



UFRPE

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

ADRIELSON DE ARAÚJO DIAS

Desenvolvimento de um sistema eletrônico de magnetometria de efeitos oscilantes
aplicada a materiais magnetoativos

Cabo de Santo Agostinho – PE

2025

ADRIELSON DE ARAÚJO DIAS

Desenvolvimento de um sistema eletrônico de magnetometria de efeitos oscilantes aplicada a materiais magnetoativos

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior

Cabo de Santo Agostinho – PE

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

D541d Dias, Adrielson de Araújo.
Desenvolvimento de um sistema eletrônico de magnetometria de efeitos oscilantes aplicada a materiais magnetoativos / Adrielson de Araújo Dias. – Cabo de Santo Agostinho, 2025.
62 f.; il.

Orientador(a): José Holanda da Silva Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Magnetometria. 2. Campos magnéticos . 3. Bobinas . 4. Materiais cerâmicos 5. BiFeO3. I. Júnior, José Holanda da Silva, orient. II. Título

CDD 621.3

ADRIELSON DE ARAÚJO DIAS

Desenvolvimento de um sistema eletrônico de magnetometria de efeitos oscilantes
aplicada a materiais magnetoativos

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da
Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de
Pernambuco para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovada em: 19/02/2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior
Orientador

Prof. Dr. Elias Marques Ferreira de Oliveira
Examinador

Prof. Dr. Sergio Vladimir Barreiro DeGiorgi
Examinador

À minha família e aos meus amigos, que me deram suporte diante das dificuldades da vida ao longo de toda a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por estar sempre perto de mim, mesmo quando eu estou nos meus dias de dúvida.

À minha mãe, Rosilda, que sempre me ajudou e auxiliou no que eu precisei sem medir esforços, ao meu pai, José (In memoriam), por todos os seus ensinamentos e conselhos.

Às minhas irmãs, Adriana e Alcione e ao meu irmão Adriano, por tudo que já fizeram e fazem por mim.

Ao meu cunhado, Josenildo, que tem sido como um pai para mim (como ele diz, meu menino).

À minha noiva Creuza, que nesses últimos anos esteve sempre comigo, me ajudando, auxiliando e incentivando no que fosse preciso.

Aos amigos que encontrei na graduação, que compartilhamos alegrias e sofrimentos, em especial a Romário, um dos primeiros amigos que fiz quando entrei na universidade, pelas longas conversas nos ônibus, trabalhos em grupo, parcerias e ideias loucas que ele sempre teve e eu sempre fui junto com ele. Também a André, um dos que esteve comigo até o fim.

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos comigo, tanto online como o prof. Grings (seus vídeos me auxiliaram muito no começo da graduação) como presencial, em especial ao prof. Fernando, que sempre nos auxiliou depois das aulas, tanto na sala dele como em aulas extras que ele fazia no período da tarde, para nos incentivar a não desistir da disciplina nem da universidade, e ao prof. Elias, que nunca deixou ninguém ir para casa com dúvidas, as conversas em sala de aula, projetos, além de todo o auxílio prestado fora da sala.

Por fim, ao meu orientador prof. José Holanda, que apareceu na universidade quando eu já estava desacreditado nela, pelos seus ensinamentos e conversas, tanto em sala de aula como no laboratório e fora dele, pelos conselhos, incentivos e todo o auxílio prestado.

"Se vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes."

(Sir Isaac Newton)

RESUMO

A análise de materiais magnetoativos, como o BiFeO_3 , exige técnicas experimentais avançadas para compreender suas propriedades sob a influência de campos magnéticos. Uma abordagem promissora é a magnetometria de efeitos oscilantes, que utiliza campos magnéticos modulados para excitar as amostras e analisar suas respostas. Técnicas clássicas empregam sistemas compostos por bobinas e eletroímãs, integrados a circuitos eletrônicos que geram sinais magnéticos precisos. Bobinas de Helmholtz, por exemplo, são amplamente utilizadas para produzir campos homogêneos, enquanto eletroímãs reforçam a intensidade do campo aplicado. Essas configurações têm sido exploradas em diversos estudos para investigar efeitos magnetoativos, magneto-ópticos e outras interações magnéticas. Neste trabalho, foi desenvolvido e validado um sistema eletrônico voltado à aplicação da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes. O sistema é composto por bobinas de Helmholtz calibradas para gerar campos homogêneos e eletroímãs alimentados por uma fonte DC para aumentar a intensidade dos campos. As bobinas foram projetadas e construídas com fio AWG 16 e carretéis personalizados, suportando correntes de até 3,7 A. Um gerador de funções foi integrado para modular o campo magnético, enquanto um osciloscópio monitorou as respostas experimentais das amostras posicionadas em um guia de onda central. A validação experimental foi realizada utilizando amostras de BiFeO_3 , submetidas a campos magnéticos oscilantes com formas de onda senoidais e pulsadas. Os dados coletados, incluindo variações de tensão e potência, foram processados em software especializado para análise quantitativa. Os resultados indicaram alterações significativas nas propriedades magnéticas das amostras, destacando o potencial do sistema para explorar novos efeitos magnetoativos. O desenvolvimento deste sistema representa um avanço significativo na aplicação da magnetometria de efeitos oscilantes, oferecendo uma plataforma robusta para estudos em materiais multiferroicos e suas aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: magnetometria; campos magnéticos oscilantes; bobinas de Helmholtz; materiais multiferroicos; BiFeO_3 .

ABSTRACT

The analysis of magnetoactive materials, such as BiFeO_3 , requires advanced experimental techniques to understand their properties under the influence of magnetic fields. Oscillating magnetic field magnetometry is a promising approach that uses modulated fields to excite samples and analyze their responses. Classical techniques employ systems composed of coils and electromagnets integrated with electronic circuits to generate precise magnetic signals. Helmholtz coils, for instance, are widely used to produce homogeneous fields, while electromagnets enhance the intensity of the applied field. These configurations have been explored in various studies to investigate magnetoactive, magneto-optical effects, and other magnetic interactions. In this work, an electronic system was developed and validated for the application of oscillating magnetic field magnetometry. The system consists of calibrated Helmholtz coils to generate homogeneous fields and electromagnets powered by a DC source to enhance field intensity. The coils were designed and built using AWG 16 wire and custom spools, supporting currents up to 3.7 A. A function generator was integrated to modulate the magnetic field, while an oscilloscope monitored the experimental responses of the samples placed in a central waveguide. Experimental validation was performed using BiFeO_3 samples subjected to oscillating magnetic fields with sinusoidal and pulsed waveforms. The collected data, including variations in voltage and power, were processed using specialized software for quantitative analysis. The results indicated significant changes in the magnetic properties of the samples, highlighting the potential of the system to explore new magnetoactive effects. The development of this system represents a significant advancement in the application of oscillating magnetic field magnetometry, providing a robust platform for studying multiferroic materials and their technological applications.

Keywords: magnetometry; oscillating magnetic fields; Helmholtz coils; multiferroic materials; BiFeO_3 .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da força de Lorentz sobre uma partícula carregada em movimento em um campo magnético.....	16
Figura 2: Magnetização M em função da intensidade de campo magnético H para materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.....	17
Figura 3: Campo magnético ao redor de um fio retilíneo percorrido por uma corrente elétrica, ilustrando as linhas de campo circulares.	20
Figura 4: Ilustração da Lei de Faraday, onde o movimento do ímã produz uma corrente elétrica na espira.	23
Figura 5: Aplicação da Lei de Lenz, mostrando um ímã se aproximando e gerando uma corrente	23
Figura 6: Curva de histerese de um material ferromagnético, com magnetização de saturação em S e magnetização de saturação oposta em S'	27
Figura 7: Representação da bobina de Helmholtz.	32
Figura 8: Bobina de Helmholtz de cano PVC.	43
Figura 9: Tarugo de nylon no torno mecânico.....	43
Figura 10: Bobina de Helmholtz com carretel de nylon. (a) distância R , (b) distância $2R$	44
Figura 16: Configuração da montagem da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes.	45
Figura 17: Campo magnético DC da bobina de Cano PVC.	47
Figura 18: Campo AC com diferentes formas de onda.	48
Figura 19: Campo magnético DC da bobina de nylon com distâncias diferentes.	49
Figura 20: Campo magnético DC da bobina para o sistema de magnetometria.	50
Figura 21: Campo AC com diferentes formas de onda para R	51
Figura 22: Campo AC com diferentes formas de onda para $2R$	51
Figura 23: Campo magnético AC da bobina para o sistema de magnetometria.	52
Figura 24: Campo magnético do eletroímã.	52
Figura 25: Pulso de 25ns em 0Oe.....	53
Figura 26: Pulso de 25ns em 180Oe.....	54
Figura 27: Pulso de 50ns e campo de 0Oe.	54
Figura 28: Pulso de 50ns e campo de 180Oe.	55

Figura 29: Pulso de 75ns e campo de 0Oe.	55
Figura 30: Pulso de 75ns e campo de 180Oe.	56
Figura 31: Pulso de 100ns e campo de 0Oe.	56
Figura 32: Pulso de 100ns e campo de 180Oe.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	CONCEITOS BÁSICOS DO MAGNETISMO.....	15
2.1.1	Definição e Grandezas do Campo Magnético	15
2.1.1.1	Relação entre Magnetização M e Suscetibilidade Magnética χ.....	17
2.1.1.2	Permeabilidade Magnética (μ)	18
2.1.2	Princípios do campo magnético.....	19
2.1.2.1	Lei de Biot-Savart.....	19
2.1.2.2	Lei de Ampère.....	20
2.1.3	Indução Eletromagnética: Lei de Faraday e Lei de Lenz.....	21
2.1.3.1	Lei de Faraday.....	22
2.1.3.2	Lei de Lenz.....	23
2.1.4	Materiais Magnéticos.....	24
2.1.4.1	Diamagnetismo.....	25
2.1.4.2	Paramagnetismo.....	25
2.1.4.3	Ferromagnetismo.....	25
2.1.4.4	Antiferromagnetismo.....	26
2.1.4.5	Ferrimagnetismo.....	26
2.1.4.6	Histerese Magnética.....	27
2.1.4.7	Materiais Multiferroicos.....	28
2.1.5	Propriedades Magnéticas Relevantes	29
2.1.5.1	Efeitos de Temperatura.....	29
2.1.5.2	Dinâmica Magnética.....	30
2.2	GERAÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS OSCILANTES	31
2.2.1	Bobinas de Helmholtz.....	31
2.2.1.1	Princípio de Funcionamento.....	31
2.2.1.2	Condições para Campo Homogêneo.....	32
2.2.1.3	Aplicações em Experimentação Científica.....	33
2.2.2	Uso de Eletroímãs para Reforço do Campo Magnético	34
2.2.2.1	Princípio de Funcionamento.....	34
2.2.2.2	Sincronização com Bobinas de Helmholtz.....	35
2.2.3	Geração de Formas de Onda no Campo Magnético	36
2.2.3.1	Geradores de Funções.....	36
2.2.3.2	Modulação do Campo Magnético.....	37

2.3	MAGNETOMETRIA.....	37
2.3.1	Magnetometria SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) .	37
2.3.2	Magnetometria VSM (Vibrating Sample Magnetometry)	38
2.3.3	Magnetometria de Efeito Hall	39
2.3.4	Magnetometria de Efeitos Oscilantes	39
2.3.5	Comparação entre as Técnicas de Magnetometria	40
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	41
3.1.1	Protótipo da bobina de Helmholtz.....	41
3.1.2	Bobina de Helmholtz de nylon	43
3.2	MONTAGEM DO SISTEMA	44
3.3	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	CAMPO MAGNÉTICO DAS BOBINAS DE HELMHOLTZ.....	46
4.1.1	Bobina de cano PVC (análise DC)	47
4.1.2	Bobina de cano PVC (análise AC).....	48
4.1.3	Bobina de nylon (análise DC).....	49
4.1.3.1	Bobina de nylon com bitola AWG 16.....	50
4.1.4	Bobina de nylon (análise AC)	50
4.1.4.1	Bobina de nylon com bitola AWG 16.....	51
4.2	CAMPO MAGNÉTICO DO ELETROÍMÃ.....	52
4.3	MAGNETOMETRIA DE EFEITOS OSCILANTES	53
5	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

O estudo e a aplicação de campos magnéticos oscilantes desempenham um papel fundamental em diversas áreas da ciência e da engenharia, abrangendo desde a caracterização de materiais até o desenvolvimento de novas tecnologias em sensores, telecomunicações e dispositivos médicos (Silva *et al*, 2023a). A geração controlada de campos magnéticos de alta precisão é essencial para investigações experimentais que buscam compreender fenômenos físicos complexos, como a interação entre campos magnéticos e materiais multifuncionais (Hildevær *et al*, 2024a). Nesse contexto, bobinas de Helmholtz são amplamente utilizadas para produzir campos magnéticos homogêneos, devido à sua capacidade de gerar campos magnéticos uniformes em uma região específica do espaço. Essa uniformidade é crucial para garantir a precisão e a repetibilidade dos experimentos, permitindo que os pesquisadores isolem e analisem os efeitos dos campos magnéticos sobre os materiais estudados (Robert, 2003).

Dentre os materiais que se destacam no estudo das interações magnetoelétricas, os multiferroicos têm atraído grande interesse devido às suas propriedades multifuncionais. O BiFeO_3 (BFO) é um dos mais promissores dentro dessa classe, pois apresenta ferromagnetismo e ferroeletricidade coexistentes à temperatura ambiente, além de efeitos como magnetostricção, efeito fotoelétrico e efeito Hall (Silva *et al*, 2023b). Essas características tornam o BFO um material versátil para aplicações em sensores magnéticos, dispositivos de memória e atuadores, além de potencial uso em telecomunicações e biotecnologia (Camejo, 2017).

Para investigar as propriedades magnetoelétricas do BFO, é necessário um sistema capaz de gerar campos magnéticos controláveis e bem caracterizados. As bobinas de Helmholtz desempenham um papel essencial nesse tipo de experimento, pois permitem a criação de um campo magnético homogêneo em uma região específica do espaço, sendo amplamente utilizadas em pesquisas de materiais magnetoativos (Silva *et al*, 2023c). Além disso, a modulação desses campos utilizando diferentes formas de onda – como senoidal, quadrada e pulsada – possibilita a análise detalhada da resposta dos materiais a estímulos magnéticos oscilantes.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um sistema eletrônico para aplicação da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes, utilizando bobinas de Helmholtz e eletroímãs para gerar campos magnéticos homogêneos e

oscilantes em amostras de materiais magnetoativos. Para isso, pretende-se projetar e implementar o sistema eletrônico para excitação de amostras por meio de campos magnéticos oscilantes, calibrar e integrar as bobinas de Helmholtz no sistema para gerar campos magnéticos homogêneos, e configurar eletroímãs para reforçar a intensidade dos campos gerados e sincronizar sua modulação com as bobinas. Além disso, serão analisados experimentalmente os efeitos do campo magnético oscilante sobre amostras do tipo BFO, utilizando a técnica de magnetometria de efeitos oscilantes, e os sinais coletados serão convertidos e analisados em termos de potência e tensão para avaliar os comportamentos da amostra sob diferentes condições experimentais.

