	9,092	11,753	14,487	17,497	21,242	25,082	29,578

Fonte: Autoria própria, 2024

É importante ressaltar que a determinação do campo magnético da Terra usando a bobina de Helmholtz seguiu o mesmo arcabouço matemático utilizado para o solenoide. Assim, utilização da Eq. 13 também é válida para a bobina de Helmholtz, precisando apenas substituir as partes referentes ao campo do solenoide para os valores do campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz, o que resulta em uma série de valores para o campo magnético da Terra representados na tabela 8:

Tabela 8 – Campo magnético da Terra (bobina de Helmholtz)

Θ°	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
B_T (μT)	24,906	25,226	24,814	24,980	25,204	25,092	24,988	25,315	25,082	24,819

Fonte: Autoria própria, 2024

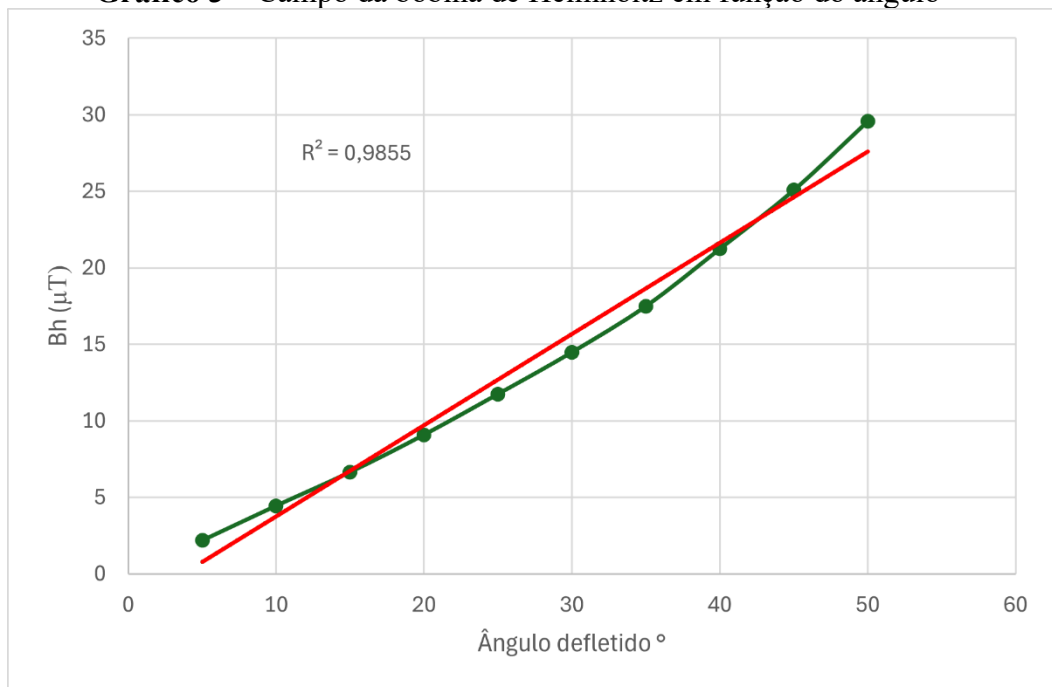
Calculando a média para B_T obteve-se um valor de $25,043\mu\text{T}$. Aplicando o resultado obtido anteriormente na equação do erro tem-se:

$$e = \left| 1 - \frac{26,371 \times 10^{-6}}{25,043 \times 10^{-6}} \right| \cdot 100\%$$

$$e = 5,3\%$$

Também foi feita uma simples análise gráfica dos dados de intensidade de campo magnético para bobina de Helmholtz e seus ângulos respectivos. Para tanto os dados da tabela 7 foram plotados resultando no gráfico 3.

Gráfico 3 – Campo da bobina de Helmholtz em função do ângulo



Fonte: Autoria própria

A linha verde representa a relação do campo magnético gerado pela bobina de Helmholtz em função do ângulo defletido da bússola, enquanto a vermelha é a linha de referência para uma relação linear. Observou-se, a partir de uma análise do gráfico, uma boa relação entre os dados, isso fica evidente ao observar o R^2 com valor de 0,9855 demonstrando assim uma ótima qualidade do modelo adotado.

Dessa forma, com base no resultado obtido, onde o campo magnético calculado com a bobina de Helmholtz apresentou um erro de apenas 5,3%, em relação ao campo de referência, e um R^2 com valor de 0,9855, podemos fazer algumas considerações importantes. Esse nível de precisão indica que a bobina de Helmholtz é uma ferramenta confiável e eficaz para medições de campo magnético em ambientes laboratoriais.

