



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

LUANA MARIA CARVALHO DA SILVA HILDEVER

Sistemas Microeletromecânicos: Uma Abordagem Baseada em Materiais Magnéticos

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

LUANA MARIA CARVALHO DA SILVA HILDEVER

Sistemas Microeletromecânicos: Uma Abordagem Baseada em Materiais Magnéticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Física, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

Área de concentração: Optoeletrônica
Orientador: Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior

Cabo de Santo Agostinho - PE

2023

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

H643s Hildever, Luana Maria Carvalho da Silva.
Sistemas microeletromecânicos: uma abordagem baseada em materiais magnéticos / Luana Maria Carvalho da Silva Hildever. – Cabo de Santo Agostinho, 2025.
106 f.; il.

Orientador(a): José Holanda da Silva Júnior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Sistemas microeletromecânicos . 2. Materiais magnéticos. 3. Campos magnéticos. 4. Materiais nanoestruturados I. Júnior, José Holanda da Silva, orient. II. Título

CDD 621

LUANA MARIA CARVALHO DA SILVA HILDEVER

Sistemas Microeletromecânicos: Uma Abordagem Baseada em Materiais Magnéticos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Física, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

Aprovada em: 26/02/2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior – UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Francisco Estrada Chávez – UMSNH
Examinador externo

Prof. Dr. Sérgio Vladimir Barreiro DeGiorgi – UFRPE
Examinador interno

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, Valéria de Albuquerque Carvalho da Silva Hildever, por todo o amor, apoio e inspiração que me proporcionou ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, à minha mãe, Valéria Hildever, e aos meus familiares, pelo amor incondicional, pelo apoio constante e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Ao meu noivo, Gabriel Moraes, meu eterno obrigada por sua paciência, carinho e por estar ao meu lado em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis. Seu apoio e incentivo foram fundamentais para o êxito deste trabalho.

Aos amigos que conheci na pós-graduação, agradeço pela amizade, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração que tornaram essa jornada mais leve e significativa. Vocês foram essenciais para que eu superasse os desafios com um sorriso no rosto.

Ao professor José Holanda, meu orientador, minha imensa gratidão pela dedicação, pelos ensinamentos e pela paciência ao longo de todo esse processo. Sua orientação foi fundamental para o sucesso deste trabalho.

Ao Núcleo de Optoeletrônica e Spintrônica (NOS), meu grupo de pesquisa, agradeço pela colaboração, pelo ambiente acolhedor e por todo o aprendizado compartilhado. Foi um privilégio fazer parte deste grupo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física e a todo o corpo docente, meu reconhecimento pelo conhecimento transmitido e pelo suporte essencial durante esses dois anos de mestrado.

Por fim, à FACEPE, pelo apoio financeiro que foi crucial para a realização desta pesquisa.

Muito obrigada!

RESUMO

Os Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) impulsionam avanços significativos na spintrônica e na optoeletrônica, possibilitando a criação de dispositivos compactos que integram propriedades mecânicas, eletrônicas e ópticas. A viabilização dessa tecnologia depende do uso de materiais com características precisas em escalas específicas. Neste contexto, esta dissertação investiga o potencial dos MEMS com ênfase em materiais magnéticos como elemento central. A pesquisa concentra-se no estudo de nanomateriais, destacando principalmente as interações magneto-ópticas que ocorrem nesses materiais. Realizamos simulações numéricas em estruturas de nanofios magnéticos, o que nos permitiu classificá-las em dois estados magneto-ópticos distintos: aqueles em que as interações magneto-ópticas predominantes são desmagnetizantes (PMOID) e aqueles em que as interações predominantes são magnetizantes (PMOIM). Além disso, conduzimos um estudo pioneiro que demonstrou a transferência de características ópticas para materiais magnéticos por meio de interações magneto-ópticas, ampliando o entendimento sobre a integração entre propriedades ópticas e magnéticas. Desenvolvemos um método inovador para a síntese de nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ utilizando radiação ultravioleta, evidenciando seu potencial para a produção de filmes finos com alta estabilidade, além de excelentes propriedades magnéticas e condutivas. Observamos oscilações amortecidas nessas nanoestruturas, o que revelou a presença de uma nova interação, a qual denominamos interação químico-quântica-magnética. Adicionalmente, investigamos as propriedades quânticas-magnéticas de partículas de aluminato de cálcio e ítrio dopadas com metais de transição, revelando características magnéticas inéditas que ainda não haviam sido documentadas na literatura. Demonstramos também que interfaces ferro(para)magnéticas não colineares podem influenciar os sinais oscilantes observados na magnetorresistência gigante, sugerindo que essa observação pode representar uma forma de transmitir informações codificadas por meio da magnetorresistência. Como contribuição significativa, desenvolvemos um analisador para sistemas microeletromecânicos, com e sem materiais magnéticos, permitindo avaliar e otimizar a interação entre essas tecnologias.

Palavras-chave: Sistemas microeletromecânicos (MEMS); materiais magnéticos; interações magneto-ópticas; nanomateriais.

ABSTRACT

Microelectromechanical Systems (MEMS) are driving significant advances in spintronics and optoelectronics, enabling the creation of compact devices that integrate mechanical, electronic, and optical properties. The viability of this technology depends on the use of materials with precise characteristics at specific scales. In this context, this dissertation investigates the potential of MEMS with an emphasis on magnetic materials as a central element. The research focuses on the study of nanomaterials, highlighting mainly the magneto-optical interactions that occur in these materials. We performed numerical simulations on magnetic nanowire structures, which allowed us to classify them into two distinct magneto-optical states: those in which the predominant magneto-optical interactions are demagnetizing (PMOID) and those in which the predominant interactions are magnetizing (PMOIM). Furthermore, we conducted a pioneering study that demonstrated the transfer of optical characteristics to magnetic materials through magneto-optical interactions, expanding the understanding of the integration between optical and magnetic properties. We developed an innovative method for the synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ nanostructures using ultraviolet radiation, evidencing their potential for the production of thin films with high stability, in addition to excellent magnetic and conductive properties. We observed damped oscillations in these nanostructures, which revealed the presence of a new interaction, which we called chemical-quantum-magnetic interaction. Additionally, we investigated the quantum-magnetic properties of calcium yttrium aluminate particles doped with transition metals, revealing novel magnetic characteristics that had not yet been documented in the literature. We also demonstrate that non-collinear ferro(para)magnetic interfaces can influence the oscillating signals observed in giant magnetoresistance, suggesting that this observation may represent a way to transmit encoded information through magnetoresistance. As a significant contribution, we developed an analyzer for microelectromechanical systems, with and without magnetic materials, allowing to evaluate and optimize the interaction between these technologies.

Keywords: Microelectromechanical systems (MEMS); magnetic materials; magneto-optical interactions; nanomaterials.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Princípio de funcionamento dos sistemas microeletromecânicos.
- Figura 2.** Sistemas microeletromecânicos e suas potenciais aplicações.
- Figura 3.** (a) nanopartículas metálicas, (b) nanotubos de carbono, (c) nanofios e (d) nanocompósitos poliméricos.
- Figura 4.** Materiais magnéticos e seus domínios.
- Figura 5.** Efeito Faraday.
- Figura 6.** Efeito Kerr.
- Figura 7.** Interação spin-órbita.
- Figura 8.** Efeito Hall de spin.
- Figura 9.** Magnetorresistência gigante (GMR).
- Figura 10.** Magnetometria de Amostra Vibrante.
- Figura 11.** Espectroscopia Raman.
- Figura 12.** Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Figura 13.** Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).
- Figura 14.** Difratometria de Raios X (DRX).
- Figura 15.** Medidor de curvas de magnetização.
- Figura 16.** Espectrômetro de absorção magneto-óptica.
- Figura 17.** Sintetizador de nanoestruturas com radiação ultravioleta.
- Figura 18.** Esquema de um nanofio com grãos elipsoidais, influenciados por campo magnético e luz branca.
- Figura 19.** Mapas de interação magneto-ópticas em termos do campo magnético aplicado a diferentes campos críticos de desmagnetização.
- Figura 20.** Mapas de interação para diferentes campos críticos de desmagnetização e magnetização.
- Figura 21.** Dependência angular de interações magneto-ópticas para diferentes ângulos.
- Figura 22.** Interações magneto-ópticas (I_{PMOID} e I_{PMOIM}) em função do ângulo θ .
- Figura 23.** Arranjo hexagonal de nanofios.
- Figura 24.** Curva Δm_N (a) experimental. (b) teórica para arranjos de nanofios de cobre.
- Figura 25.** Curva Δm_N (a) experimental. (b) teórica para arranjos de nanofios de ferro.