A análise experimental incluirá a coleta e interpretação de dados sobre a resposta das amostras ao ser analisado pelo sistema de magnetometria de efeitos oscilantes. Os resultados obtidos serão comparados com estudos prévios, buscando não apenas validar a metodologia proposta, mas também contribuir para o avanço da pesquisa em materiais multifuncionais e no desenvolvimento de novas abordagens para a caracterização de fenômenos magnetoelétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo de materiais magnetoativos e suas interações com campos magnéticos tem sido um tema central em diversas áreas da ciência e engenharia, impulsionado pelo desenvolvimento de novos dispositivos baseados em propriedades magnéticas e magnetoelétricas. Para compreender e explorar esses fenômenos, é essencial utilizar técnicas experimentais capazes de gerar campos magnéticos controláveis e analisar suas interações com diferentes materiais (Hildever *et al*, 2024b, 2024c). Neste contexto, sistemas baseados em bobinas de Helmholtz são amplamente empregados para a criação de campos magnéticos homogêneos, proporcionando um ambiente controlado para a investigação das respostas magnéticas de materiais.

A presente seção tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento do sistema de magnetometria de efeitos oscilantes proposto. Para isso, serão abordados conceitos sobre geração e controle de campos magnéticos, funcionamento das bobinas de Helmholtz, princípios da

magnetometria, além das propriedades dos materiais multiferroicos, com foco no BiFeO_3 (BFO).

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DO MAGNETISMO

O magnetismo é um fenômeno físico que descreve a força de atração ou repulsão entre materiais, resultante do movimento de cargas elétricas ou da presença de dipolos magnéticos intrínsecos. Essas forças são mediadas por campos magnéticos, que desempenham um papel crucial em diversas aplicações tecnológicas, como motores elétricos, geradores e dispositivos de armazenamento de dados.

Os campos magnéticos são gerados por cargas elétricas em movimento, como correntes elétricas, ou por materiais magnéticos, como ímãs permanentes. Para compreender esses fenômenos, é necessário estudar as leis e princípios do magnetismo, como as Leis de Biot-Savart, Ampère, Faraday e Lenz. Além disso, é fundamental compreender as grandezas físicas que descrevem o comportamento dos campos magnéticos, como a indução magnética (\vec{B}), o campo magnético (H), a magnetização (\vec{M}) e a permeabilidade magnética (μ).

2.1.1 Definição e Grandezas do Campo Magnético

A indução magnética, denotada por \vec{B} , é uma grandeza vetorial que descreve a influência magnética exercida por cargas elétricas em movimento ou por materiais magnéticos. Ela é medida em tesla (T) no Sistema Internacional de Unidades (SI). A indução magnética \vec{B} é responsável por exercer forças sobre partículas carregadas em movimento, conforme a força de Lorentz (Lowrie, 2007):

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (1)$$

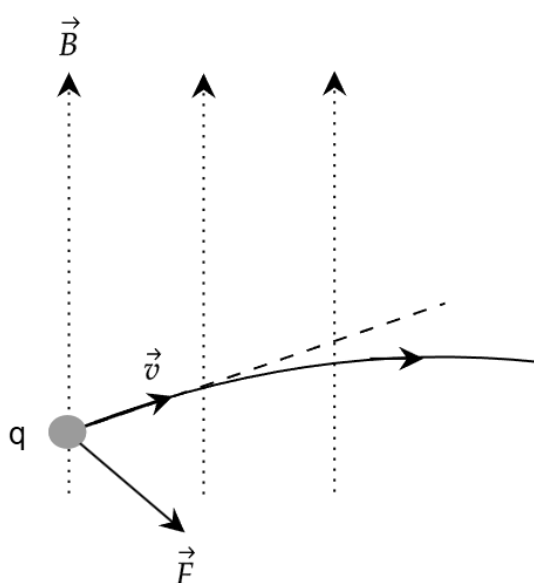
Onde:

- \vec{F} é a força resultante sobre a carga (em newtons),
- q é a carga elétrica da partícula (em coulombs),
- \vec{E} é o campo elétrico (em volts por metro),
- \vec{v} é a velocidade da partícula (em metros por segundo),

- \vec{B} é a indução magnética (em teslas),

O termo $\vec{v} \times \vec{B}$ representa o produto vetorial, indicando que a força magnética é sempre perpendicular ao plano formado por \vec{v} e \vec{B} . Essa relação é ilustrada Figura 1, que mostra a força de Lorentz atuando sobre uma partícula carregada em movimento dentro de um campo magnético. A figura destaca a orientação perpendicular da força magnética em relação à velocidade da partícula e ao campo magnético, reforçando a natureza vetorial da interação.

Figura 1: Representação da força de Lorentz sobre uma partícula carregada em movimento em um campo magnético.



Fonte: Lowrie, 2007.

Já o campo magnético, denotado por \vec{H} , é uma grandeza auxiliar que descreve a contribuição das correntes livres (não associadas à magnetização do material) para a geração do campo magnético. Ela é medida em ampere por metro (A/m). A relação entre a indução magnética \vec{B} e o campo magnético \vec{H} é expressa por:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

Onde:

- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, $4\pi \cdot 10^{-7}$, em H/m.
- \vec{M} é a magnetização do material, em A/m, ela será discutida na próxima seção.
- $\mu_0\vec{H}$ representa a contribuição do campo aplicado, enquanto $\mu_0\vec{M}$ representa a contribuição da magnetização do material.

2.1.1.1 Relação entre Magnetização (\vec{M}) e Suscetibilidade Magnética (χ)

A magnetização \vec{M} descreve o grau de alinhamento dos dipolos magnéticos em um material quando submetido a um campo magnético externo. Ela representa o momento magnético por unidade de volume e é expressa em ampere por metro (A/m). O momento magnético é uma grandeza vetorial que descreve a força e a orientação do magnetismo intrínseco de um material. Ele surge do movimento de cargas elétricas (como elétrons em órbitas atômicas) e do spin dos elétrons. Em materiais magnéticos, o momento magnético é a soma vetorial dos momentos magnéticos atômicos ou moleculares.

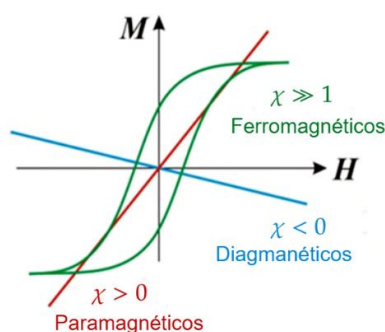
A suscetibilidade magnética χ é uma grandeza adimensional que quantifica a resposta de um material a um campo magnético aplicado. A relação entre a magnetização \vec{M} e a intensidade do campo magnético \vec{H} pode ser vista na Figura 2 e é dada por:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (3)$$

Os materiais podem ser classificados de acordo com sua suscetibilidade magnética:

- Diamagnéticos ($\chi < 0$): Possuem fraca magnetização no sentido oposto ao campo externo aplicado, como cobre e ouro.
- Paramagnéticos ($\chi > 0$): Magnetizam-se na mesma direção do campo externo, mas de forma fraca, como alumínio e platina.
- Ferromagnéticos ($\chi \gg 1$): Apresentam magnetização espontânea, mantendo o alinhamento mesmo após a remoção do campo externo, como ferro, níquel e cobalto.

Figura 2: Magnetização \vec{M} em função da intensidade de campo magnético \vec{H} para materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.



Fonte: CAMPOS JÚNIOR, 2014.

<https://btdt.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/540>

Além dos materiais ferromagnéticos, existem os materiais ferrimagnéticos, como os ferrites, que possuem estrutura interna semelhante ao ferromagnetismo, mas com uma suscetibilidade menor e dependente da temperatura.

2.1.1.2 Permeabilidade Magnética (μ)

A permeabilidade magnética μ indica a capacidade de um material se magnetizar quando submetido a um campo magnético externo. Ela é definida como a razão entre a indução magnética \vec{B} e o módulo do campo magnético H :

$$\mu = \frac{\vec{B}}{H} \quad (4)$$

A permeabilidade magnética de um material pode ser expressa em função da permeabilidade do vácuo μ_0 e da suscetibilidade magnética χ :

$$\mu = \mu_0(1 + \chi). \quad (5)$$

Materiais com alta permeabilidade magnética, como o ferro e ligas ferromagnéticas, são amplamente utilizados em núcleos de transformadores, indutores e motores elétricos, pois permitem a concentração das linhas de campo magnético, aumentando a eficiência desses dispositivos.

A permeabilidade pode ser expressa em:

- Permeabilidade relativa (μ_r): ela é uma grandeza adimensional, que é dada pela relação entre a permeabilidade do material e a permeabilidade do vácuo:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6)$$

- Permeabilidade absoluta (μ): que é dada pela equação geral (5).

Para materiais ferromagnéticos, a permeabilidade é fortemente dependente da história magnética do material, levando ao fenômeno da histerese magnética, que será vista mais adiante.

2.1.2 Princípios do campo magnético

Nesta seção, serão apresentadas a Lei de Biot-Savart e a Lei de Ampère, que descrevem a relação entre correntes elétricas e os campos magnéticos gerados por elas.

2.1.2.1 Lei de Biot-Savart

A Lei de Biot-Savart é uma das ferramentas mais importantes para calcular o campo magnético gerado por uma distribuição de correntes elétricas. Ela estabelece que a indução magnética \vec{B} em um ponto do espaço é proporcional à corrente I que flui através de um condutor e depende da geometria do condutor e da distância ao ponto de observação.

A expressão matemática da Lei de Biot-Savart é:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (7)$$

Onde:

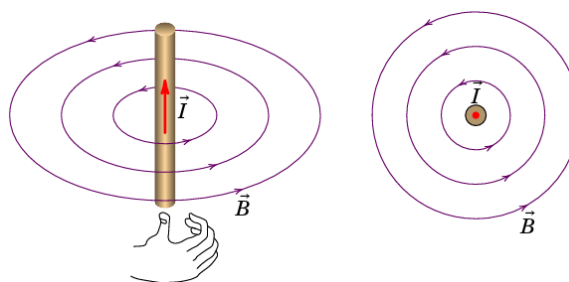
- \vec{B} é a indução magnética no ponto de observação (T),
- I é a corrente elétrica (A),
- $d\vec{l}$ é um elemento infinitesimal do condutor (m),
- \hat{r} é o vetor unitário que aponta do elemento de corrente para o ponto de observação,
- r é a distância entre o elemento de corrente e o ponto de observação (m).

Um exemplo clássico da aplicação da Lei de Biot-Savart é o cálculo do campo magnético gerado por um fio retilíneo infinito percorrido por uma corrente I . Nesse caso, o campo magnético a uma distância R do fio é dado por:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (8)$$

Na Figura 3 é mostrado as linhas de campo circulares em torno de um fio, onde o vetor campo magnético \vec{B} é sempre tangente à circunferência, esse resultado mostra que o campo magnético diminui com o inverso da distância ao fio.

Figura 3: Campo magnético ao redor de um fio retilíneo percorrido por uma corrente elétrica, ilustrando as linhas de campo circulares.



Fonte: Villate e Martelo, 2023.

https://villate.org/eletromagnetismo/calculo_do_campo_magnetico.html

Outra aplicação importante é o cálculo da indução magnética no centro de uma espira circular de raio R percorrida por uma corrente I . Nesse caso, o campo magnético no centro da espira é:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (9)$$

Esses exemplos ilustram a versatilidade da Lei de Biot-Savart na determinação de campos magnéticos gerados por diferentes configurações de corrente. Seja para um fio infinito, onde o campo magnético segue uma relação inversamente proporcional à distância, ou para uma espira circular, onde o campo é concentrado em seu centro, a aplicação dessa lei permite compreender e prever o comportamento do campo magnético em diversas situações. Além desses casos clássicos, a Lei de Biot-Savart pode ser estendida para geometrias mais complexas, como solenoides e toroides, sendo uma ferramenta fundamental na análise e no projeto de dispositivos eletromagnéticos.

2.1.2.2 Lei de Ampère

A Lei de Ampère é outra ferramenta fundamental para o estudo do magnetismo. Ela relaciona a circulação do campo magnético ao redor de um caminho fechado com a corrente elétrica total que atravessa a área delimitada por esse caminho. Em sua forma integral, a Lei de Ampère é expressa por:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{env} \quad (10)$$

Onde:

- \vec{B} é a indução magnética (T),
- $d\vec{l}$ é um elemento infinitesimal de um caminho fechado,
- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo,
- I_{env} é a corrente total envolvida pelo caminho de integração (A).

A Lei de Ampère é particularmente útil em situações com alta simetria, como no caso de um solenoide ou um toroide. Por exemplo, para um solenoide ideal (comprimento muito maior que o diâmetro), a indução magnética no interior é aproximadamente uniforme e dado por:

$$B = \mu_0 NI \quad (11)$$

Onde, N é o número de espiras por unidade de comprimento e I é a corrente que percorre o solenoide.

Outro exemplo é a indução magnética no interior de um toroide, que é dado por:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi R} \quad (12)$$

Onde N é o número total de espiras e R é o raio médio do toroide.

Esses exemplos destacam a importância da Lei de Ampère na determinação do campo magnético em sistemas altamente simétricos. Enquanto a Lei de Biot-Savart é aplicável a qualquer distribuição de corrente, a Lei de Ampère se mostra especialmente útil quando há simetrias que permitem simplificar a integral de circulação, tornando os cálculos mais diretos. No caso do solenoide, a uniformidade do campo magnético em seu interior é uma consequência direta dessa abordagem, garantindo sua ampla aplicação em eletroímãs e indutores. Da mesma forma, no toroide, a estrutura fechada confina o campo magnético, minimizando perdas e tornando-o essencial em transformadores e dispositivos eletromagnéticos.

2.1.3 Indução Eletromagnética: Lei de Faraday e Lei de Lenz

A indução eletromagnética é um dos pilares do eletromagnetismo, descrevendo como campos magnéticos variáveis no tempo podem gerar correntes elétricas em

circuitos. Esse fenômeno foi descoberto por Michael Faraday em 1831 e é a base para o funcionamento de muitos dispositivos modernos, como geradores, transformadores e motores elétricos. A indução eletromagnética é regida por duas leis importantes: a Lei de Faraday e a Lei de Lenz.

2.1.3.1 Lei de Faraday

A Lei de Faraday estabelece que a força eletromotriz (f.e.m.), que corresponde à tensão induzida em um circuito fechado, é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético através da área delimitada pelo circuito. Como ilustra a Figura 4, o movimento de um ímã em direção a uma espira condutora induz uma corrente elétrica devido à variação do fluxo magnético.