O fato de o erro percentual ser tão reduzido sugere que a bobina de Helmholtz consegue fornecer um campo magnético bastante uniforme, o que é fundamental para experimentos que exigem alta precisão. Essa uniformidade é uma das características que torna a bobina de Helmholtz uma boa escolha para a criação de campos magnéticos controlados, especialmente quando se busca investigar fenômenos eletromagnéticos ou realizar medições com sensibilidade.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a eficácia da bobina de Helmholtz como um equipamento adequado para a medição do campo magnético da Terra, além de validar o uso do solenoide para esse experimento. Inicialmente, o solenoide apresentou um erro percentual em relação ao campo magnético de referência de 12,82%, com um coeficiente de determinação R^2 de 0,8875, valores considerados aceitáveis para esse tipo de experimento. Após ajustes, que incluíram a exclusão dos dois últimos valores medidos, o erro percentual foi reduzido para 6%, indicando uma melhoria significativa. Simultaneamente, o R^2 aumentou para 0,9949, alcançando um excelente resultado.

Os dados obtidos com a bobina de Helmholtz confirmaram a viabilidade desse dispositivo, apresentando um erro percentual de 5,3% em relação ao campo magnético da Terra, valor ligeiramente inferior ao do solenoide, e um R^2 de 0,9855. Esses resultados evidenciam que a bobina de Helmholtz se configura como uma alternativa prática e eficiente aos solenoides nesse tipo de experimento.

Ademais, é fundamental reconhecer que a diversidade de métodos e dispositivos experimentais em Física, como a bobina de Helmholtz e os solenoides, amplia as possibilidades de abordagem e compreensão dos fenômenos estudados. Alternativas práticas enriquecem o aprendizado, permitindo que os alunos se familiarizem com diferentes tecnologias e enfoques, o que contribui para uma formação mais completa.

Essas variadas possibilidades não apenas facilitam a aprendizagem, mas também incentivam a curiosidade científica e a investigação. O incentivo à experimentação e à comparação de diferentes métodos pode levar a pensamentos inovadores e a uma melhor compreensão dos princípios físicos subjacentes. Portanto, a introdução de alternativas no ensino de Física não é apenas uma estratégia pedagógica, mas uma porta aberta para o desenvolvimento do pensamento crítico e da criatividade nos estudantes.

6. REFERÊNCIAS

CHAIB, J. P. M. C.; ASSIS, A. K. T. Experiência de Oersted em sala de aula. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 41–51, 2007.

DATA SCIENCE TEAM. **Definição de R-Quadrado**. [S. l.], 6 mar. 2020. Disponível em: <https://datascience.eu/pt/matematica-e-estatistica/definicao-de-r-quadrado/>. Acesso em: 21 set. 2024.

ELETRICIDADE-MAGNETISMO. **Eletroímãs**: Como funciona, aplicação e vantagens. [S. l.], [2024?]. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/eletroimas/>. Acesso em: 26 set. 2024.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. V3.

HELERBROCK, Rafael. "Campo magnético"; **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/campo-magnetico.htm>. Acesso em 24 de outubro de 2023.

HELERBROCK, Rafael. "O que é força magnética?"; **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-forca-magnetica.htm>. Acesso em 24 de outubro de 2023.

HOSTI, B. P. Como ocorrem as auroras boreais?. **Espaço-Tempo**, 2024. Disponível em: <https://www.espacotempo.com.br/como-ocorrem-as-auroras-boreais>. Acesso em: 29 ago. 2024.

MAGALHÃES, M. DE F.; SANTOS, W. M. S.; DIAS, P. M. C. Uma Proposta para Ensinar os Conceitos de Campo Elétrico e Magnético: uma Aplicação da História da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 4, p. 489–496, 2002.

PLANAS, Oriol. **Eletroímãs**: o que são, tipos, funcionamento e exemplos. [S. l.], 14 set. 2021. Disponível em: <https://pt.energia-nuclear.net/energia/energia-eletrica/exemplos/eletroimas>. Acesso em: 17 set. 2024.

SADIKU, Matthew. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SILVESTRIN, Pablo Enrique Jurado. **A Bobina de Helmholtz**. [S. l.], 1 out. 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/amlef/2020/10/01/a-bobina-de-helmholtz/>. Acesso em: 3 out. 2024.

BASSALO, J.M.F. A Crônica da Física do Estado Sólido: IV. Magnetismo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 16, n. 4, 1994.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**: de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **Física III: Eletromagnetismo**. 12. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.