Figura 26. Curva Δm_N (a) experimental. (b) teórica para arranjos de nanofios de níquel.

Figura 27. Mapas de interação obtidos por meio de interações puramente magnéticas.

Figura 28. Mapas de interação obtidos por meio de interações magneto-ópticas.

Figura 29. Mapas de interação obtidos por meio de interações magneto-ópticas com luz branca polarizada circularmente.

Figura 30. Estrutura da magnetita.

Figura 31. Estrutura molecular da polianilina.

Figura 32. Difração de raios X para amostras puras de Fe_3O_4 e PANI sintetizadas sob radiação UV.

Figura 33. (a) Micrografia de uma nanopartícula Fe_3O_4 (b) aglomerados de nanoestruturas de Fe_3O_4 /PANI.

Figura 34. Termogramas para amostras de nanoestruturas Fe_3O_4 /PANI.

Figura 35. Calorimetria para amostras de nanoestruturas Fe_3O_4 /PANI.

Figura 36. Loops de histerese para amostras de nanoestruturas Fe_3O_4 /PANI.

Figura 37. Comportamento oscilatório da magnetita.

Figura 38. Medições de curvas $\Delta m(H)$ realizadas em nanoestruturas de Fe_3O_4 /PANI.

Figura 39. Medições de curvas $\Delta m(H)$ com grandes oscilações realizadas em nanoestruturas de Fe_3O_4 /PANI.

Figura 40. Resultados obtidos com as equações (4) e (5) utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 2.

Figura 41. Medições de curvas $\Delta m(H)$ realizadas no último grupo de nanoestruturas de Fe_3O_4 /PANI.

Figura 42. Medições de difração de raios X de amostras de $CaYAl_3O_7$ puras e dopadas com Ni, Fe e Co, comparadas com o padrão ICSD#09438.

Figura 43. Medidas de microscopia confocal Raman das amostras de $CaYAl_3O_7-X$ (X = Ni, Fe e Co).

Figura 44. Medições da curva de histerese para os três materiais: (a) $CaYAl_3O_7-Ni$, (b) $CaYAl_3O_7-Fe$ e (c) $CaYAl_3O_7-Co$.

Figura 45. Esquema experimental utilizado para medir a magnetorresistência no $Py/IrMn_3$ e $Pt/IrMn_3$.

Figura 46. (a) DRX em uma amostra de $MgO/IrMn_3$ (20 nm)/Ti(2 nm), (b) MET da amostra $MgO/IrMn_3/Py$, (c) mudança do campo de polarização cambial em função da temperatura e (d) curvas de tensão em função da corrente elétrica.

Figura 47. Variação da magnetorresistência em função do campo magnético em três direções cristalográficas nas amostras de IrMn₃/Py e IrMn₃/Pt.

Figura 48. Oscilações na variação da magnetorresistência em função do campo magnético em três direções cristalográficas nas amostras de IrMn₃/Py e IrMn₃/Pt.

Figura 49. Analisador de sistemas microeletromecânicos com e sem materiais magnéticos.

Figura 50. (a) Pulso transmitido através de uma amostra de NiO/Pt e (b) a transformada de Fourier correspondente ao pulso transmitido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diâmetro médio das amostras sintetizadas e todas as temperaturas.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas equações (8) e (9) para obtenção dos resultados apresentados na Figura 30 para $t = 60$ e 120 min.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	MEMS: ORIGEM, FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES	17
2.1	DESENVOLVIMENTO DA MICROUSINAGEM E MEMS.....	17
2.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	NANOMATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES INOVADORAS.....	22
3.2	DINÂMICA DE MAGNETIZAÇÃO.....	23
3.3	INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS.....	24
3.4	INTERAÇÃO SPIN-ÓRBITA.....	26
3.5	EFEITO HALL DE SPIN.....	27
3.6	MAGNETORRESISTÊNCIA GIGANTE.....	27
4	TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	30
4.1	MAGNETOMETRIA DE AMOSTRA VIBRANTE (MAV).....	30
4.2	ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	31
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	32
4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO (MET).....	33
4.5	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX).....	34
4.6	NOSSAS CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	35
4.6.1	Medidor de Curvas de Magnetização Isotérmica	35
4.6.2	Espectrômetro de Absorção Magneto-Óptica	36
4.6.3	Sintetizador de Nanoestruturas com Radiação Ultravioleta	37
5	RESULTADOS	38
5.1	INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS EM NANOFIOS.....	38
5.1.1	Nanofios com Partículas de Domínio Único	42
5.1.2	Nanofios de Cobalto, Ferro e Níquel	46
5.3	TRANSFERINDO CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS PARA NANOPARTÍCULAS ESFÉRICAS DE MAGHEMITA ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$).....	52

5.4	INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS EM NANOESTRUTURAS DE Fe ₃ O ₄ /PANI.....	56
5.4.1	Magnetita (Fe₃O₄).....	56
5.4.2	Polianilina (PANI).....	57
5.4.3	Magnetita/Polianilina (Fe₃O₄/PANI).....	58
5.4.4	Sintetizando Nanoestruturas de Fe₃O₄/PANI com Radiação Ultravioleta.....	59
5.4.5	Interações Químico-Quânticas-Magnéticas.....	64
5.5	EFEITOS MAGNÉTICOS-QUÂNTICOS EM PARTÍCULAS DE CaYAl ₃ - O ₇ -X (X = Ni, Fe, Co).....	72
5.6	OSCILAÇÕES EM INTERFACES FERRO(PARA)MAGNÉTICAS E AN- TIFERROMAGNÉTICAS NÃO COLINEARES.....	76
5.7	ANALISADOR DE SISTEMAS MICROELETROME CÂNICOS.....	83
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) têm se tornado componentes indispensáveis no avanço da tecnologia, devido à sua capacidade de integrar elementos mecânicos, elétricos e eletrônicos em uma única estrutura microscópica. A miniaturização proporcionada pelos MEMS não só melhora a eficiência, como também permite a criação de sistemas complexos que podem ser fabricados em larga escala e a custos reduzidos. Sua importância está diretamente relacionada à ampla gama de aplicações, integrando sensores, atuadores e circuitos eletrônicos em dispositivos multifuncionais. A versatilidade dos MEMS, aliada aos avanços contínuos na microfabricação, expande suas possibilidades, tornando-os essenciais para o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficientes em diversos setores.

Os MEMS têm um impacto crescente em áreas emergentes como a spintrônica e a optoeletrônica, que exploram, respectivamente, o comportamento dos elétrons e a interação entre luz e eletrônicos. Na spintrônica, onde os spins dos elétrons são utilizados para otimizar o armazenamento e o processamento de dados, os MEMS são fundamentais, proporcionando miniaturização e precisão necessária para o desenvolvimento de dispositivos mais robustos. Na optoeletrônica, os MEMS são cruciais para o desenvolvimento de moduladores ópticos, interruptores e displays de alta resolução. Ao manipular feixes de luz com microespelhos e atuadores precisos, os MEMS aumentam a eficiência em comunicações ópticas e dispositivos fotônicos, além de facilitar a miniaturização de componentes, melhorando o desempenho e a flexibilidade em sistemas de fibra óptica.

Apesar dos avanços significativos, a implementação de MEMS ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos relevantes. A produção de dispositivos altamente precisos e confiáveis, aliada à demanda por redução de custos e maior diversidade de aplicações, requer processos de fabricação mais avançados e acessíveis. Ademais, setores emergentes como a spintrônica e a optoeletrônica ainda são pouco explorados no contexto dos MEMS, devido à complexidade de incorporar funcionalidades específicas nesses dispositivos miniaturizados.