Matematicamente, a Lei de Faraday é expressa por:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (13)$$

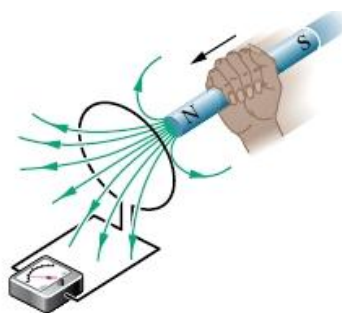
Onde:

- ε é a força eletromotriz induzida (em volts),
- Φ_B é o fluxo magnético (em webers), dado por $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$,

O fluxo magnético Φ_B representa a quantidade de campo magnético que atravessa uma superfície. Quando o fluxo magnético varia no tempo, seja devido a uma mudança no campo magnético, na área da superfície ou no ângulo entre o campo e a superfície, uma f.e.m. é induzida no circuito.

A variação do fluxo magnético cria um campo elétrico não conservativo, que impulsiona as cargas elétricas ao longo do circuito, gerando uma corrente induzida. Esse fenômeno é independente do meio material e ocorre mesmo no vácuo.

Figura 4: Ilustração da Lei de Faraday, onde o movimento do ímã produz uma corrente elétrica na espira.



Fonte: Halliday, Resnick, Walker, 2014.

2.1.3.2 Lei de Lenz

A Lei de Lenz complementa a Lei de Faraday, fornecendo a direção da corrente induzida. Ela afirma que a corrente induzida em um circuito tem uma direção tal que o campo magnético gerado por essa corrente se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu, como mostra a Figura 5. Isso é representado pelo sinal negativo na Lei de Faraday. Ela é uma manifestação do princípio de conservação de energia, pois se a corrente induzida não se opusesse à variação do fluxo magnético, ela criaria um campo magnético que aumentaria ainda mais o fluxo, resultando em uma corrente infinita e violando a conservação de energia (Halliday, Resnick, Walker, 2014).

Figura 5: Aplicação da Lei de Lenz, mostrando um ímã se aproximando e gerando uma corrente



Fonte: Halliday, Resnick, Walker, 2014.

Como exemplos práticos (Halliday, Resnick, Walker, 2014), pode ser citado os geradores elétricos, onde uma bobina gira em um campo magnético constante (ou vice-versa), variando o fluxo magnético através da bobina. Isso induz uma f.e.m. alternada, que pode ser usada para alimentar circuitos elétricos. Nos transformadores,

a corrente alternada em uma bobina primária cria um campo magnético variável, que induz uma f.e.m. em uma bobina secundária, isso permite a transferência de energia entre circuitos com diferentes tensões. E a indução em espiras, onde se um ímã é movido em direção a uma espira condutora, o fluxo magnético através da espira aumenta, induzindo uma corrente. Se o ímã é afastado, o fluxo diminui, e a corrente induzida tem direção oposta.

Esses exemplos demonstram como a Lei de Faraday, em conjunto com a Lei de Lenz, fundamenta o funcionamento de dispositivos que convertem energia mecânica em elétrica, como geradores e transformadores. A relação entre a variação do fluxo magnético e a corrente induzida é essencial para a operação desses sistemas, permitindo, por exemplo, a geração de eletricidade em usinas e a transmissão de energia elétrica em diferentes tensões. Além disso, essas leis são aplicadas em diversas tecnologias de medição e controle, como sensores de corrente e transformadores de corrente, que desempenham papéis cruciais na automação industrial e na eletrônica.

Esses princípios também são utilizados em sensores para medir campos magnéticos, correntes elétricas e movimento, como os sensores de corrente, que medem correntes elétricas sem contato físico, utilizando a f.e.m. induzida por um campo magnético variável

Assim, a indução eletromagnética não só é uma das bases do magnetismo, mas também uma das principais responsáveis pela revolução tecnológica nos campos da geração e distribuição de energia elétrica.

2.1.4 Materiais Magnéticos

Os materiais magnéticos são classificados de acordo com sua resposta a um campo magnético externo, que depende da organização dos momentos magnéticos atômicos ou moleculares no material. Essa resposta é quantificada pela suscetibilidade magnética (χ), que relaciona a magnetização (\vec{M}) do material com o campo magnético aplicado (\vec{H}), conforme a equação (3).

A classificação dos materiais magnéticos é feita com base no valor e no comportamento da suscetibilidade magnética, bem como na orientação dos

momentos magnéticos no material. Abaixo, são descritos os principais tipos de materiais magnéticos.

2.1.4.1 Diamagnetismo

Os materiais diamagnéticos possuem uma suscetibilidade magnética negativa ($\chi < 0$), o que significa que se magnetizam na direção oposta ao campo magnético aplicado. Essa resposta é fraca e ocorre devido à indução de correntes elétricas microscópicas (correntes de Lenz) no material, que geram um campo magnético oposto ao campo externo. Alguns elementos que apresentam esse comportamento são o ouro, cobre, prata e o bismuto.

Algumas das características deles são que a magnetização é fraca e temporária, ou seja, apenas apresentam magnetização quando exposto a um campo magnético externo, não possuem momentos magnéticos permanentes e a permeabilidade magnética é ligeiramente menor que a do vácuo ($\mu < \mu_0$).

2.1.4.2 Paramagnetismo

Os materiais paramagnéticos possuem uma suscetibilidade magnética positiva ($\chi > 0$), o que significa que se magnetizam na mesma direção do campo magnético aplicado. Essa resposta ocorre devido à presença de momentos magnéticos atômicos ou moleculares que se alinham com o campo externo, mas de forma fraca e desordenada. Como elementos, tem-se o alumínio, platina, e o sódio.

Entre as características podemos citar a magnetização que é fraca e proporcional ao campo aplicado, os momentos magnéticos são permanentes nesse tipo de material, porém estão desalinhados na ausência de um campo externo e a permeabilidade magnética é ligeiramente maior que a do vácuo ($\mu > \mu_0$).

2.1.4.3 Ferromagnetismo

Os materiais ferromagnéticos possuem uma suscetibilidade magnética muito alta ($\chi \gg 1$) e exibem magnetização espontânea, mesmo na ausência de um campo magnético externo. Isso ocorre devido ao alinhamento paralelo dos momentos

magnéticos atômicos, resultante de interações de troca entre os átomos. Como exemplos temos o níquel, ferro, cobalto e algumas ligas como o aço.

A principal característica desse tipo de material é a magnetização que é forte e permanente, a qual apresenta histerese magnética, ou seja, mantêm a magnetização mesmo após a remoção do campo externo. A permeabilidade magnética é muito maior que a do vácuo ($\mu \gg \mu_0$), além disso, esses tipos de materiais possuem uma temperatura crítica, chamada temperatura de Curie (T_C), acima da qual perdem suas propriedades ferromagnéticas e se tornam paramagnéticos.

No entanto, essa mudança para o estado paramagnético não é permanente. Quando o material é resfriado abaixo da temperatura de Curie, ele recupera suas propriedades ferromagnéticas. Isso ocorre porque a estrutura interna do material, que permite o alinhamento dos momentos magnéticos, é restaurada ao retornar a temperaturas mais baixas. Portanto, a transição entre os estados ferromagnético e paramagnético é reversível e depende da temperatura do material.

2.1.4.4 Antiferromagnetismo

Os materiais antiferromagnéticos possuem momentos magnéticos atômicos que se alinham antiparalelamente, cancelando-se mutuamente na ausência de um campo magnético externo. Como resultado, a magnetização líquida é zero ou muito próxima de zero. Alguns exemplos são Óxido de manganês (MnO), óxido de níquel (NiO) e cromo (Cr).

As características deles são a magnetização que é quase nula na ausência de um campo externo, apresentam uma temperatura crítica, chamada temperatura de Néel (T_N), acima da qual se tornam paramagnéticos e a suscetibilidade magnética que é positiva, mas muito menor que a dos materiais ferromagnéticos.

2.1.4.5 Ferrimagnetismo

Os materiais ferrimagnéticos são semelhantes aos antiferromagnéticos, mas os momentos magnéticos antiparalelos não se cancelam completamente, resultando em uma magnetização líquida não nula. Isso ocorre porque os momentos magnéticos têm magnitudes diferentes. Alguns exemplos são as ferritas, como a magnetita, Fe_3O_4 , e granadas de ítrio e ferro (YIG).

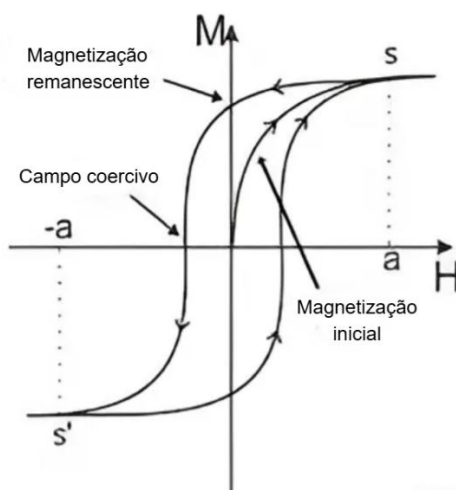
As características são que a magnetização é forte, mas menor que a dos materiais ferromagnéticos, elas também apresentam histerese magnética, semelhante aos materiais ferromagnéticos e são amplamente utilizados em aplicações de alta frequência, como núcleos de transformadores e dispositivos de micro-ondas, devido à sua baixa condutividade elétrica.

2.1.4.6 Histerese Magnética

A histerese magnética é um fenômeno observado em materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, que descreve a dependência da magnetização (\vec{M}) do material com o campo magnético aplicado (\vec{H}) ao longo de ciclos de magnetização e desmagnetização. Esse comportamento é representado por uma curva de histerese, que mostra como a magnetização varia com o campo magnético.

Na curva de histerese pode ser visto o campo coercivo (H_c), que é o valor do campo magnético necessário para reduzir a magnetização a zero, a magnetização remanescente (M_r), que é a magnetização residual após a remoção do campo magnético e a saturação magnética (M_s) que é o valor máximo de magnetização que o material pode atingir. Essas características podem ser vistas na Figura 6.

Figura 6: Curva de histerese de um material ferromagnético, com magnetização de saturação em S e magnetização de saturação oposta em S'.



Fonte: Dias, 2010.

https://www.academia.edu/4057471/MECANOSS%C3%8DNTSESE_E_CARACTERIZA%C3%87%C3%83O_DE_CER%C3%82MICAS_DE_Bi_1_X_LaXFeO3_OBTIDAS_POR_DIFERENTES_ROTAS_D_E_SINTERIZA%C3%87%C3%83O?hb-sb-sw=30176297

A histerese magnética desempenha um papel fundamental em diversos dispositivos tecnológicos. Em núcleos de transformadores, motores e geradores, esse

fenômeno é essencial para garantir que a magnetização do material seja mantida mesmo após a remoção do campo externo, contribuindo para a eficiência e estabilidade do funcionamento desses equipamentos. Além disso, a histerese magnética é amplamente utilizada em dispositivos de armazenamento de dados, como discos rígidos, onde a magnetização remanente de materiais ferromagnéticos é explorada para representar bits de informação, permitindo a gravação e a leitura de dados de forma confiável.

2.1.4.7 Materiais Multiferroicos

Os materiais multiferroicos são uma classe de materiais que exibem duas ou mais propriedades ferroicas simultaneamente, como ferromagnetismo, ferroeletricidade (esses materiais possuem uma curva de histerese análoga à dos materiais ferromagnéticos, porém, em vez de relacionar campo magnético e magnetização, relacionam campo elétrico e polarização) e ferroelasticidade. Eles têm se mostrado uma classe promissora de materiais para aplicações em armazenamento de energia (Xu, Íñiguez, Bellaiche, 2017; Li, Xie, Huang, 2023).

No entanto, o número de materiais multiferroicos que apresentam acoplamento magnetoelétrico em temperatura ambiente é limitado (Wang *et al*, 2020). Dentre esses, a ferrita de bismuto (BiFeO_3 , ou BFO) se destaca como um candidato notável para potenciais aplicações tecnológicas (Scott, 2013; Biasotto, 2010).

O BiFeO_3 (BFO) apresenta uma polarização remanescente elevada, em torno de $100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, sendo uma das maiores polarizações comutáveis entre os materiais ferroelétricos do tipo perovskita. Além disso, é isento de chumbo e possui potencial para ser utilizado como material ativo em dispositivos ferroelétricos e memórias ferroelétricas (Puhan *et al*, 2021). Outro aspecto relevante é que o acoplamento magnetoelétrico presente no BFO permite a detecção de campos magnéticos por meio de sinais elétricos de saída. Essa capacidade de detecção desempenha um papel fundamental na avaliação do estado e da eficiência de baterias.

Algumas das propriedades do BiFeO_3 incluem:

- Ferroeletricidade: Possui uma polarização elétrica espontânea que pode ser invertida pela aplicação de um campo elétrico.

- Antiferromagnetismo: Exibe ordenamento magnético antiferromagnético, com momentos magnéticos antiparalelos.
- Acoplamento magnetoelétrico: As propriedades magnéticas e elétricas estão acopladas, permitindo o controle de uma propriedade pela outra.

Entre as aplicações desses materiais, destacam-se:

- Dispositivos de memória multiferroicos: Nos quais a informação pode ser armazenada magneticamente e lida eletricamente.
- Sensores e atuadores: Que respondem a estímulos magnéticos e elétricos simultaneamente.
- Pesquisa em spintrônica e eletrônica de baixo consumo de energia: Onde o BFO pode ser utilizado para desenvolver tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

2.1.5 Propriedades Magnéticas Relevantes

Os materiais magnéticos apresentam diversas propriedades fundamentais que influenciam seu comportamento sob a ação de campos magnéticos externos. Conceitos como momento magnético, magnetização e suscetibilidade magnética, bem como a relação entre campo aplicado e magnetização, já foram introduzidos na Seção 2.1 Conceitos Básicos de Magnetismo. Nesta seção, exploramos outros aspectos relevantes, incluindo os efeitos da temperatura e a resposta dinâmica dos materiais a campos magnéticos oscilantes.

2.1.5.1 Efeitos de Temperatura

A magnetização dos materiais magnéticos é fortemente influenciada pela temperatura. Em materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos, a elevação da temperatura pode desalinhar os momentos magnéticos, reduzindo a magnetização. Existe uma temperatura crítica, chamada temperatura de Curie (T_C), acima da qual o material perde suas propriedades magnéticas espontâneas e se comporta como um material paramagnético.

Nos materiais antiferromagnéticos, a temperatura crítica é denominada temperatura de Néel (T_N), marcando a transição para o comportamento

paramagnético. A relação entre temperatura e magnetização pode ser descrita pela Lei de Curie-Weiss, que expressa a suscetibilidade magnética em função da temperatura como:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (14)$$

onde:

- χ é suscetibilidade magnética ($A \cdot m^2$);
- C é a constante de Curie ($A \cdot m^2 / K$);
- T é a temperatura absoluta (K);
- T_C é a temperatura de Curie (K).

Essa equação evidencia que, à medida que a temperatura se aproxima de T_C , a suscetibilidade magnética cresce significativamente.

2.1.5.2 Dinâmica Magnética

A resposta de um material magnético a campos magnéticos oscilantes é um aspecto crucial para diversas aplicações, especialmente em magnetometria dinâmica, telecomunicações e dispositivos de armazenamento de dados. Quando um campo magnético alternado é aplicado a um material magnético, os momentos magnéticos respondem com um atraso temporal, fenômeno descrito pela permeabilidade complexa e pela ressonância ferromagnética (FMR).