Com base nisso, a estrutura desta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2, apresenta-se uma revisão histórica dos sistemas microeletromecânicos (MEMS), abordando suas áreas de aplicação, princípios de funcionamento e sua relevância industrial. No Capítulo 3, realizamos uma breve revisão bibliográfica, destacando os efeitos e conceitos mais relevantes para a contribuição deste trabalho. O Capítulo 4 discute as técnicas experimentais utilizadas, incluindo aquelas amplamente adotadas na literatura e aquelas adaptadas e desenvolvidas especificamente para este estudo, visando a obtenção de resultados específicos. No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos e a contribuição deste trabalho para a comunidade científica. Por fim, no Capítulo 6, são expostas as conclusões gerais e as perspectivas para futuros estudos.

2 MEMS: ORIGEM, FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES

O termo MEMS, que surgiu nos Estados Unidos, é conhecido na Europa como Tecnologia de Microsistemas (MST) e no Japão como Micromáquinas. Embora as nomenclaturas variem entre as regiões, todos os dispositivos MEMS compartilham um princípio comum em sua fabricação. Eles são desenvolvidos utilizando técnicas avançadas de microfabricação, como fotolitografia de alta resolução e micromaquinagem, que podem incluir diversas abordagens para a produção dos componentes (Dornfeld *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2021). Essas técnicas envolvem processos sofisticados que permitem a integração de elementos mecânicos e eletrônicos em uma escala microscópica. A capacidade de adaptar essas técnicas a diferentes necessidades de produção é um dos fatores que contribui para a versatilidade e a inovação dos sistemas MEMS. Pesquisas e desenvolvimentos contínuos na área têm aprimorado essas técnicas ao longo do tempo (Judy; Khatokar *et al.*, 2001; Spearing, 2000).

Um dos avanços mais significativos na tecnologia MEMS é a miniaturização contínua de seus componentes, permitindo a criação de dispositivos cada vez menores e mais precisos. Nos últimos anos, o campo dos MEMS tem experimentado um progresso significativo, impulsionado por pesquisas e inovações tecnológicas de ponta (Ko, 2007). Novos materiais com propriedades excepcionais, como grafeno, nanotubos de carbono e silício policristalino, estão sendo incorporados aos sistemas MEMS (Boyce *et al.*, 2007; Hutchison *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2017). Esses materiais conferem maior resistência, flexibilidade e condutividade, resultando em dispositivos duráveis e eficientes. Além disso, técnicas de fabricação em massa, como a moldagem por injeção (Wang *et al.*, 2021), têm tornado a produção de MEMS mais acessível e econômica, reduzindo custos e democratizando o acesso a essa tecnologia.

2.1 DESENVOLVIMENTO DA MICROUSINAGEM E MEMS

Para entender o desenvolvimento dos MEMS, é essencial explorar sua relação com a microusinagem, uma vez que tanto a história quanto a definição dos MEMS estão intrinsecamente ligadas ao desenvolvimento dessa técnica de

fabricação. A microusinagem é um processo de alta precisão que possibilita a criação de microestruturas em diversos materiais, como metais, cerâmicas e polímeros. Ela é amplamente utilizada em indústrias que requerem componentes extremamente pequenos e precisos, como a eletrônica e o setor médico. Basicamente, a microusinagem inclui qualquer processo que deposite, grave ou molde materiais em dimensões da ordem de micrômetros ou menores. Os MEMS, por sua vez, são sistemas ou dispositivos criados por meio da microusinagem que não se classificam como circuitos integrados ou outros dispositivos semicondutores tradicionais. Na fase inicial de desenvolvimento dos MEMS, vários eventos históricos e avanços importantes merecem destaque. A seguir, são apresentados alguns exemplos selecionados:

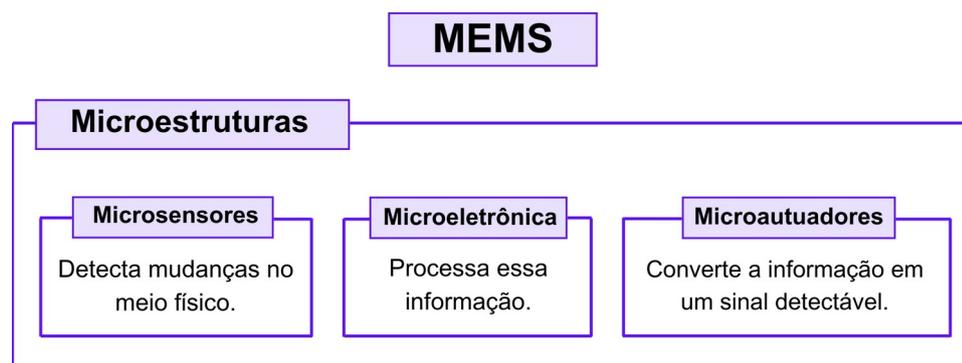
- Década de 1940: O desenvolvimento de semicondutores puros (Ge e Si) e a invenção do transistor de contato pontual foram marcos fundamentais que definiram o início da indústria de circuitos semicondutores (Brattain, 1947; Gatos, 1994).
- Década de 1950: Charles S. Smith publicou um artigo no qual mediu os coeficientes de piezoresistividade em germânio e silício (Smith, 1954). Richard Feynman proferiu sua famosa palestra intitulada “Há bastante espaço no fundo”, que inaugurou uma nova era para a microusinagem, os microdispositivos e a nanotecnologia (Feynman, 1959).
- Década de 1960: Harvey C. Nathanson e seus colaboradores desenvolveram o primeiro sistema microeletromecânico, conhecido como transistor de porta ressonante (Nathanson *et al.*, 1967). Com a criação do transistor de efeito de campo semiconductor de óxido metálico (MOSFET), a indústria de circuitos integrados iniciou um processo contínuo de miniaturização de circuitos cada vez mais complexos.
- Década de 1970: o primeiro microprocessador disponível comercialmente (Intel 4004), foi lançado como um único chip MOS LSI em 1971.
- Década de 1980: Howe e Muller desenvolveram o processo de microusinagem de superfície de polissilício e o usaram para produzir MEMS com circuitos integrados (Howe *et al.*, 1986).

- Década de 1990: Um grande crescimento no número de dispositivos, tecnologias e aplicações ampliou significativamente a área de influência dos MEMS, e essa expansão continua até os dias atuais.

2.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E APLICAÇÕES

O funcionamento dos MEMS geralmente envolve três componentes principais: sensores, circuitos de controle e atuadores (Figura 1), cada um desempenhando um papel crucial na operação desses dispositivos. Esses sistemas geralmente incluem sensores, como acelerômetros e giroscópios, que são projetados para medir variações em parâmetros físicos, como pressão, temperatura, aceleração, forças e vibrações. Esses sensores detectam mudanças no ambiente e geram sinais elétricos proporcionais às grandezas físicas monitoradas. Por outro lado, os atuadores, que também fazem parte da estrutura dos MEMS, respondem a esses sinais realizando ações mecânicas, como o movimento de partes microscópicas, placas, alavancas ou microespelhos. Esse movimento mecânico é responsável por transformar estímulos elétricos em respostas físicas, facilitando a manipulação de luz em sistemas ópticos, controle de fluxo em sistemas microfluídicos, ou mesmo a geração de movimento em dispositivos automotivos.

Figura 1. Princípio de funcionamento dos sistemas microeletromecânicos.



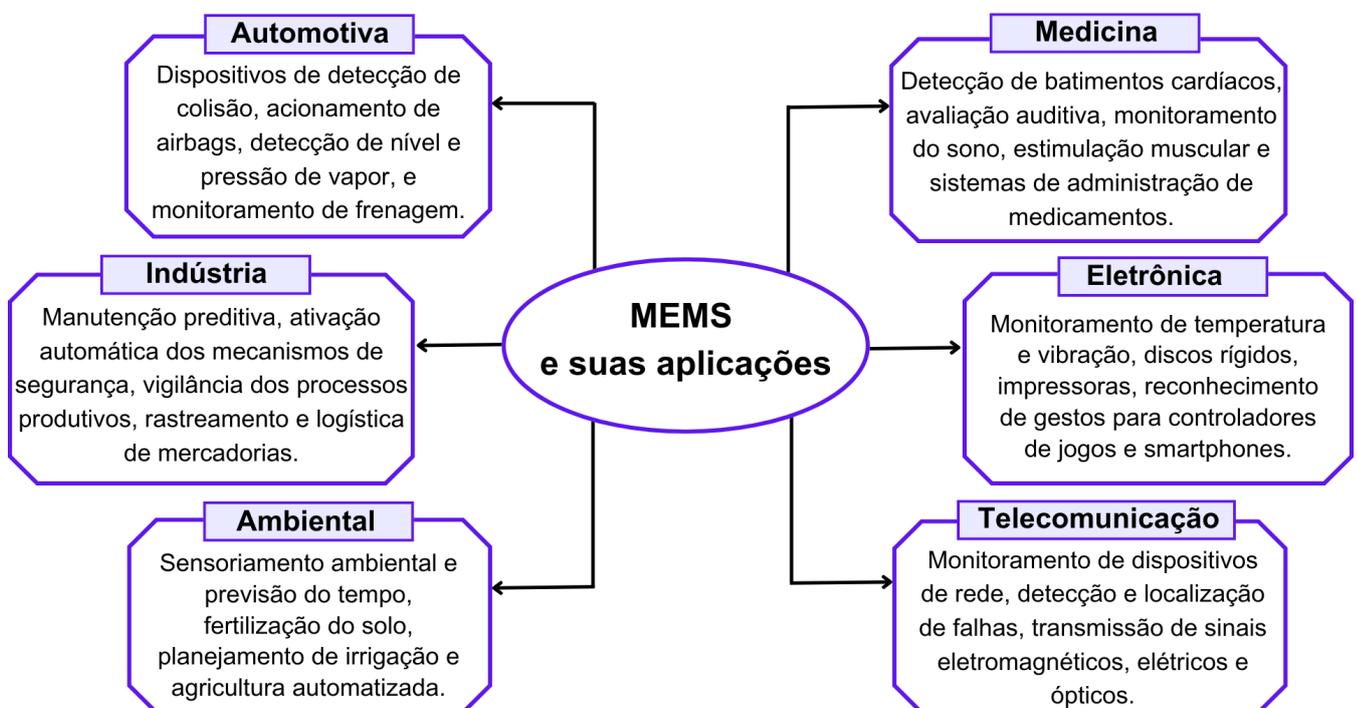
Fonte: elaborada pela própria autora.

Além dos sensores e atuadores, os MEMS também integram circuitos eletrônicos complexos, que atuam na recepção, processamento e transmissão dos sinais captados. Esses circuitos podem incluir amplificadores, microcontroladores e processadores de sinais, que permitem que os MEMS interpretem as informações

recebidas dos sensores e ajustem o comportamento dos atuadores de maneira precisa. Essa integração entre o eletrônico e o mecânico é o que confere aos MEMS sua eficiência e capacidade de executar funções com alta precisão. Assim, eles são fundamentais em aplicações que exigem alta performance, como na indústria automotiva, em dispositivos médicos, telecomunicações e eletrônica de consumo

Com a capacidade de integrar componentes eletrônicos e mecânicos em escala microscópica, os MEMS oferecem uma vasta gama de aplicações também em setores tecnológicos e industriais. Essa integração possibilita a execução de funções complexas e precisas em dispositivos compactos, criando inúmeras oportunidades de inovação em diferentes áreas. As principais áreas de aplicação dos MEMS incluem os setores automotivo, médico, industrial, eletrônico, ambiental e de telecomunicações (Algamili *et al.*, 2021; Mallegni *et al.*, 2022; Zhu *et al.*, 2019). A Figura 2 ilustra a versatilidade dos MEMS e seu papel no avanço tecnológico em diversas áreas, destacando sua contribuição para o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes, compactos e integrados.

Figura 2. Sistemas microeletromecânicos e suas potenciais aplicações.



Fonte: elaborada pela própria autora.

De modo geral, os MEMS se firmaram como uma tecnologia indispensável em diversos setores industriais. Sua miniaturização e precisão possibilitam a criação de sensores, atuadores e sistemas de alto desempenho, que aprimoram o processamento de dados, o controle de movimento e a detecção de variáveis físicas. À medida que as técnicas de microfabricação avançam, os MEMS continuarão a ampliar suas aplicações tecnológicas, assumindo um papel cada vez mais crucial no desenvolvimento de dispositivos mais eficientes e inteligentes.

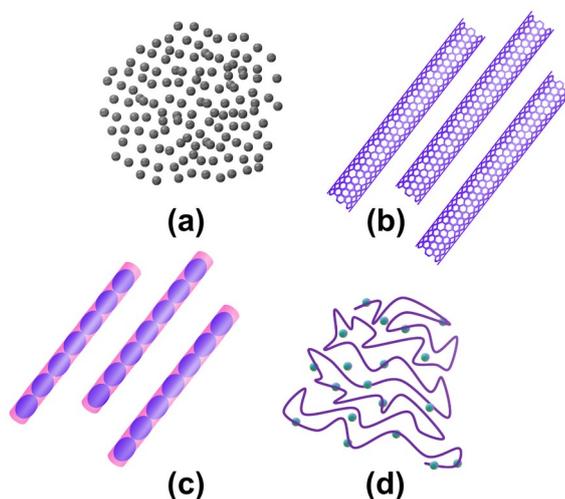
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, discutiremos alguns conceitos essenciais que são fundamentais para o entendimento completo dos resultados apresentados neste trabalho. A exploração desses conceitos fornecerá a base teórica necessária para contextualizar e interpretar os dados obtidos, facilitando a compreensão das análises realizadas e das conclusões propostas ao longo do estudo.

3.1 NANOMATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES INOVADORAS

Os nanomateriais são materiais que exibem propriedades únicas devido ao seu tamanho reduzido, podendo apresentar comportamentos físicos, químicos e elétricos distintos em comparação com suas contrapartes em escala macroscópica. Existem diversos tipos de nanomateriais, incluindo nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono, nanofios e nanocompósitos poliméricos (Figura 3) (Ajayan *et al.*, 2007; Andrews *et al.*, 2004; Appenzeller *et al.*, 2008; Qin *et al.*, 2000).

Figura 3 - (a) nanopartículas metálicas, (b) nanotubos de carbono, (c) nanofios e (d) nanocompósitos poliméricos.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Esses materiais são utilizados em diferentes setores, como na eletrônica, medicina, energia, materiais avançados e ciências ambientais (Gajanan *et al.*, 2018; Peralta-Videa *et al.*, 2011). Além disso, os nanomateriais oferecem propriedades

mecânicas, térmicas e ópticas aprimoradas, sendo aplicados na criação de novos materiais compósitos com características melhoradas.

Na nanotecnologia, cientistas e engenheiros trabalham com materiais e estruturas em escala atômica e molecular, explorando propriedades específicas que surgem nessa dimensão (Guo *et al.*, 2010; Pinheiro *et al.*, 2011). Na medicina, nanopartículas são aplicadas em diagnósticos e tratamentos de doenças, enquanto no setor energético, elas contribuem para o desenvolvimento de células solares e baterias mais eficientes (Silva *et al.*, 2004). O estudo das propriedades dos nanomateriais é essencial para o avanço dos MEMS, pois suas características exclusivas tornam esses sistemas mais eficientes e precisos, ampliando suas aplicações.