A dinâmica magnética é governada pela equação de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG), que descreve a evolução temporal do vetor de magnetização \vec{M} sob a influência de um campo externo \vec{H} e de um termo de amortecimento viscoso (Banas *et al*, 2014):

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma(\vec{M} \times \vec{H}) + \alpha \left(\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right) \quad (15)$$

Onde:

- \vec{M} é a magnetização (A/m);
- \vec{H} é a intensidade do campo magnético (A/m);
- γ é a razão giromagnética ($\gamma = g \frac{e}{2m}$, em $rad \cdot s^{-1} \cdot T^{-1}$);
- α é o coeficiente de amortecimento e t é o tempo em s.

Essa equação mostra como a magnetização oscila em torno da direção do campo aplicado antes de atingir o equilíbrio.

Em frequências específicas, ocorre a ressonância magnética, que é amplamente explorada em técnicas como ressonância magnética nuclear (RMN) e magnetometria de alta frequência. Esse comportamento também tem implicações diretas em perdas energéticas por histerese e em fenômenos como absorção de micro-ondas por materiais magnéticos.

2.2 GERAÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS OSCILANTES

A geração de campos magnéticos oscilantes é essencial para diversas aplicações científicas e tecnológicas, como a magnetometria, estudos de materiais magnéticos e calibração de sensores. Esses campos são produzidos e controlados por meio de dispositivos específicos, como as bobinas de Helmholtz, que permitem gerar campos magnéticos homogêneos e estáveis. Nesta seção, serão discutidos o princípio de funcionamento, as condições para a homogeneidade do campo, a expressão matemática do campo gerado e as aplicações das bobinas de Helmholtz.

2.2.1 Bobinas de Helmholtz

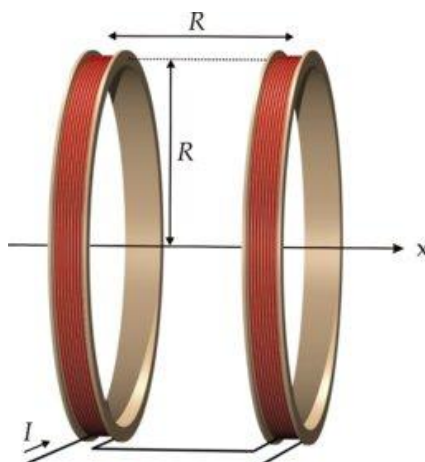
Nesta seção será falado sobre as bobinas de Helmholtz, seu funcionamento, as condições de homogeneidade do campo magnético no centro e algumas aplicações.

2.2.1.1 Princípio de Funcionamento

As bobinas de Helmholtz, criada pelo físico Hermann Von Helmholtz, consistem em duas bobinas circulares idênticas, coaxiais e paralelas, separadas por uma distância igual ao raio das bobinas. Quando uma corrente elétrica I passa pelas bobinas, elas geram um campo magnético \vec{H} na região central entre as bobinas. O arranjo específico das bobinas de Helmholtz permite a geração de um campo magnético altamente homogêneo na região central, o que é crucial para aplicações que exigem precisão (Robert, 2003).

A configuração se dá da seguinte forma, as bobinas são dispostas paralelamente com seus eixos alinhados, a distância entre os centros das bobinas é igual ao raio R de cada bobina e o número de espiras N em cada bobina é igual.

Figura 7: Representação da bobina de Helmholtz.



Fonte: Tzuc, 2014.

https://www.researchgate.net/publication/286921038_Diseño_y_construcción_de_un_generador_de_campos_magnético.

2.2.1.2 Condições para Campo Homogêneo

A homogeneidade do campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz depende de dois fatores principais:

- Distância entre as bobinas: O ideal é que a distância entre elas seja igual ao raio R . Essa configuração minimiza as variações do campo magnético na região central.
- Número de espiras: O número de espiras deve ser igual em cada uma das bobinas e colocados da maneira mais uniforme possível.

A configuração de Helmholtz é projetada para criar uma região central com um campo magnético quase uniforme. Isso é alcançado quando a distância entre as duas bobinas é igual ao raio R de cada bobina. A razão para isso está no comportamento do campo magnético gerado por uma bobina circular.

O campo magnético ao longo do eixo de uma bobina circular depende da distância ao centro da bobina. Quando duas bobinas idênticas são colocadas paralelamente, separadas por uma distância d , o campo magnético resultante na região central é a soma dos campos gerados por cada bobina.

Quando $d = R$, as derivadas de ordem superior do campo magnético em relação à posição ao longo do eixo central se cancelam, garantindo que o campo magnético varie muito pouco no centro, resultando em uma região de alta homogeneidade. Isso ocorre porque, nessa configuração, as contribuições das duas bobinas se combinam de forma a minimizar as variações espaciais do campo.

O campo magnético B no centro das bobinas de Helmholtz é dado por:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \cdot \frac{NI}{R} \quad (16)$$

Onde:

- N é o número de espiras em cada bobina,
- I é a corrente elétrica que passa pelas bobinas (em ampere, A)
- R é o raio das bobinas (em metro, m).

Essa expressão mostra que o campo magnético é diretamente proporcional ao número de espiras e à corrente, e inversamente proporcional ao raio das bobinas.

2.2.1.3 Aplicações em Experimentação Científica

As bobinas de Helmholtz são amplamente utilizadas em experimentos científicos e aplicações tecnológicas devido à sua capacidade de gerar campos magnéticos homogêneos e controláveis. Algumas aplicações incluem:

- A magnetometria (Fernández Pinto, 2010), com a calibração de sensores magnéticos, como magnetômetros de bombeamento óptico e SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Devices) e a medição precisa de campos magnéticos em laboratórios e ambientes controlados.
- Em estudos de materiais magnéticos, com a caracterização de propriedades magnéticas de materiais (Carrara, 2010), como suscetibilidade magnética e histerese e a investigação de fenômenos como ressonância magnética e relaxação magnética.
- A calibração de sensores (Bahrami *et al*, 2024), com a verificação da resposta de sensores magnéticos a campos magnéticos conhecidos e homogêneos e ajuste de dispositivos de medição para garantir precisão e confiabilidade.

- Em experimentos de física e engenharia (Cardona *et al*, 2019), com o estudo de efeitos magnéticos em partículas carregadas, como elétrons e íons e no desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos, como motores e geradores.

Essa capacidade de gerar campos magnéticos homogêneos é particularmente relevante para o sistema de magnetometria, onde a precisão na medição de campos magnéticos é crucial. As bobinas de Helmholtz não apenas permitem a calibração de sensores magnéticos, mas também abrem caminho para estudos avançados de materiais magnéticos e para a investigação de fenômenos como a ressonância magnética e a dinâmica de spins (Holanda *et al*, 2021a; Holanda, 2021b; Rezende *et al*, 2021).

2.2.2 Uso de Eletroímãs para Reforço do Campo Magnético

Os eletroímãs são dispositivos amplamente utilizados para gerar campos magnéticos controláveis a partir de correntes elétricas. Diferentemente dos ímãs permanentes, os eletroímãs permitem ajustar a intensidade e a direção do campo magnético de forma dinâmica, tornando-os ideais para aplicações que exigem controle preciso do campo, como em sistemas de magnetometria. Nesta subseção, são discutidos o princípio de funcionamento dos eletroímãs, o controle da intensidade do campo e sua sincronização com as bobinas de Helmholtz para reforço do campo aplicado.

2.2.2.1 Princípio de Funcionamento

O funcionamento dos eletroímãs baseia-se na Lei de Ampère, que estabelece que uma corrente elétrica I que passa por um condutor gera um campo magnético B ao seu redor. Quando o condutor é enrolado em forma de bobina, o campo magnético é amplificado, e a introdução de um núcleo ferromagnético (como ferro) aumenta ainda mais a intensidade do campo devido à alta permeabilidade magnética do material.

Os principais componentes de um eletroímã são a bobina, composta por fios condutores enrolado em forma de espiral para conduzir a corrente elétrica, um núcleo ferromagnético que possui uma alta permeabilidade magnética, como ferro ou ligas

de níquel para concentrar as linhas de campo magnético e uma fonte de corrente, para fornecer a corrente elétrica necessária para gerar o campo magnético. A indução magnética no interior de um eletroímã é aproximadamente dado por:

$$B \approx \mu_0 \mu_r N I \quad (17)$$

Onde:

- μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, μ_r é a permeabilidade relativa do núcleo ferromagnético;
- N é o número de espiras por unidade de comprimento da bobina e I é a corrente que passa pela bobina.

Uma das principais vantagens dos eletroímãs é a capacidade de controlar o campo magnético de forma precisa e dinâmica. Isso é feito variando a corrente elétrica I aplicada à bobina. O aumento da corrente intensifica o campo magnético, enquanto sua redução diminui a intensidade do campo. A inversão da corrente também inverte a direção do campo magnético.

2.2.2.2 Sincronização com Bobinas de Helmholtz

As bobinas de Helmholtz são responsáveis pela geração de um campo magnético homogêneo e oscilante no experimento, permitindo a modulação do campo aplicado à amostra. Os eletroímãs, por sua vez, podem ser empregados para reforçar esse campo ou atuar como fontes adicionais de controle magnético. No reforço do campo magnético, os eletroímãs podem ser posicionados estrategicamente para complementar o campo gerado pelas bobinas de Helmholtz, aumentando sua intensidade sem comprometer a homogeneidade. Além disso, a sincronização entre as correntes aplicadas às bobinas de Helmholtz e aos eletroímãs possibilita ajustes finos da amplitude e da frequência do campo oscilante.

Nas aplicações em magnetometria, essa configuração possibilita a calibração de sensores magnéticos sob diferentes intensidades de campo, estudos de materiais magnetoativos, como $BiFeO_3$, sob campos magnéticos oscilantes e a investigação de fenômenos como ressonância magnética e relaxação de spins (Holanda, Santos, Rezende, 2021c; Silva, Holanda, 2023d).

2.2.3 Geração de Formas de Onda no Campo Magnético

A geração de formas de onda no campo magnético é essencial para aplicações que exigem modulação precisa e controlada, como em sistemas de magnetometria e estudos de materiais magnéticos (Mendes, Rezende, Holanda, 2021; Silva, Degiorgi, Holanda, 2023e; Oliveira *et al*, 2024). Essa modulação é realizada por meio de geradores de funções, que produzem sinais elétricos com formas de onda específicas, como senoidal, quadrada e pulsada. Esses sinais são aplicados às bobinas de Helmholtz, que podem estar conectadas a um circuito RLC, permitindo a criação de campos magnéticos oscilantes com características bem definidas. Neste tópico, são discutidos os princípios de funcionamento dos geradores de funções, a modulação do campo magnético e a importância da estabilidade e calibração dos sinais gerados.

2.2.3.1 Geradores de Funções

Os geradores de funções são dispositivos eletrônicos capazes de produzir sinais elétricos com diferentes formas de onda, utilizados para modular campos magnéticos em experimentos científicos e aplicações tecnológicas. As formas de onda mais comuns incluem:

- Onda senoidal: apresenta uma variação suave e periódica, sendo ideal para estudos de ressonância magnética e fenômenos oscilatórios;
- Onda quadrada: caracterizada por transições abruptas entre dois níveis de tensão, utilizada em aplicações que exigem comutação rápida;
- Onda pulsada: consiste em pulsos de curta duração, adequada para estudos de relaxação magnética e dinâmica de spins.

Os principais parâmetros ajustáveis em um gerador de funções incluem:

- Forma da onda: define o tipo do sinal gerado;
- Frequência: determina o número de ciclos por segundo (Hz);
- Amplitude: especifica a tensão de pico a pico do sinal gerado;
- Offset: adiciona um deslocamento contínuo ao sinal;
- Ciclo de trabalho: ajusta a proporção entre os tempos de nível alto e baixo em uma onda quadrada.

2.2.3.2 Modulação do Campo Magnético

A modulação do campo magnético é realizada ao alimentar as bobinas de Helmholtz com os sinais gerados pelo gerador de funções. Isso permite a criação de campos magnéticos oscilantes com frequência e amplitude controladas, possibilitando a investigação de diversos fenômenos físicos.

A estabilidade e a calibração dos sinais gerados são fatores críticos para garantir a precisão e a confiabilidade dos experimentos. Flutuações indesejadas no sinal, causadas por equipamentos defeituosos, ruído elétrico ou cabos de baixa qualidade, podem comprometer a validade dos resultados.

A calibração do gerador de funções pode ser realizada com o auxílio de um osciloscópio, verificando se os parâmetros ajustados no gerador correspondem fielmente ao sinal observado na tela do osciloscópio. Esse procedimento garante que as características do campo magnético gerado estejam dentro das especificações desejadas para o experimento.

2.3 MAGNETOMETRIA

A magnetometria é uma área da física aplicada que se dedica à medição de campos magnéticos e das propriedades magnéticas dos materiais. Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, cada uma com suas vantagens, limitações e aplicações específicas. Neste capítulo, serão abordadas as principais técnicas convencionais de magnetometria, seguidas por uma descrição detalhada da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes, que é o foco deste trabalho. Por fim, será feita uma comparação entre essas técnicas, destacando as razões pelas quais a técnica de efeitos oscilantes foi escolhida para o desenvolvimento do sistema proposto.

2.3.1 Magnetometria SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

A magnetometria SQUID é uma das técnicas mais sensíveis disponíveis para a medição de campos magnéticos. Ela se baseia na interferência quântica em materiais supercondutores, onde pequenas variações no campo magnético produzem mudanças mensuráveis na corrente supercondutora. Essa técnica é capaz de detectar campos magnéticos extremamente fracos, da ordem de femtoteslas ($10^{-15} T$), sendo

ideal para aplicações que exigem alta precisão, como em estudos de materiais magnéticos de baixa magnetização e medições biomagnéticas, como o campo gerado pelo coração (magnetocardiografia) ou cérebro (magnetoencefalografia) (Dumas, Hogan, 2021).

No entanto, a magnetometria SQUID apresenta limitações significativas, como a necessidade de temperaturas criogênicas para manter o estado supercondutor, o que normalmente requer hélio líquido ou sistemas de refrigeração avançados. Isso torna sua operação complexa e custosa. Além disso, é necessário um ambiente magneticamente blindado para evitar interferências externas, reduzindo sua aplicabilidade fora de laboratórios especializados.

Para mitigar essas dificuldades, algumas abordagens incluem o uso de compensação ativa, na qual sensores auxiliares detectam perturbações externas e controlam bobinas compensadoras para neutralizar variações indesejadas do campo magnético. Essa técnica melhora a estabilidade e a precisão das medições, tornando o SQUID mais robusto contra interferências ambientais.

2.3.2 Magnetometria VSM (Vibrating Sample Magnetometry)

A magnetometria VSM é amplamente utilizada para a caracterização de materiais magnéticos. Seu funcionamento baseia-se na vibração de uma amostra dentro de um campo magnético estático, o que gera uma corrente induzida em bobinas de detecção proporcional à magnetização da amostra (Pudalov, 2021). Esse método permite a obtenção de curvas de histerese magnética, possibilitando a determinação de parâmetros como magnetização de saturação, coercividade e remanência.