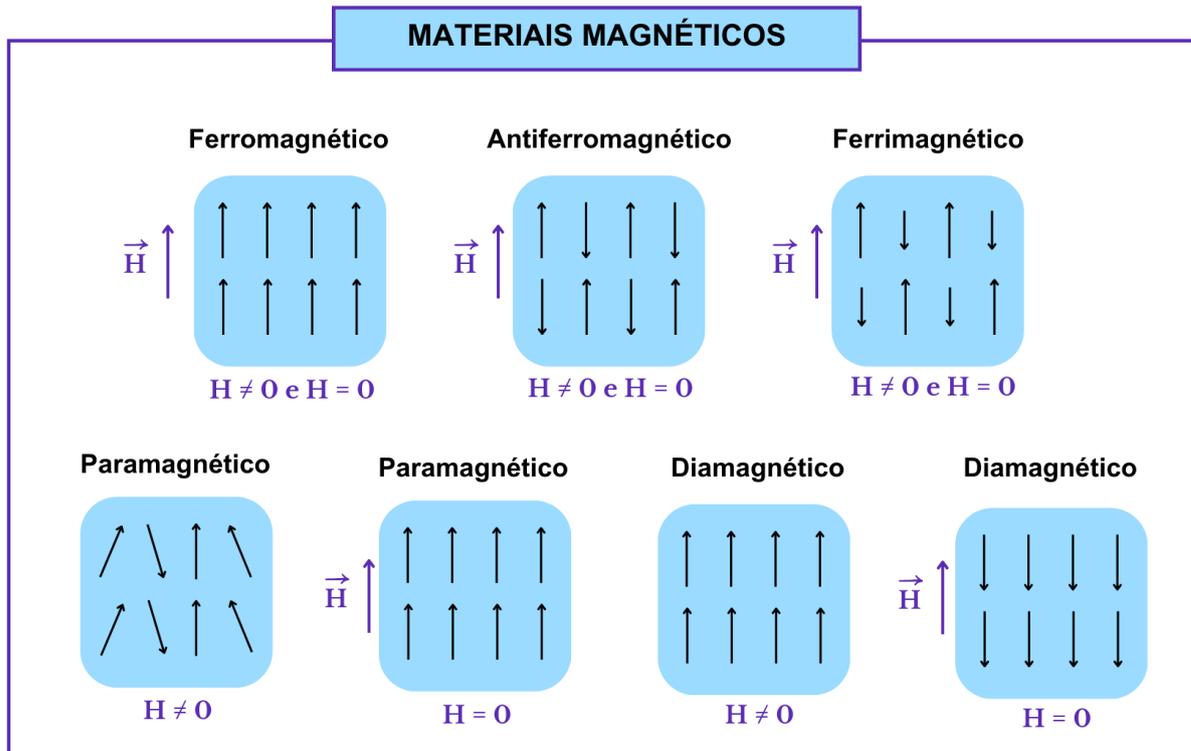
3.2 DINÂMICA DE MAGNETIZAÇÃO

O estudo da dinâmica de magnetização em materiais magnéticos é essencial para o avanço dos MEMS, pois esses sistemas demandam um controle rigoroso de propriedades como histerese, perdas magnéticas e ressonância, que estão diretamente associadas à dinâmica da magnetização. Em particular, a magnetização de nanoestruturas desempenha um papel central na investigação de interações magneto-ópticas, onde os resultados dependem das propriedades intrínsecas e extrínsecas dos materiais utilizados (Aharoni *et al.*, 1997).

Os materiais magnéticos são classificados com base em suas características magnéticas, incluindo os ferromagnéticos, antiferromagnéticos, ferrimagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos. Os materiais ferromagnéticos, como ferro e níquel, possuem momentos magnéticos que se alinham em uma única direção, resultando em fortes propriedades magnéticas. Nos antiferromagnéticos, como o óxido de manganês, os momentos magnéticos se alinham em direções opostas, cancelando o efeito magnético líquido em larga escala. Já os ferrimagnéticos possuem momentos magnéticos opostos, mas de magnitudes diferentes, gerando uma magnetização líquida. Os materiais diamagnéticos, como o cobre, não possuem momentos magnéticos líquidos e são levemente repelidos por campos magnéticos, enquanto os paramagnéticos, como o alumínio, apresentam momentos magnéticos que se alinham temporariamente na presença de um campo magnético

externo, embora com intensidade muito menor que nos ferromagnéticos. O comportamento desses momentos magnéticos com e sem a aplicação de um campo magnético H é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Materiais magnéticos e seus domínios



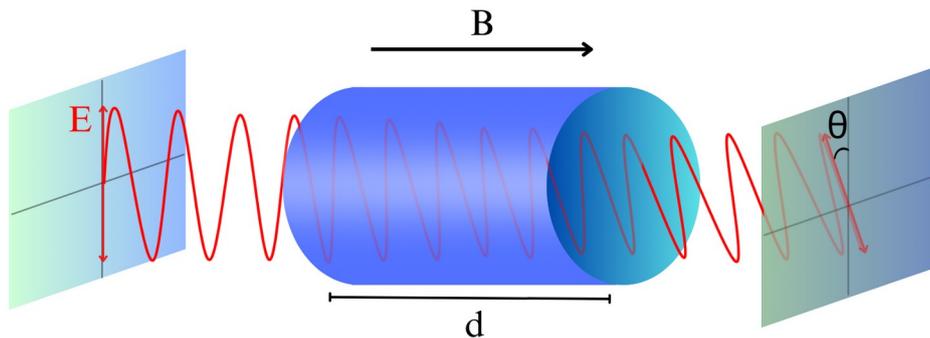
Fonte: elaborada pela própria autora.

3.3 INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS

As interações magneto-ópticas desempenham um papel essencial no avanço dos microsistemas, pois permitem o controle e a manipulação das propriedades ópticas de materiais utilizando campos magnéticos, viabilizando novas funcionalidades e aumentando a eficiência de dispositivos em escala micrométrica. Essas interações dizem respeito aos fenômenos em que um campo magnético influencia a propagação da luz através de um material, ocorrendo principalmente em meios magnéticos, como materiais ferromagnéticos ou ferrimagnéticos. Entre os principais efeitos magneto-ópticos destacam-se: (i) o efeito Faraday e (ii) o efeito Kerr, que envolvem, respectivamente, alterações na polarização da luz transmitida ou refletida por um material sob a ação de um campo magnético (Kerr, 1877; Qiu, 2000).

(i) O Efeito Faraday ocorre quando a luz polarizada linearmente atravessa um material transparente exposto a um campo magnético externo (Figura 5). Nesse processo, a orientação do plano de polarização da luz é rotacionada em uma medida que é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético e ao comprimento do percurso da luz no material (Faraday; Sugano *et al.*, 1846).

Figura 5 - Efeito Faraday



Fonte: elaborada pela própria autora.

(ii) O Efeito Kerr ocorre quando a luz atravessa um meio dielétrico (não condutor) que está submetido a um campo elétrico intenso (Figura 6). Nesse fenômeno, as propriedades ópticas do material são alteradas. O Efeito Kerr óptico se manifesta quando a polarização da luz incidente é modificada devido à resposta não linear do meio ao campo elétrico aplicado. Essa alteração na polarização é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico.

Figura 6. Efeito Kerr



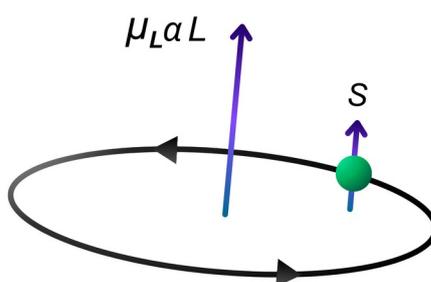
Fonte: elaborada pela própria autora.

Os efeitos magneto-ópticos descreveram uma nova realidade dentro da optoeletrônica e da spintrônica (Holanda *et al.*; Yalçin *et al.*, 2015; Xiong *et al.*, 2019). Essas interações possuem aplicações significativas em pesquisas científicas e tecnológicas, proporcionando uma base para o desenvolvimento de dispositivos sensíveis a campos magnéticos. Essa interdisciplinaridade entre óptica e magnetismo promete contribuições para a inovação em diversas áreas da ciência e da tecnologia.

3.4 INTERAÇÃO SPIN-ÓRBITA

A interação spin-órbita é um fenômeno quântico que descreve o acoplamento entre o spin de uma partícula, como um elétron, e seu momento orbital. Esse efeito ocorre devido ao movimento do elétron ao redor do núcleo, o que gera um campo magnético que interage com o seu próprio momento de spin. Como resultado, o campo magnético associado à orientação de L atua sobre o elétron, aplicando um torque no momento de dipolo magnético ligado ao seu spin. Esse torque, embora não modifique a intensidade de S , cria uma força de acoplamento entre L e S , fazendo com que a orientação de um dependa da orientação do outro (Figura 7).

Figura 7. Interação spin-órbita



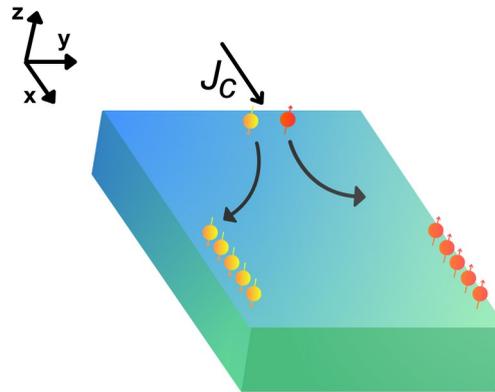
Fonte: elaborada pela própria autora.

O acoplamento spin-órbita é uma ferramenta essencial para manipular propriedades fundamentais de materiais em escalas micro e nano, possibilitando a modulação de suas características eletrônicas, a conversão de informações codificadas no spin dos elétrons em sinais elétricos detectáveis e o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de baixo consumo energético.

3.5 EFEITO HALL DE SPIN

O efeito Hall de spin (Figura 8) ocorre quando elétrons com spins opostos desviam-se em direções opostas dentro de um material condutor sob a influência de uma corrente elétrica. Nesse fenômeno, elétrons com “spin up” deslocam-se para um lado do material, enquanto os elétrons com “spin down” deslocam-se para o lado oposto, criando uma separação de spins na direção perpendicular à corrente elétrica. Essa separação de spins acontece sem um campo magnético externo, ao contrário do efeito Hall clássico. Esse efeito é fundamental para a spintrônica, que utiliza o spin eletrônico no processamento de informações. Especificamente, os elétrons da corrente J_C com “spin up” (orientação positiva no eixo Z) desviam-se na direção positiva do eixo Y, enquanto os elétrons com “spin down” (orientação negativa no eixo Z) desviam-se na direção negativa do eixo Y.

Figura 8.Efeito Hall de spin



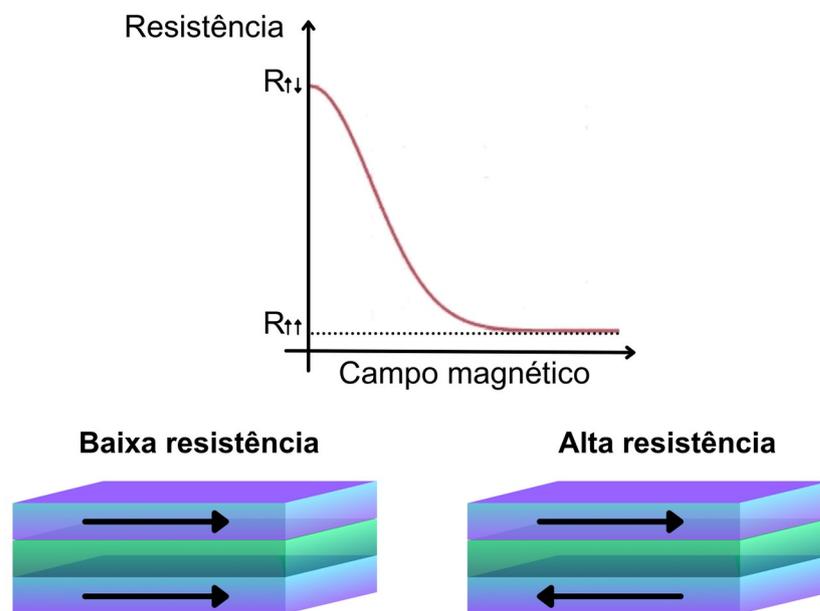
Fonte: elaborada pela própria autora.

3.6 MAGNETORRESISTÊNCIA GIGANTE

A magnetoresistência gigante (GMR) é um fenômeno físico observado em materiais magnéticos, caracterizado pela grande variação da resistência elétrica de um material quando exposto a um campo magnético externo. Foi descoberto em 1988 por Albert Fert e Peter Grünberg, que receberam o Prêmio Nobel de Física em 2007 por essa descoberta. Esse efeito ocorre principalmente em estruturas

compostas por camadas finas alternadas de materiais ferromagnéticos e não magnéticos, como em superfícies de filmes finos ou nanopartículas. Quando as camadas magnéticas estão alinhadas com o campo magnético, a resistência é baixa, enquanto que, quando as camadas estão desordenadas ou antiparalelas, a resistência aumenta (Figura 9). A GMR é amplamente utilizada em dispositivos de leitura de discos rígidos, onde a variação na resistência é usada para detectar dados armazenados. Além disso, o efeito GMR tem aplicações em sensores magnéticos e em tecnologia de spintrônica.

Figura 9. Magnetorresistência gigante (GMR)



Fonte: elaborada pela própria autora.

Entender a fundo as interações físicas e químicas envolvidas é o ponto de partida para transformar descobertas científicas em aplicações práticas. As memórias magnéticas de acesso aleatório (MRAMs), por exemplo, precisam de uma combinação precisa entre a magnetorresistência gigante e a interação spin-órbita para oferecer armazenamento durável e eficiente em termos de energia. Da mesma forma, sensores magneto-ópticos, que utilizam os efeitos Kerr e Faraday, têm ganhado espaço em áreas como biomedicina e indústria, graças ao avanço no conhecimento sobre suas propriedades. Além disso, os progressos na fabricação em escala nanométrica destacam ainda mais a importância de estudar esses materiais

e fenômenos, possibilitando a criação de dispositivos menores, mais rápidos e mais avançados. Nesse sentido, a pesquisa nessa área não só amplia os limites da microeletrônica, mas também é fundamental para transformar tecnologias promissoras em soluções práticas.

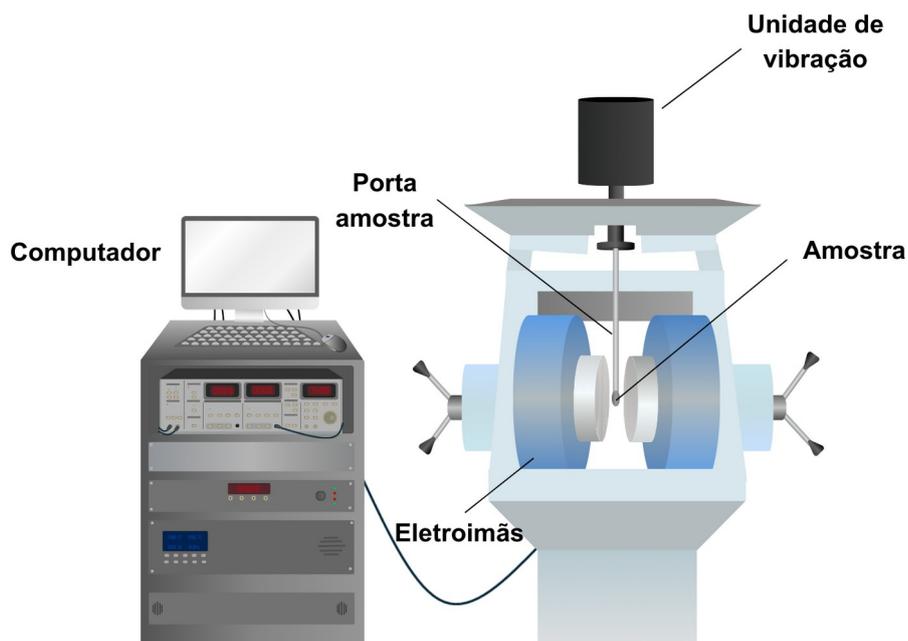
4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, discutimos as técnicas experimentais adotadas para conduzir este estudo, englobando tanto as metodologias amplamente utilizadas na análise de dados científicos quanto as abordagens ajustadas e desenvolvidas especificamente para atender às necessidades deste trabalho. Apresentamos as ferramentas convencionais que são comumente aplicadas em estudos semelhantes, além dos aparatos experimentais que foram introduzidos para alcançar resultados específicos.

4.1 MAGNETOMETRIA DE AMOSTRA VIBRANTE (MAV)

Desenvolvida por Simon Foner em 1955, a Magnetometria de Amostra Vibrante (MAV) mede a resposta magnética da amostra enquanto ela vibra em um campo magnético externo controlado. A amostra é posicionada entre os polos de um eletroímã que gera um campo magnético uniforme, induzindo magnetização conforme suas propriedades intrínsecas. Seus componentes incluem uma fonte de corrente, um eletroímã, um sensor de campo magnético e um mecanismo para movimentar a amostra (Figura 10), projetados para medições estáveis e precisas.