Entre as vantagens dessa técnica estão sua facilidade de operação e a capacidade de realizar medições em uma ampla faixa de temperaturas, desde criogênicas até centenas de graus Celsius, quando acoplada a sistemas de controle térmico. No entanto, sua sensibilidade é inferior à do SQUID, e sua resolução temporal é limitada, tornando-a menos adequada para o estudo de fenômenos magnéticos dinâmicos.

2.3.3 Magnetometria de Efeito Hall

A magnetometria baseada no efeito Hall utiliza a geração de uma tensão transversal quando um material condutor é submetido a um campo magnético perpendicular à corrente elétrica (Fernández Pinto, 2010). Essa técnica é amplamente empregada em sensores magnéticos comerciais devido à sua simplicidade, baixo custo e capacidade de operação em tempo real.

Apesar dessas vantagens, a magnetometria de efeito Hall apresenta algumas limitações. Sua sensibilidade é inferior à do SQUID e do VSM, e sua precisão pode ser afetada por variações térmicas e ruídos eletrônicos. Além disso, essa técnica é mais adequada para medições de campos magnéticos estáticos ou de baixa frequência, sendo menos eficiente para a análise de materiais que apresentam comportamento dinâmico.

2.3.4 Magnetometria de Efeitos Oscilantes

A magnetometria de efeitos oscilantes é uma técnica que se destaca por sua capacidade de estudar a resposta dinâmica de materiais magnéticos sob a influência de campos magnéticos modulados. Diferentemente das técnicas convencionais, que geralmente medem campos estáticos ou de baixa frequência, essa técnica permite a aplicação de campos magnéticos com formas de onda variadas, como senoidal, quadrada ou pulsada, possibilitando a análise da resposta magnética em tempo real. Essa característica é particularmente útil para investigar fenômenos dinâmicos, como relaxação magnética, ressonância magnética e transições de fase em materiais magnetoativos, como o $BiFeO_3$.

O sistema desenvolvido neste trabalho utiliza bobinas de Helmholtz e eletroímãs para gerar campos magnéticos homogêneos e oscilantes. As bobinas de Helmholtz, alimentadas por um gerador de funções, são responsáveis por gerar um campo magnético uniforme e modulado em frequência e forma de onda. Já os eletroímãs, alimentados por uma fonte de tensão DC, atuam para reforçar a intensidade do campo magnético gerado pelas bobinas. Sensores magnéticos registram a resposta da amostra ao campo aplicado e enviam os dados para um osciloscópio, permitindo uma análise detalhada do comportamento da amostra sob diferentes condições experimentais.

As principais vantagens da utilização dessa técnica é a alta resolução temporal, podendo medir em escala de tempo de nanosegundos, permitindo a investigação de fenômenos dinâmicos, como relaxação magnética e transições de fase, a flexibilidade experimental, possibilitando variações na frequência e forma do campo aplicado, o que é essencial para o estudo de materiais com respostas magnéticas complexas, além disso, não necessita de nenhum sistema de refrigeração, como é o caso do SQUID.

2.3.5 Comparação entre as Técnicas de Magnetometria

A escolha da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes para este trabalho foi baseada em uma análise crítica das vantagens e limitações das técnicas convencionais. A técnica SQUID apresenta a maior sensibilidade dentre as abordadas neste estudo, sendo capaz de detectar campos magnéticos extremamente fracos. No entanto, seu alto custo, a necessidade de temperaturas criogênicas e a complexidade operacional limitam sua acessibilidade. A técnica VSM é amplamente utilizada para a caracterização de materiais magnéticos, permitindo a obtenção de curvas de histerese, mas apresenta resolução temporal limitada, dificultando a análise de fenômenos dinâmicos. Já a magnetometria de efeito Hall é uma alternativa de baixo custo e fácil integração a circuitos eletrônicos, mas sua sensibilidade é inferior às demais técnicas, tornando-a menos adequada para medições de campos magnéticos muito fracos.

A magnetometria de efeitos oscilantes se destaca por oferecer um equilíbrio entre sensibilidade, resolução temporal e custo, sendo especialmente útil para a análise de materiais magnetoativos, como o $BiFeO_3$. Essa técnica permite investigar a resposta dinâmica desses materiais a campos magnéticos modulados, fornecendo informações valiosas sobre suas propriedades dependentes da frequência. Além disso, sua flexibilidade experimental possibilita a exploração de uma ampla variedade de condições magnéticas, viabilizando o desenvolvimento de dispositivos avançados, como sensores magnéticos de alta precisão, novos materiais para memórias magnéticas e baterias mais eficientes.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos e técnicas utilizados para o desenvolvimento e validação do sistema eletrônico de magnetometria de efeitos oscilantes aplicado a materiais magnetoativos. A metodologia foi dividida em etapas sequenciais, que incluem o levantamento bibliográfico (fundamentação teórica), a definição dos parâmetros experimentais, a montagem e calibração do sistema, a coleta de dados e a análise dos resultados. O objetivo é garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos experimentos, bem como fornecer uma base sólida para a interpretação dos dados obtidos. A seguir, são detalhadas as etapas do processo experimental, desde a construção dos componentes até a análise dos efeitos do campo magnético oscilante em amostras de $BiFeO_3$.

3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção será descrito os procedimentos experimentais adotados.

3.1.1 Protótipo da bobina de Helmholtz

O desenvolvimento do sistema de magnetometria de efeitos oscilantes envolveu etapas iterativas, começando com a construção de um protótipo inicial de bobinas de Helmholtz. Para o protótipo, utilizou-se cano PVC como estrutura e fio esmaltado AWG 30 para as espiras, essa configuração foi escolhida para testes preliminares, visando avaliar a viabilidade do sistema e identificar possíveis melhorias. Queríamos um campo magnético com magnitude de 30 Oe, para com isso determinar as características que cada uma das bobinas deveria ter para alcançar esse valor teórico.

Para isso, utilizamos a equação (16), com uma corrente de 0,14A, pois a corrente máxima suportada pela bitola desse fio é de 0,15A, isso foi feito para garantir que o fio não tenha um superaquecimento e danifique a bobina. Como foi utilizado um cano de PVC de 75mm, o seu raio possui o valor de 3,75 cm. Com essas informações e isolando o N, conseguimos encontrar o valor de espiras para enrolar, que no caso foi $N = 894$ para cada uma das bobinas.

Enrolei elas manualmente, tomando os devidos cuidados para ficarem de forma mais uniforme. Essa bobina foi conectada a um circuito RC, composto por um resistor de 1Ω e um capacitor de $4,7\mu F$, formando um circuito RLC, onde a bobina é o indutor L.

Um circuito RLC é um circuito elétrico composto por um resistor (R), um indutor (L) e um capacitor (C), conectados em série ou em paralelo. Esse tipo de circuito é amplamente utilizado em aplicações que envolvem filtragem de sinais, sintonia de frequências e análise de respostas a estímulos oscilantes.

A frequência de ressonância é um conceito fundamental em circuitos RLC. Ela corresponde à frequência na qual a reatância indutiva X_L e a reatância capacitiva X_C se cancelam mutuamente, resultando em uma impedância mínima no circuito (no caso de um circuito RLC em série) ou máxima (no caso de um circuito RLC em paralelo). A frequência de ressonância é dada pela fórmula:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (18)$$

No estado de ressonância, o circuito RLC exibe comportamento característico, como a maximização da amplitude da corrente (em série, que é o nosso caso) ou da tensão (em paralelo). Esse fenômeno é essencial para aplicações como sintonia de rádios, filtros eletrônicos e, no caso deste trabalho, a modulação de campos magnéticos oscilantes em sistemas de magnetometria.

Para descobrir o valor da indutância total da bobina de modo convencional, utilizamos a equação (19), onde obtivemos o valor de $L = 443,70mH$. O sistema foi conectado em série, com a fonte sendo o gerador de funções, para gerar as formas de onda para o campo magnético oscilante (AC).

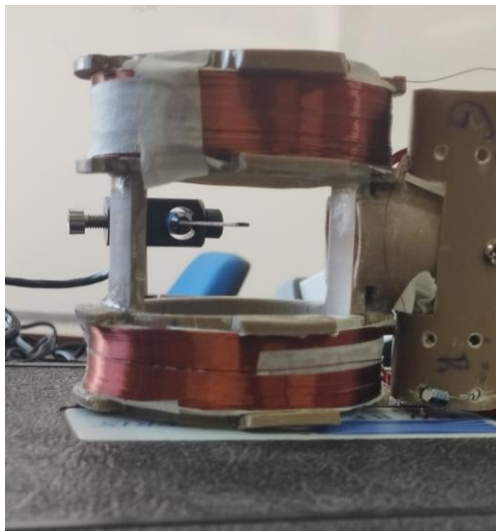
$$L_T = L_1 + L_2 = 2 \left(\frac{n^2 \pi R^2}{l} \right) \mu_0 \quad (19)$$

Utilizando a equação (18) e substituindo pelos valores correspondentes, encontramos uma frequência de ressonância de aproximadamente 110 Hz, que vai ser a frequência que iremos utilizar no gerador de funções.

Para gerar o campo magnético estático (DC), a bobina é desconectada do circuito, pois o capacitor ao filtrar as componentes de corrente contínua do sinal, impediria a passagem da tensão. Na Figura 8 temos o par das bobinas junto com a

ponta do gaussímetro no centro dela, para medir a intensidade do campo magnético, tanto DC como AC. As análises dessa bobina constam nas sessões 4.1.1 e 4.1.2.

Figura 8: Bobina de Helmholtz de cano PVC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

3.1.2 Bobina de Helmholtz de nylon

Para o nosso sistema de bobinas definitivo, optamos por usar algo mais resistente e no qual pudéssemos moldar com as dimensões que precisássemos, dessa maneira, usamos tarugos de nylon com diâmetro de 150mm e uma espessura de 50mm. Para o processo de moldagem, usamos o laboratório de mecânica na UFRPE/UACSA.

Figura 9: Tarugo de nylon no torno mecânico.

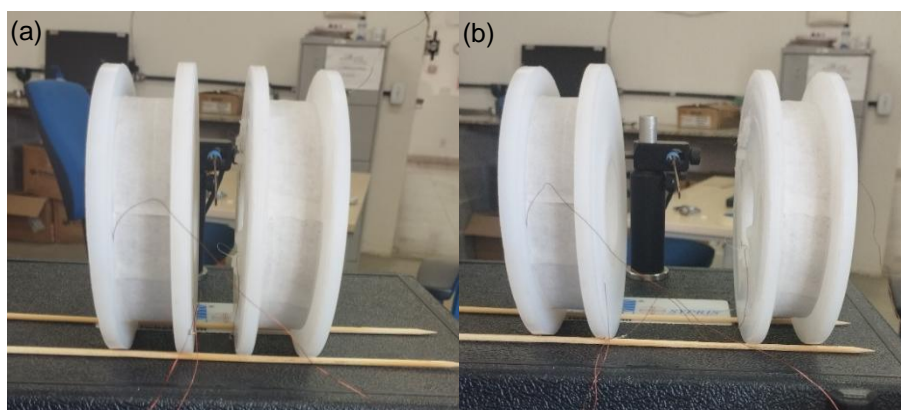


Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

As dimensões deles foram reduzidas e feito a configuração de carretel, possuindo as dimensões de 14 cm de diâmetro total e um raio vazado (o raio de onde podemos enrolar os fios) de 5,5 cm. Foi utilizado a mesma bitola usada anteriormente no carretel de PVC, porém agora para um campo de 15 Oe e utilizando a equação (16), vimos que precisávamos enrolar 656 espiras em cada um dos carretéis.

Elas foram enroladas manualmente, assim como a anterior. Na Figura 10 temos as bobinas com diferentes distâncias para vermos o que essa configuração resulta. A indutância calculada pela equação (19) nos deu $L_R = 256,95mH$ e $L_{2R} = 1027,83mH$, já a frequência de ressonância utilizando a equação (18) ficou em 144Hz e 72Hz, respectivamente.

Figura 10: Bobina de Helmholtz com carretel de nylon. (a) distância R, (b) distância 2R.



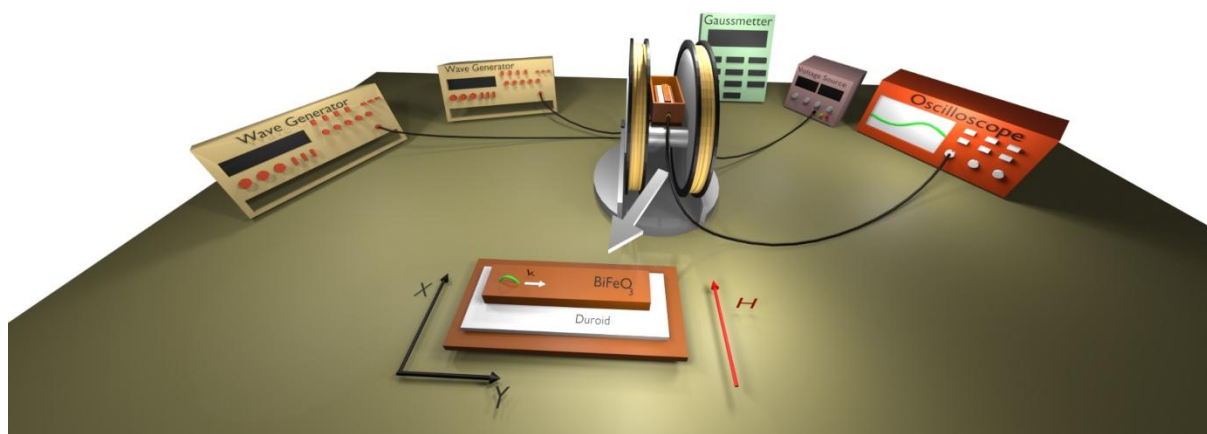
Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Esse foi o carretel utilizado no sistema de magnetometria, porém, trocamos a bitola do fio para o AWG 16, pois ele suporta até 3,7A de corrente, onde colocamos 3,6A para ter uma margem de cerca de 3%. Calculamos o número de espiras para um campo de 115 Oe, que resultou em 210 voltas em cada um dos carretéis. Analogamente as anteriores, calculamos a indutância que resultou em cerca de $L = 34,54mH$ e com uma frequência de ressonância de 395Hz. Os resultados estão descritos na seção 4.1.3.

3.2 MONTAGEM DO SISTEMA

O sistema é composto pelo par de bobinas de Helmholtz com o carretel de nylon e bitola AWG 16, um par de eletroímãs, um guia de onda reto com suporte de latão, dois geradores de funções, uma fonte de tensão e um osciloscópio. Na Figura 11 temos um modelo 3D da técnica, moldado no software Blender.