Figura 10. Magnetometria de Amostra Vibrante



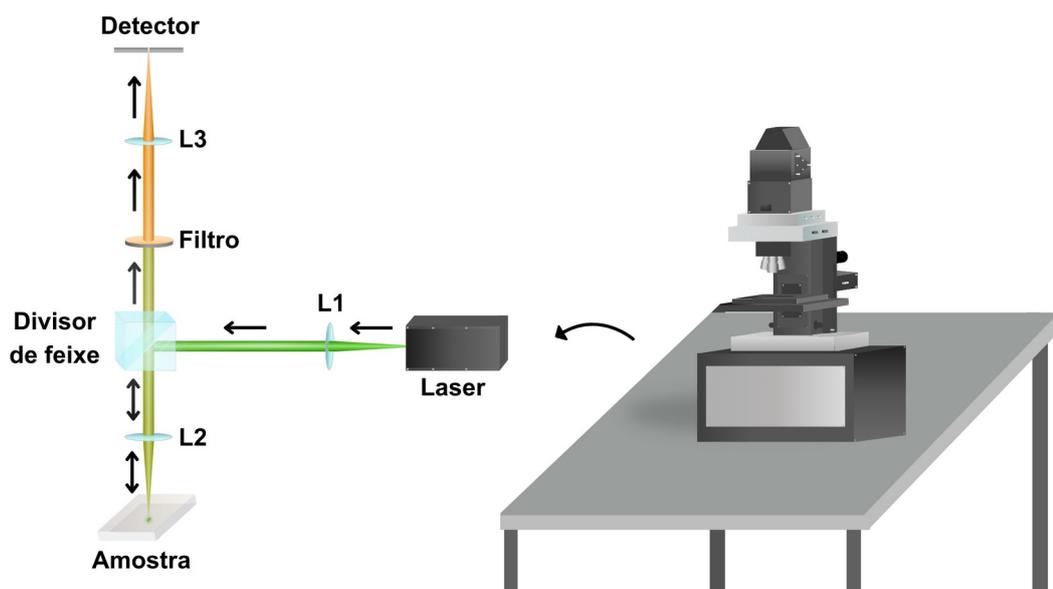
Fonte: elaborada pela própria autora.

No experimento, a luz de uma fonte bem calibrada, passa através da amostra enquanto ela está sujeita a um campo magnético controlado, permitindo a observação de variações na absorção óptica dependentes da magnetização. O espectrômetro mede a intensidade e o comprimento de onda da luz absorvida pela amostra, fornecendo dados sobre a interação entre as propriedades magnéticas e ópticas dos materiais. Essas informações são essenciais para compreender a resposta magneto-óptica da amostra, que pode revelar detalhes sobre sua estrutura eletrônica, níveis de energia e comportamento sob influência de campos magnéticos.

4.2 ESPECTROSCOPIA RAMAN

A espectroscopia Raman (Figura 11) é uma técnica de análise que utiliza a interação da luz com a matéria para obter informações sobre a estrutura molecular de uma amostra. Ela se baseia no efeito Raman, fenômeno observado quando a luz incide sobre uma substância e sofre espalhamento inelástico – ou seja, a luz espalhada apresenta uma mudança na frequência, que é característica das vibrações moleculares da substância. Essa mudança de frequência fornece uma espécie de "impressão digital" molecular da amostra, revelando detalhes sobre sua composição química, estrutura e até interações intermoleculares.

Figura 11. Espectroscopia Raman



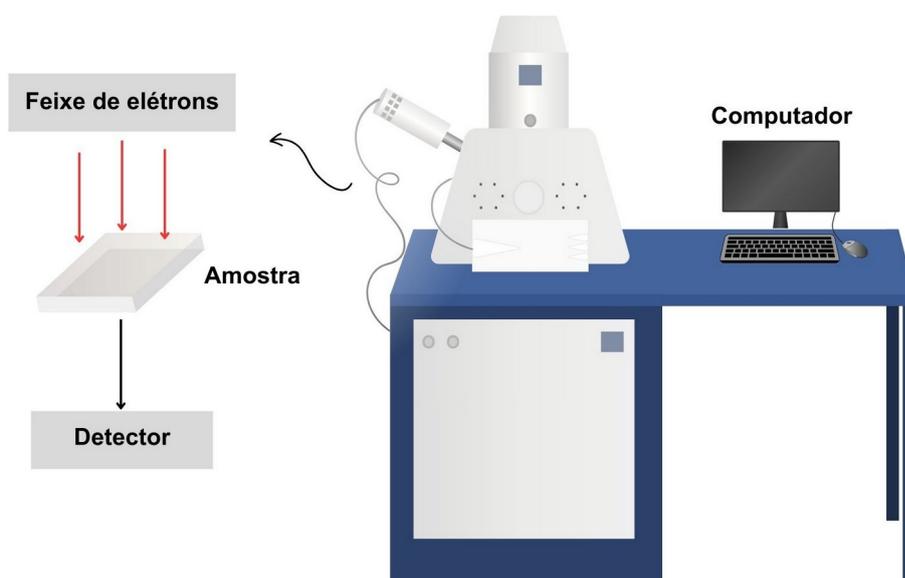
Fonte: elaborada pela própria autora.

A descoberta do efeito Raman foi realizada em 1928 pelo físico indiano C.V. Raman e seu colega K.S. Krishnan. Eles observaram que, ao passar a luz através de um meio transparente, parte dela mudava de frequência, fenômeno que foi explicado como resultado de uma interação entre a luz e as vibrações da molécula. Em reconhecimento a esse trabalho, C.V. Raman recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1930. Desde então, a espectroscopia Raman tem se desenvolvido significativamente e se consolidado como uma ferramenta utilizada em diversas áreas da ciência, desempenhando um papel crucial em nosso estudo ao revelar características importantes de nossas amostras.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica de imagem usada para analisar a superfície de amostras com alta resolução. Diferente dos microscópios ópticos, que utilizam luz, o MEV emprega um feixe concentrado de elétrons que varre a superfície do material, gerando sinais que fornecem informações detalhadas sobre a topografia, a composição e outras propriedades da amostra. Durante esse processo, o feixe de elétrons interage com os átomos presentes na superfície, produzindo sinais como elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios X característicos. Esses sinais são captados por detectores, permitindo que uma imagem detalhada da superfície seja gerada e exibida em um computador, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Microscopia Eletrônica de Varredura



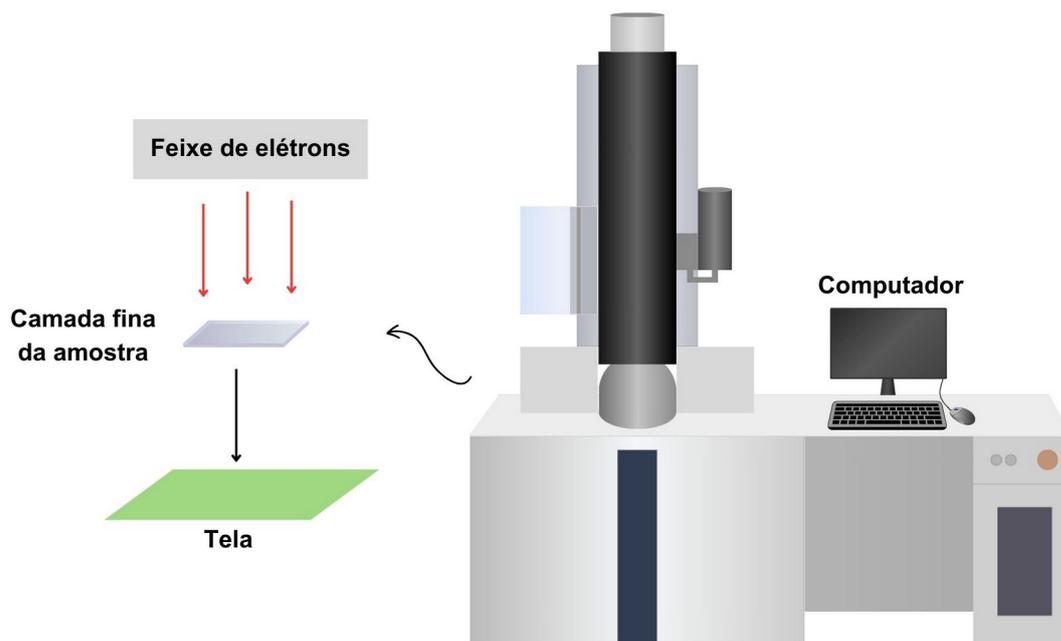
Fonte: elaborada pela própria autora.