Figura 11: Configuração da montagem da técnica de magnetometria de efeitos oscilantes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

As bobinas de Helmholtz são os objetos maiores no centro da imagem, elas estão conectadas em série em um circuito RLC, este por sua vez está conectado com um dos geradores de funções, que servirá para alimentar a bobina com a forma de onda senoidal, escolhida por ela ser a mais suave entre as analisadas. As bobinas de Helmholtz estão com um suporte também de nylon com pés, para que elas fiquem retas na mesa e não ocorra nenhum movimento durante as medições.

No centro de cada uma dessas bobinas está um eletroímã, que está conectado em série um com o outro, estes são alimentados pela fonte de tensão. No centro das bobinas, na região de homogeneidade, está um suporte de latão onde está o guia de ondas reto, no qual em cima dele, vai a amostra de $BiFeO_3$ para ser analisada. A amostra por sua vez é um filme espesso (uma cerâmica retangular).

Em um lado do guia de ondas está conectado o segundo gerador de funções, esse vai ser responsável por emitir o sinal de pulsos em diferentes larguras e será ele em que vamos subir a amplitude do sinal até o limite de 10Vpp. O outro lado do guia de ondas estará conectado com o osciloscópio, no qual vai ser usado para a visualização das formas de onda e a aquisição de dados. O outro equipamento mostrado é o gaussímetro, que será utilizado para verificar a intensidade do campo magnético.

3.3 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os dados foram coletados através de um pendrive na entrada do osciloscópio, foi realizada 3 medidas para cada 200mVpp até chegar no total de 10Vpp, que é o

máximo que o gerador de funções pode nos entregar. Foi realizado a média aritmética para obter os resultados. A função escolhida foi a pulso, com os tamanhos de largura de pulso de 25ns, 50ns, 75ns e 100ns, com o tempo de subida de 10ns.

Para melhorar a visualização dos resultados, foi feito a conversão da tensão V_{pp} para potência em W, utilizando as seguintes equações:

$$V_{RMS} = \frac{V_{PP}}{2\sqrt{2}} \quad (20)$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (21)$$

A equação (20) serve para converter a tensão de pico a pico para a tensão eficaz, já a equação (21) serve para calcular a potência utilizando a resistência, que no nosso caso, tem a resistência de 1Ω do circuito RLC. Com isso, os resultados serão exibidos em potência por tensão. A análise foi feita utilizando um guia de onda reto com a amostra em 0° e em 90° , em relação ao guia de ondas reto, para os campos de 0 Oe e 180 Oe e para gerar os gráficos foi utilizado o software Origin.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos durante o desenvolvimento e validação do sistema de magnetometria de efeitos oscilantes. Os resultados estão divididos em duas partes principais: (1) a análise das bobinas de Helmholtz, incluindo a avaliação do protótipo inicial e do projeto final, e (2) a análise do sistema de magnetometria de efeitos oscilantes, com foco na resposta da amostra de BiFeO_3 a campos magnéticos oscilantes.

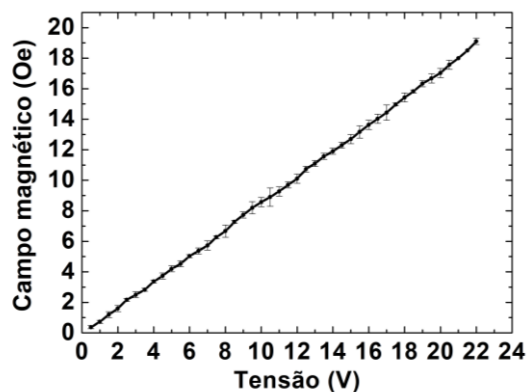
4.1 CAMPO MAGNÉTICO DAS BOBINAS DE HELMHOLTZ

Nesta seção será mostrado o desempenho dos campos magnéticos das bobinas.

4.1.1 Bobina de cano PVC (análise DC)

Para realizar a análise do campo magnético DC, retiramos a bobina do circuito RLC, deixando apenas a bobina e a fonte de tensão. Definimos a corrente na fonte de 140mA (0,14A) na fonte e posteriormente, subindo a tensão em 0,50V até atingir o valor máximo da corrente.

Figura 12: Campo magnético DC da bobina de Cano PVC.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

O gráfico da Figura 12 oferece uma representação visual do comportamento do campo magnético, onde a medida em que a tensão é progressivamente aumentada, ocorre uma correspondente elevação na intensidade do campo magnético. Essa relação linear entre a tensão e a intensidade do campo magnético, revelada pelo gráfico, está em concordância com a equação (16), que postula que o campo magnético cresce proporcionalmente à corrente, mantidos os demais parâmetros constantes.

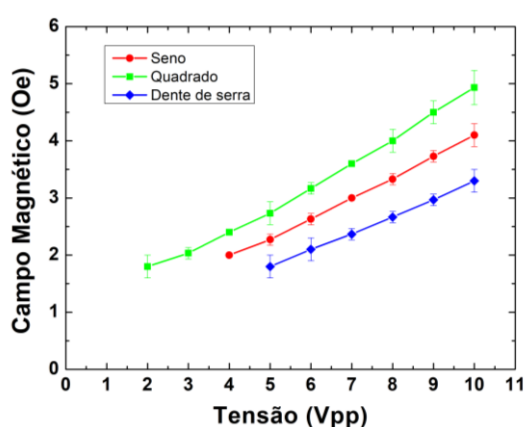
Dado que a bobina é confeccionada com fios de cobre, os quais detêm uma certa resistência, podemos descobrir ela pela Lei de Ohm expressa por $V = R \cdot I$, a qual nos mostra uma resistência de cerca de 160Ω , o que é um pouco alta, devido a quantidade de voltas que foram dadas na bobina.

O pico máximo do campo magnético gerado pela bobina alcançou aproximadamente 19 Oe, a uma tensão ligeiramente superior a 22V. Essa marca foi atingida quando a corrente máxima suportada pela bobina foi alcançada.

4.1.2 Bobina de cano PVC (análise AC)

Para a análise AC, a bobina foi conectada ao circuito RLC e este estava conectado com o gerador de funções, responsável por nos dar as formas de onda. Para garantir a consistência dos resultados, ajustamos a tensão do gerador de funções, começando com 1Vpp (1 volt de pico a pico), que corresponde a um valor de pico de 0,50V, e aumentamos gradualmente em incrementos de 1Vpp até atingir o limite máximo de 10Vpp, que é o valor suportado pelo gerador.

Figura 13: Campo AC com diferentes formas de onda.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Com o gráfico da Figura 13, temos que o gaussímetro utilizado não consegue detectar campos oscilantes com intensidades menores que 1,7 Oe, o que é esperado pelo modelo que usamos, então fomos aumentando a tensão até registrar o campo.

O campo magnético máximo gerado atingiu aproximadamente 5 Oe quando utilizada a forma de onda quadrada, demonstrando a capacidade do sistema de gerar campos magnéticos de intensidade considerável mesmo sob tensões moderadas. Esse valor de campo em 10Vpp corresponde a aproximadamente a tensão 5V na análise DC.

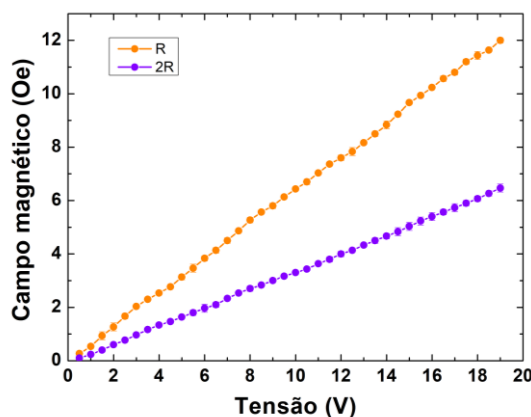
Ao comparar as três formas de onda testadas (senoidal, quadrada e dente de serra), observou-se que a forma de onda quadrada produziu o campo magnético mais intenso. Em relação à forma de onda senoidal, a quadrada apresentou um aumento de cerca de 20% na intensidade do campo. Por outro lado, a forma de onda dente de serra gerou um campo magnético menos intenso, com uma redução de aproximadamente 20% em comparação à senoidal. Esses resultados evidenciam que a escolha da forma de onda tem um impacto significativo na intensidade do campo

magnético gerado, destacando a importância da seleção adequada do sinal de excitação para otimizar o desempenho do sistema, considerando também o funcionamento de cada tipo de sinal, dado que as tensões RMS de cada forma de onda é diferente. Além disso, adotamos a transformação de V_m para V_{pp} para todos os gráficos usando o padrão adotado para a função seno.

4.1.3 Bobina de nylon (análise DC)

Analogamente fazendo os procedimentos da seção 4.1.1, tivemos os seguintes resultados para as configurações de R e 2R com essa nova bobina.

Figura 14: Campo magnético DC da bobina de nylon com distâncias diferentes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

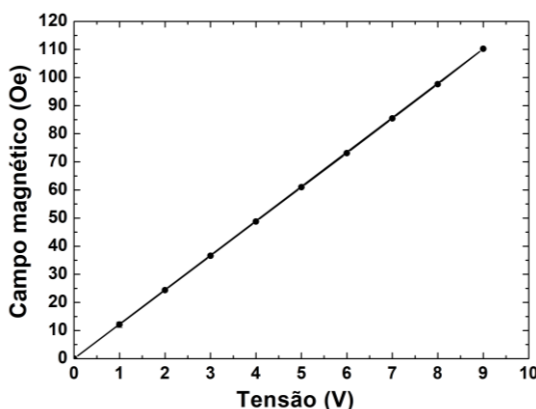
Observando a Figura 14, vemos que o comportamento do campo magnético se comporta analogamente como visto na de cano PVC, onde com o aumento da tensão o campo vai aumentando linearmente. Com o dobro da distância, vemos que o campo cai aproximadamente pela metade, o que corresponde o que a equação (16) nos indica. Com a distância de R e com 19V, obtivemos um campo de aproximadamente 12 Oe, já para a distância de 2R, conseguimos um campo de aproximadamente 6,4 Oe. O aumento da distância ao mesmo tempo que faz a intensidade do campo magnético diminuir, também aumenta um pouco a área de homogeneidade do campo no centro.

Com essa configuração chegamos mais próximo do valor teórico calculado, isso se deve ao fato de que a resistência diminuiu por não ter tantas voltas como a anterior, com isso, a eficiência do sistema aumentou.

4.1.3.1 Bobina de nylon com bitola AWG 16

A análise DC se deu da mesma forma que as anteriores, porém, optamos por modificar o raio para 5,9 cm para ganhar um pouco mais de homogeneidade no centro, mas não perder tanto a intensidade do campo magnético.

Figura 15: Campo magnético DC da bobina para o sistema de magnetometria.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

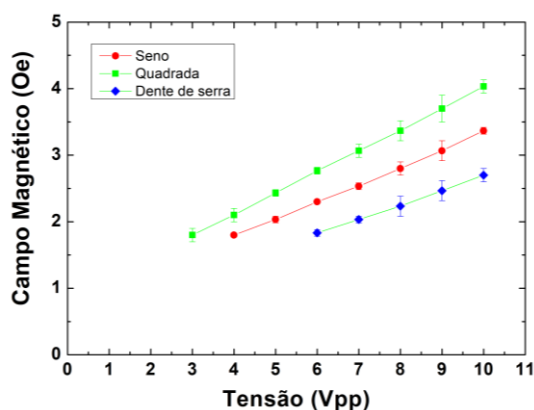
Observando a Figura 15, vemos que ela foi a que se aproximou mais do cálculo teórico, resultando em um campo de 110 Oe contra os 115 Oe teóricos, indicando se caso optássemos por deixar na configuração padrão, conseguiríamos chegar nos 115 Oe. Esse fato se deu a diminuição da resistência, pois utilizamos menos voltas que as anteriores, além de que a bitola do fio permitiu aumentar bastante a corrente, se compararmos com as anteriores, isso resultou que só precisamos de um pouco mais de 9V para alcançar o desempenho máximo dela.

Além disso, se observamos bem o gráfico, ele foi o que ficou mais linear, tanto que não conseguimos ver os traços do erro.

4.1.4 Bobina de nylon (análise AC)

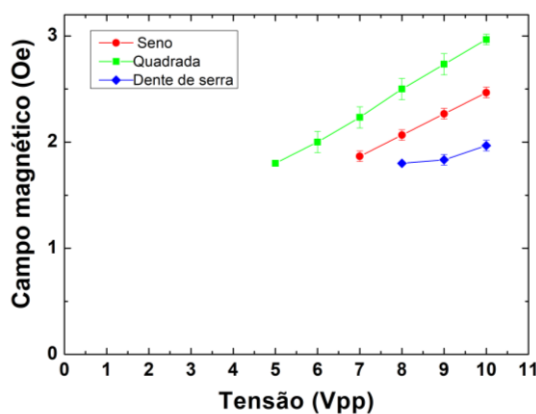
Analogamente ao que foi feito na análise AC da bobina de cano PVC, será feito nessa.

Figura 16: Campo AC com diferentes formas de onda para R.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Figura 17: Campo AC com diferentes formas de onda para 2R.



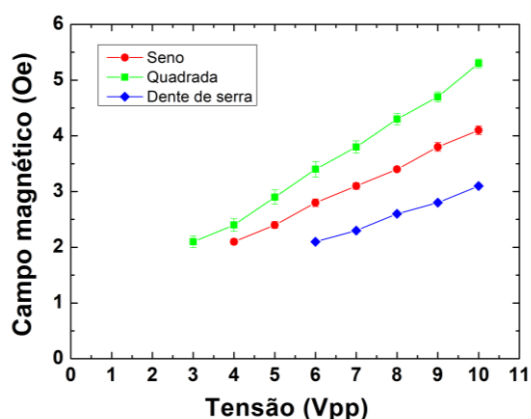
Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Observando as Figura 16 e Figura 17, vemos que o comportamento delas é o esperado, com a onda quadrada sendo a que gera o maior campo e a onda dente de serra a que gera o menor campo. As tensões iniciais não apresentam campo porque o fio requer uma maior corrente, algo que um gerador de funções não consegue fornecer.

4.1.4.1 Bobina de nylon com bitola AWG 16

A análise AC se deu da mesma forma que as anteriores, modificando a frequência para a da ressonância desse circuito.

Figura 18: Campo magnético AC da bobina para o sistema de magnetometria.



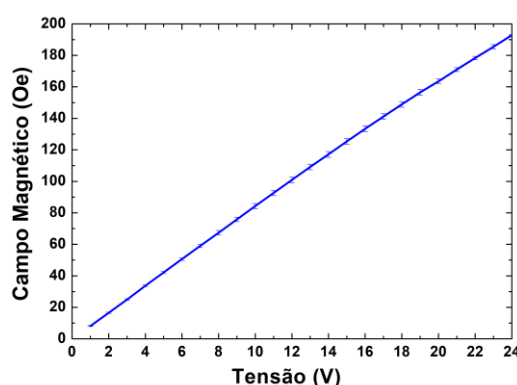
Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Vemos na Figura 18 o mesmo padrão de sempre, com a onda quadrada tendo a maior intensidade e a dente de serra a menor. Com essa bitola conseguimos um campo um pouco maior que 5 Oe com a onda quadrada. Novamente vemos que a limitação do campo se dá pela falta de potência do gerador de funções.

4.2 CAMPO MAGNÉTICO DO ELETROÍMÃ

Para o eletroímã, conectamos ele com a fonte de tensão regulável, definimos o valor de corrente e em seguida fomos subindo a tensão de 1 em 1V até os 24V que ele suporta, e medimos a intensidade do campo com o gaussímetro.

Figura 19: Campo magnético do eletroímã.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Vemos na Figura 19 que o eletroímã se comporta como deveria, tendo uma resposta linear à medida que vai aumentando a tensão, até chegar no campo máximo que foi em cerca de 195 Oe.

4.3 MAGNETOMETRIA DE EFEITOS OSCILANTES

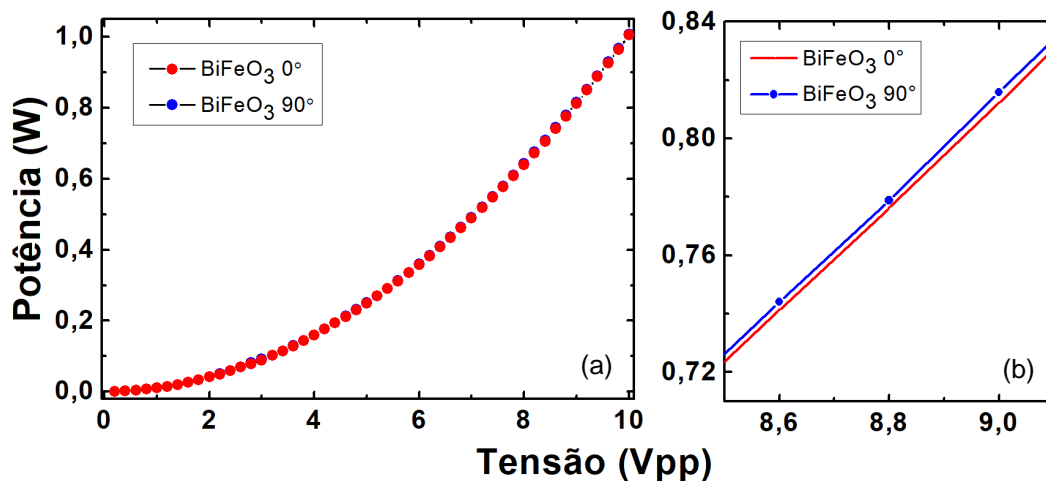
A configuração do sistema para o experimento se deu com o gerador de funções que está conectado com o circuito RLC colocado em 10Vpp na forma de onda senoidal com 395Hz. O eletroímã teve duas configurações, uma com ele desligado para verificarmos o comportamento do $BiFeO_3$ sem a presença de campo magnético e a outra com ele ligado ajustado para gerar um campo de 180Oe.

O segundo gerador de funções, o que está conectado de um lado do guia de onda, foi colocado na forma de onda de pulso, com um tempo de subida/descida de 10ns e as larguras de pulso de 25 – 100ns, aumentando 25ns. Como falado na seção 3.4, foram realizadas 3 medições para tirar a média, subindo a cada 200mVpp até chegar em 10Vpp para as 4 larguras de pulso e para cada uma das configurações:

- Eletroímã desligado e amostra em 0° ;
- Eletroímã desligado e amostra em 90° ;
- Eletroímã ligado e amostra em 0° ;
- Eletroímã ligado e amostra em 90° .

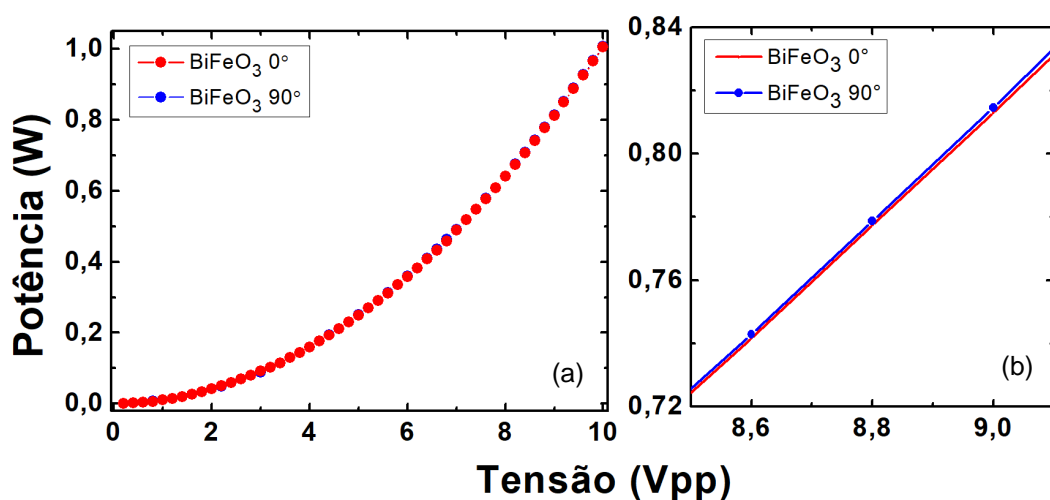
Após realizado o tratamento de dados, obtivemos os seguintes resultados.

Figura 20: Pulso de 25ns em 0Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

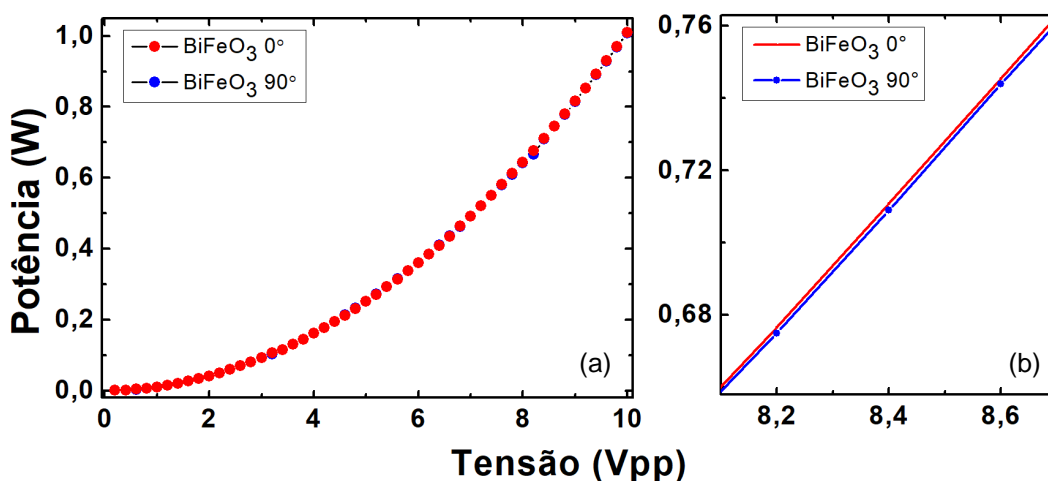
Figura 21: Pulso de 25ns em 180Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

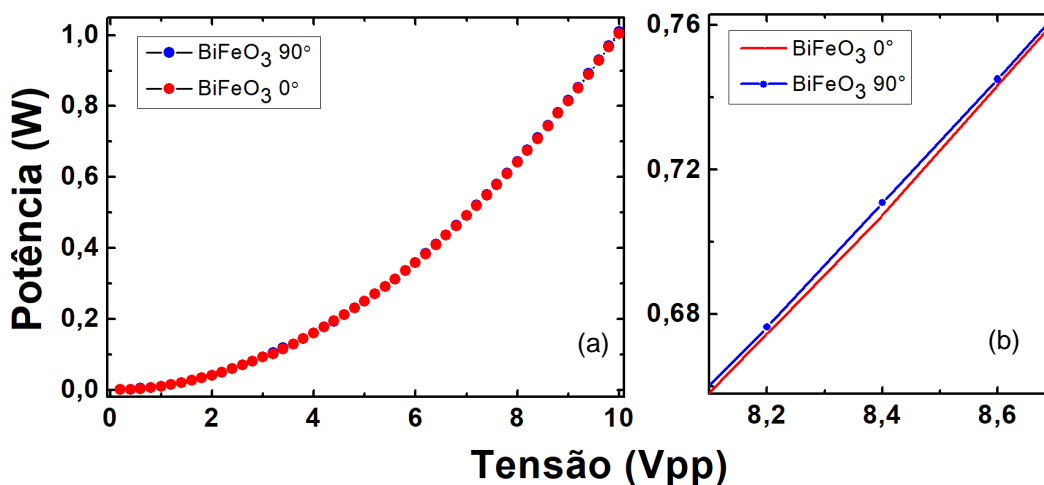
Observando a Figura 20 e a Figura 21, podemos ver que a potência em 25ns vai aumentando a medida que a intensidade do pulso vai ficando mais forte, dessa forma, destacando os gráficos em (b), pode ser observado que tanto para a amostra sem e com o campo do eletroímã, a potência de saída com a amostra em 90° foi mais forte do que ela em 0°, esse fato se deve ao alinhamento da amostra com o campo magnético das bobinas de Helmholtz.

Figura 22: Pulso de 50ns e campo de 0Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

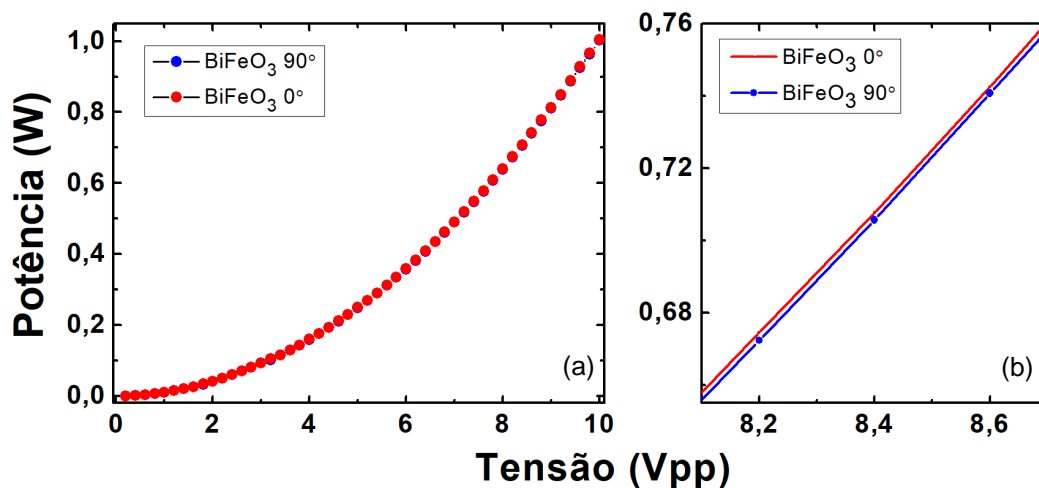
Figura 23: Pulso de 50ns e campo de 180Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

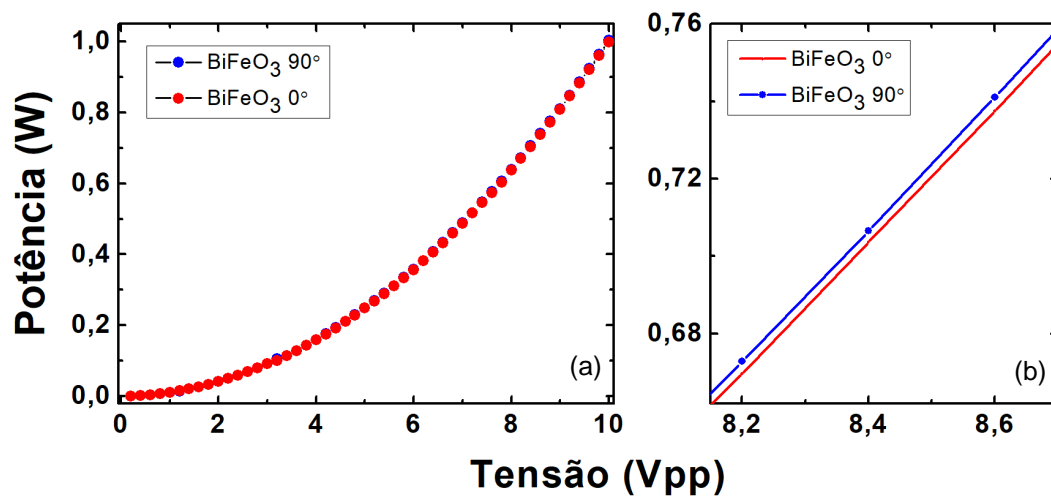
Observando a Figura 22 e Figura 23 para o pulso de 50ns, vemos que a potência é um pouco mais alta quando não tem campo magnético e a amostra está em 0°, porém, quando a amostra está em 90° e com o campo magnético, há um aumento na potência à medida que o pulso vai ficando mais forte, como podemos ver em (b).

Figura 24: Pulso de 75ns e campo de 0Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

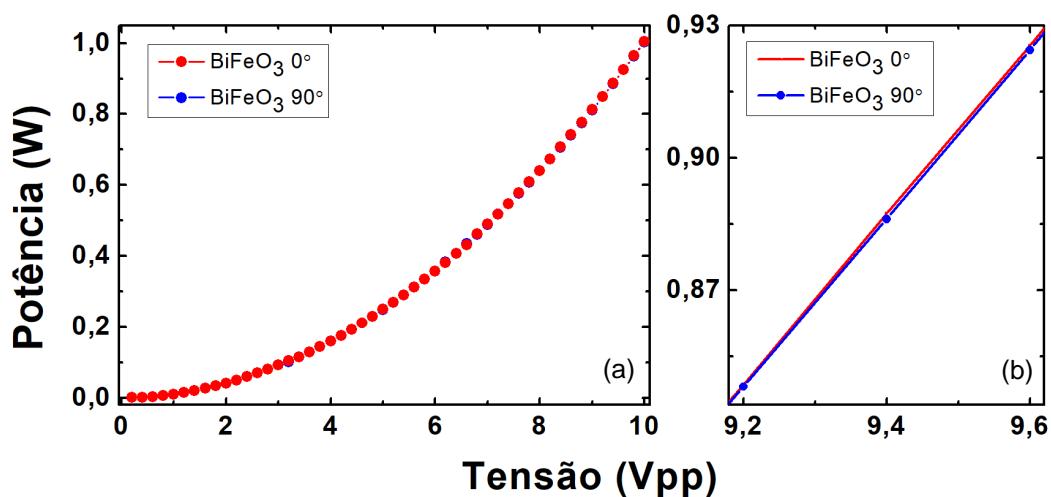
Figura 25: Pulso de 75ns e campo de 180Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

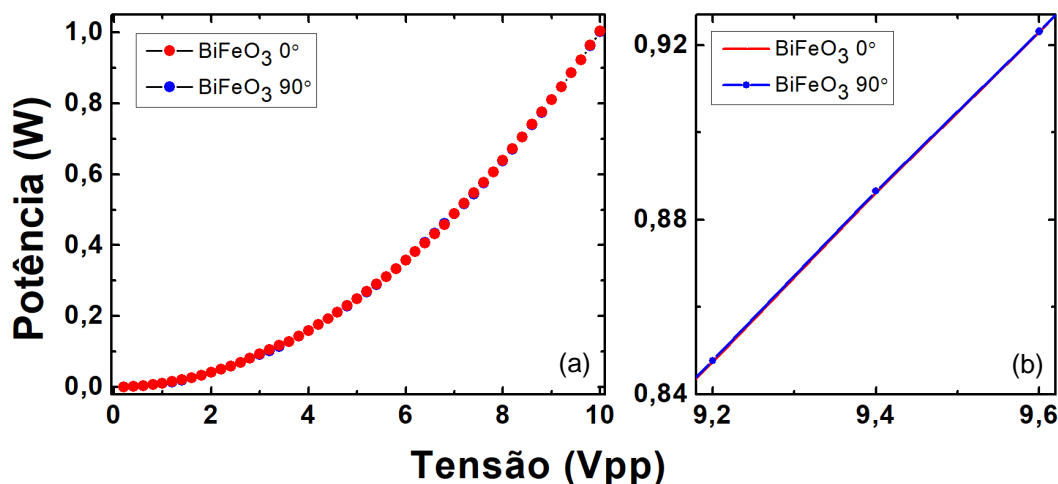
Com o pulso de 75ns da Figura 24 e Figura 25, podemos observar que o seu comportamento é semelhante ao de 50ns, onde sem o campo a potência foi maior com a amostra em 0°, porém com o campo magnético aplicado, a amostra de 90° resultou numa potência maior, como pode ser melhor visto em (b).

Figura 26: Pulso de 100ns e campo de 0Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Figura 27: Pulso de 100ns e campo de 180Oe.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2024.

Com o pulso de 100ns da Figura 26 e Figura 27, vemos que sem o campo magnético a potência foi maior com a amostra em 0°, como indica a linha vermelha em (b), já com o campo aplicado, podemos ver que a linha azul da amostra em 90° está acima da linha vermelha, indicando que a potência está aumentando, como vemos em (b). A linha azul ficou mais sutil nessa medida, porém, caso o campo magnético fosse maior, veríamos a distância entre essas linhas maiores, como nas outras medições.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a validação do sistema de magnetometria de efeitos oscilantes demonstraram a viabilidade da técnica para a análise de materiais magnetoativos, com destaque para a amostra de BiFeO₃. A construção e otimização das bobinas de Helmholtz foram fundamentais para garantir um campo magnético homogêneo e controlado, permitindo a análise precisa das amostras, pois foi visto que as escolhas dos componentes e a configuração do sistema têm um impacto significativo na intensidade e na homogeneidade do campo magnético gerado, bem como na resposta da amostra aos campos aplicados.

Inicialmente, a análise das bobinas de Helmholtz revelou que a bobina de cano PVC, embora funcional, apresentou limitações devido à alta resistência do fio AWG 31 e à dificuldade de moldar no tamanho que precisávamos. A transição para a bobina de nylon com fio AWG 16 permitiu atingir campos magnéticos mais intensos (até 110

Oe em DC) e uma maior eficiência, aproximando-se dos valores teóricos calculados. Além disso, a análise AC mostrou que a forma de onda quadrada gerou campos magnéticos mais intensos em comparação com as formas senoidal e dente de serra, com um aumento de aproximadamente 20% em relação à senoidal.

A integração dos eletroímãs ao sistema permitiu a geração de campos magnéticos de até 195 Oe, complementando o campo das bobinas de Helmholtz e garantindo a homogeneidade necessária para os experimentos. A análise da amostra de BiFeO_3 sob diferentes condições (com e sem campo magnético, em orientações de 0° e 90° , em relação ao guia de ondas reto) revelou que a resposta da amostra é influenciada tanto pela intensidade do campo aplicado quanto pela orientação da amostra em relação ao campo magnético.

Em particular, observou-se que a potência de saída foi maior quando a amostra estava alinhada com o campo magnético (90° em relação ao guia de ondas), destacando a importância do alinhamento no estudo de materiais magnetoativos. Esses resultados corroboram a eficácia do sistema desenvolvido e sua capacidade de detectar e analisar respostas magnéticas em materiais multiferroicos como o BiFeO_3 .

Outro ponto importante foi o aumento da potência do BFO com a aplicação do campo magnético, especialmente para os pulsos de 50ns e 75ns. Isso sugere que o BFO é sensível a mudanças na corrente elétrica, essa propriedade pode permitir o seu uso em sistemas de armazenamento de energia onde o campo magnético melhora a eficiência de armazenamento e liberação de energia, possibilitando baterias com maior densidade de energia e ciclos de vida mais longos, além disso, podem ser usados no desenvolvimento de atuadores e sensores que detectam campos magnéticos.

Em síntese, o sistema de magnetometria de efeitos oscilantes mostrou-se eficiente na geração de campos magnéticos homogêneos e concentrados, além de permitir a análise detalhada da resposta de materiais magnetoativos. Os resultados obtidos abrem caminho para futuros estudos e otimizações, contribuindo para o avanço da técnica de magnetometria e suas aplicações em materiais magnéticos eletrônicos.

REFERÊNCIAS

BAHRAMI, Abasalt; TANAKA, Leonardo Y.; MASSUCATTO, Ricardo C.; LAURINDO, Francisco R. M.; AIELLO, Clarice D. Automated 1D Helmholtz coil design for cell biology: Weak magnetic fields alter cytoskeleton dynamics. **arXiv**, [s. l.], jun. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2406.19555. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2406.19555>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BANAS, Lubomir; BRZEZNIAK, Zdzislaw; NEKLYUDOV, Mikhail; PROHL, Andreas. **Stochastic Ferromagnetism: Analysis and Numerics**. 1. ed. Berlin: De Gruyter, 2013. 248 p. (De Gruyter Studies in Mathematics, v. 58). ISBN: 9783110307108. E-book. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110307108/html>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BIASOTTO, Glenda. **Síntese e caracterização de nanoestruturas e filmes finos de $BiFeO_3$ modificado com samário visando aplicação em memórias de múltiplos estados**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em química) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química de Araraquara, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6ec9fb44-f9e2-408d-9573-817c56bf28d7/content>. Acesso em: 4 dez. 2024.

BUDKER, Dmitry; ROMALIS, Michael. Optical magnetometry. **Nature physics**, v. 3, n. 4, p. 227-234, 2007. DOI: 10.48550/arXiv.physics/0611246. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/physics/0611246>. Acesso em: 16 dez. 2024.

CAMEJO, Yosdan Martínez. **Estudo das propriedades físicas de sistemas multiferróicos baseados em Ferrita de Bismuto**. 2017. 100 p. Dissertação (Mestrado em física) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: 10.14393/ufu.di.2017.415. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/19799>. Acesso em: 11 jan. 2025.

CARDONA, Juan David Alzate; SUÁREZ, Daniel Sabogal; OSORIO, Javier Torres; PARRA, Elisabeth Restrepo. MFV: Application software for the visualization and characterization of the DC magnetic field distribution in circular coil systems. **arXiv**, [s. l.], abr. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1904.04327. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1904.04327>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CARRARA, Valdemir. Projeto de Bobinas de helmholtz em 3 eixos para simulação de campo geomagnético. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: ABCM, 2010. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1882.pdf>. Acesso em: 25 set. 2024.

DUMAS, Randy. K.; HOGAN, Tom. Recent Advances in SQUID Magnetometry. In: FRANCO, Victorino; DODRILL, Brad (eds.). **Magnetic measurement techniques for materials characterization**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 39–62. DOI: 10.1007/978-3-030-70443-8_3. Disponível em:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-70443-8_3. Acesso em: 7 nov. 2024.

FERNÁNDEZ PINTO, Janeth. **Magnetometria por efeito Hall**. 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em física) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6921>. Acesso em: 6 jan. 2025.

HALLIDAY, David.; RESNICK, Robert.; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. v. 3.

HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; DIAS, Adrielson; HOLANDA, José. Transferring optical characteristics into magnetic matter through magneto-optical interactions. **Applied Optics**, [s. l.] v. 63, n. 17, p. 4518-4521, jun. 2024a. DOI: 10.1364/AO.522067. Disponível em: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-63-17-4518>. Acesso em: 2 dez. 2024.

HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; DIAS, Adrielson; JOSÉ, André; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Detecting Magneto-Optical Interactions in Nanostructures. **Journal of Material Science and Technology Research**, [s. l.], v. 11, p. 68-74, set. 2024b. DOI: 10.31875/2410-4701.2024.11.08. Disponível em: <https://zealpress.com/jms/index.php/jmstr/article/view/597>. Acesso em: 2 dez. 2024.

HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Exploring the effects of ultraviolet radiation on the properties of Fe₃O₄/PANI nanostructures. **Next Materials**, [s. l.], v. 4, p. 100209, jul. 2024c. DOI: 10.1016/j.nxmate.2024.100209. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949822824001060>. Acesso em: 3 dez. 2024.

HOLANDA, José. Analyzing the magnetic interactions in nanostructures that are candidates for applications in spintronics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. l.], v. 54, n. 24, p. 245004, mar. 2021b. DOI: 10.1088/1361-6463/abeb40. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/abeb40>. Acesso em: 12 nov. 2024.

HOLANDA, José; MAIOR, Daniel Souto; SANTOS, Obed Alves; AZEVEDO, Antônio; REZENDE, Sérgio Machado. Evidence of phonon pumping by magnonic spin currents. **Applied Physics Letters**, [s. l.], v. 118, n. 2, p. 022409, jan. 2021a. DOI: 10.1063/5.0035690. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/118/2/022409/39830/Evidence-of-phonon-pumping-by-magnonic-spin?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 12 nov. 2024.

HOLANDA, José; SANTOS, Obed Alves; REZENDE, Sérgio Machado. Thermal Control of the Intrinsic Magnetic Damping in a Ferromagnetic Metal. **Physical Review Applied**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 014051, jul. 2021c. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014051>. Disponível em: <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.16.014051>. Acesso em: 12 nov. 2024.

LI, Nan; XIE, Keyu; HUANG, Haitao. Ferroelectric materials for high energy density batteries: Progress and outlook. **ACS Energy Lett**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 4357-4370, out. 2023. DOI: 10.1021/acsenergylett.3c01643. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsenergylett.3c01643>. Acesso em: 2 nov. 2024.

LOWRIE, William. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

MENDES, Joaquim Bonfim Santos; REZENDE, Sérgio Machado; HOLANDA, José. Rashba-Edelstein magnetoresistance in two-dimensional materials at room temperature. **Physical Review B**, [s. l.], v. 104, n. 1, p. 014408, jul. 2021. DOI: 10.1103/PhysRevB.104.014408. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.104.014408>. Acesso em: 5 nov. 2024.

OLIVEIRA, Thiago Ferro; HILDEVER, Luana; JOSÉ, André; HOLANDA, José. Unraveling oscillations at ferro(para)magnetic and non-collinear antiferromagnetic interfaces. **The European Physical Journal B**, [s. l.], v. 97, n. 9, p. 142, set. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjb/s10051-024-00789-y>. Acesso em: 2 dez. 2024.

PUDALOV, Vladimir M. Measurements of the magnetic properties of conduction electrons. **Physics-Uspekhi**, [s. l.], v. 64, n. 1, p. 3, jan. 2021. DOI: 10.3367/UFNe.2020.05.038771. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.3367/UFNe.2020.05.038771>. Acesso em: 5 nov. 2024.

PUHAN, Ashalata; BHUSHAN, Bhavya; NAYAK, Arpan Kumar; ROUT, Dibyaranjan. BiFeO₃-based multiferroic materials and their properties. In: THOMAS, Sabu; KALARIKKAL, Nandakumar; ABRAHAM, Ann Rose. (eds.). **Fundamentals and Properties of Multifunctional Nanomaterials**. Elsevier, 2021, p. 275-293. (Micro and Nano Technologies). DOI: 10.1016/B978-0-12-822352-9.00008-0. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128223529000080>. Acesso em: 5 dez. 2024.

REZENDE, Sérgio Machado; MAIOR, Daniel Souto; SANTOS, Obed Alves; HOLANDA, José. Theory for phonon pumping by magnonic spin currents. **Physical Review B**, [s. l.], v. 103, n. 14, p. 144430, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.144430>. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.103.144430>. Acesso em: 3 nov. 2024.

ROBERT, René. Bobinas de Helmholtz. **Revista Brasileira de ensino de física**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 40-44, mai. 2003. DOI: 10.1590/S1806-11172003000100005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/jCC3f7CwQg43W5b9KdcHqXN/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SCOTT, James F. Room-temperature multiferroic magnetoelectrics. **NPG Asia Materials**, [s. l.], v. 5, n. 11, p. e72-e72, nov. 2013. DOI:

<https://doi.org/10.1038/am.2013.58>. Disponível em:
<https://www.nature.com/articles/am201358>. Acesso em: 6 nov. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; DEGIORGI, Sérgio V. B.; HOLANDA, José. Experimental Observation of a Magnetic Interfacial Effect. **Advanced Materials Interfaces**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 2202143, fev. 2023e. DOI: 10.1002/admi.202202143. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/admi.202202143>. Acesso em: 3 out. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; DIAS, Adrielson de A.; RODRIGUES, Alexandre R.; CHÁVEZ, Francisco E.; OLIVEIRA, Rafael A. de; HOLANDA, José. An experimental analysis from the magnetic interactions in nanowire arrays. **Applied Nanoscience**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 5559-5562, jan. 2023a. DOI: 10.1007/s13204-023-02769-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13204-023-02769-7>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; HILDEVER, Luana M. C. S.; SANTOS, Maria C. G.; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Analyzing the Magnetic Influence on Magneto-optical Interactions. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 951-955, mar. 2023c. DOI: 10.1007/s10948-023-06530-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-023-06530-7>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; HOLANDA, José. One analytical approach of Rashba-Edelstein magnetoresistance in 2D materials. **The European Physical Journal B**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 47, abr. 2023d. DOI: 10.1140/epjb/s10051-023-00516-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1140/epjb/s10051-023-00516-z>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; SILVA, André J. C.; DIAS, Adrielson de A.; RODRIGUES, Alexandre R.; HOLANDA, José. Unraveling the Spin Current Hermiticity. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 58, n. 30, p. 12251-12257, ago. 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08807-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-023-08807-7>. Acesso em: 15 dez. 2024.

WANG, Nan; LUO, Xudong; HAN, Lu; ZHANG, Zhiqiang; ZHANG, Renyun; OLIN, Håkan; YANG, Ya. Structure, performance, and application of BiFeO₃ nanomaterials. **Nano-micro letters**, [s. l.], v. 12, p. 1-23, mar. 2020. DOI: 10.1007/s40820-020-00420-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-020-00420-6>. Acesso em: 2 dez. 2024.

XU, Bin; ÍÑIGUEZ, Jorge; BELLAICHE, Laurent. Designing lead-free antiferroelectrics for energy storage. **Nature communications**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 15682, mai. 2017. DOI: 10.1038/ncomms15682. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms15682>. Acesso em: 2 dez. 2024.