As imagens geradas pelo MEV possibilitam análises estruturais, como a identificação de impurezas, bolhas, trincas, fissuras, e irregularidades na superfície, além de fornecer detalhes sobre a morfologia e a textura dos materiais. Essas informações são essenciais para a avaliação da qualidade da amostra, permitindo identificar possíveis defeitos, falhas ou características indesejáveis que podem afetar suas propriedades e desempenho.

4.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO (MET)

A Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) é uma técnica de imagem avançada que utiliza feixes de elétrons para examinar a estrutura interna de materiais em alta resolução. Diferente de microscópios ópticos, que utilizam luz, o MET emprega elétrons devido ao seu menor comprimento de onda, permitindo visualizar detalhes na escala de átomos. No MET, um feixe de elétrons é transmitido através de uma amostra extremamente fina. Conforme os elétrons interagem com a amostra, parte deles é dispersada, enquanto outros a atravessam diretamente. A imagem formada resulta da variação na transmissão dos elétrons, que é então ampliada por lentes eletromagnéticas, produzindo uma imagem detalhada da estrutura interna do material, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Microscopia Eletrônica de Transmissão



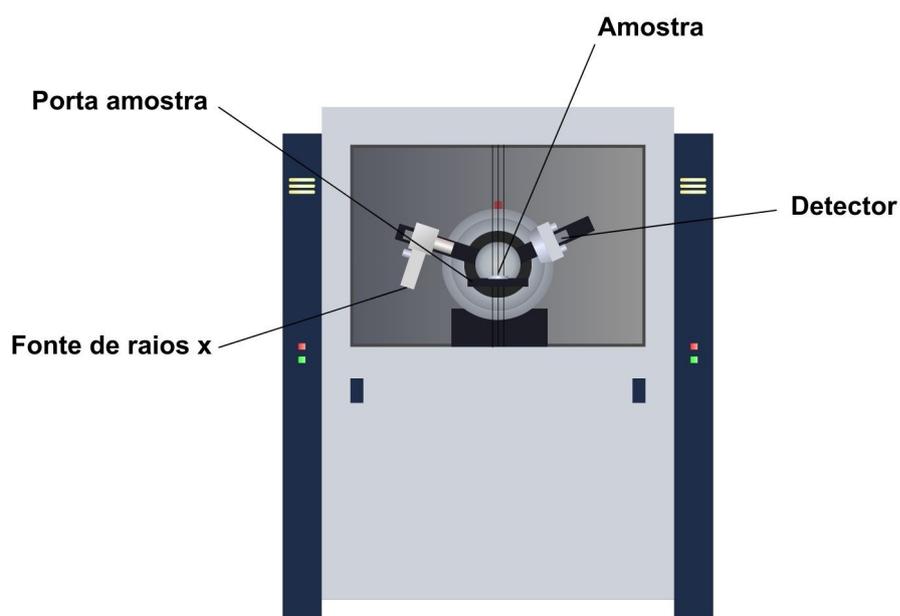
Fonte: elaborada pela própria autora.

No MET, é gerada uma imagem bidimensional do interior celular na tela, através da passagem do feixe de elétrons por cortes ultrafinos da amostra. A imagem é formada diretamente na tela de observação, a partir da interação do feixe de elétrons com a amostra. Essa técnica é utilizada para avaliar a qualidade das amostras empregadas em nosso estudo.

4.5 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

A Difractometria de Raios X, ilustrada na Figura 14, é uma técnica utilizada para a identificação e caracterização de materiais cristalinos, baseada no fenômeno de difração dos raios X. Esse processo ocorre quando um feixe de raios X incide sobre um material cristalino, sendo dispersado de forma específica conforme a estrutura cristalina e os planos cristalográficos do material. Os raios X gerados pela fonte iluminam a amostra, que é difratada pela fase do material, e os feixes difratados são capturados pelo detector. A medição da intensidade e o registro dos dados de difração são realizados por meio da movimentação do tubo, da amostra ou do detector, o que permite variar o ângulo de difração. Dependendo da geometria do difratômetro e do tipo de amostra, o ângulo entre o feixe incidente e a amostra pode ser fixo ou variável, sendo frequentemente ajustado para coincidir com o ângulo do feixe difratado.

Figura 14. Difractometria de Raios X



Fonte: elaborada pela própria autora.

O resultado dessa interação é geralmente apresentado em difratogramas, que fornecem informações sobre a organização, simetria e periodicidade da estrutura cristalina da amostra. Esses difratogramas não apenas revelam a disposição dos átomos ou moléculas no material, mas também ajudam a identificar padrões de difração, que estão intimamente ligados às propriedades físicas e estruturais da substância. Além disso, a técnica possibilita a obtenção de dados sobre os elementos químicos presentes na amostra, incluindo sua composição e distribuição. Esse processo é fundamental para a compreensão das propriedades estruturais e químicas dos materiais, e, assim, contribui para a identificação de suas possíveis aplicações em várias áreas da ciência e da indústria.

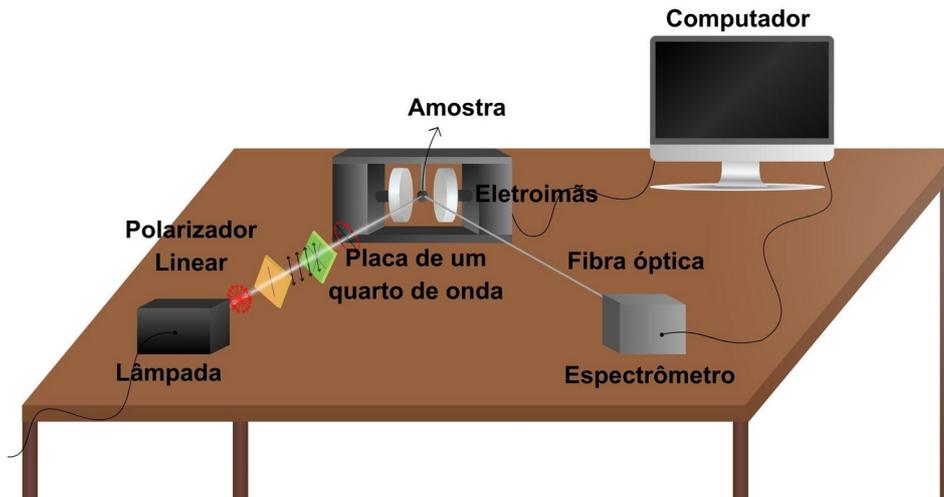
4.6 NOSSAS CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS

Alguns dos resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando configurações experimentais ajustadas às necessidades específicas de cada estudo, permitindo a análise detalhada dos materiais e fenômenos investigados. As configurações incluem: (i) um medidor de curvas de magnetização isotérmica, (ii) um espectrômetro de absorção magneto-óptica e, por fim, (iii) um sintetizador de nanoestruturas com radiação ultravioleta, cada um adequado para investigar diferentes aspectos das amostras analisadas.

4.6.1 Medidor de Curvas de Magnetização Isotérmica

O medidor de curvas de magnetização isotérmica é um equipamento empregado para estudar o comportamento magnético de materiais, medindo sua magnetização em resposta a campos magnéticos aplicados com diferentes intensidades, o que permite uma análise detalhada de suas propriedades magnéticas. Na Figura 15, é ilustrada a configuração experimental utilizada para as medições magneto-ópticas, composta por uma fonte de luz branca, um polarizador linear, uma placa de um quarto de onda e uma fibra óptica, que captura a luz refletida da amostra e a direciona ao espectrômetro. Além disso, a mesma configuração experimental incorpora um MAV com sensibilidade magnética na ordem de 10^{-7} emu, permitindo a detecção de variações magnéticas extremamente sutis.

Figura 15. Medidor de curvas de magnetização

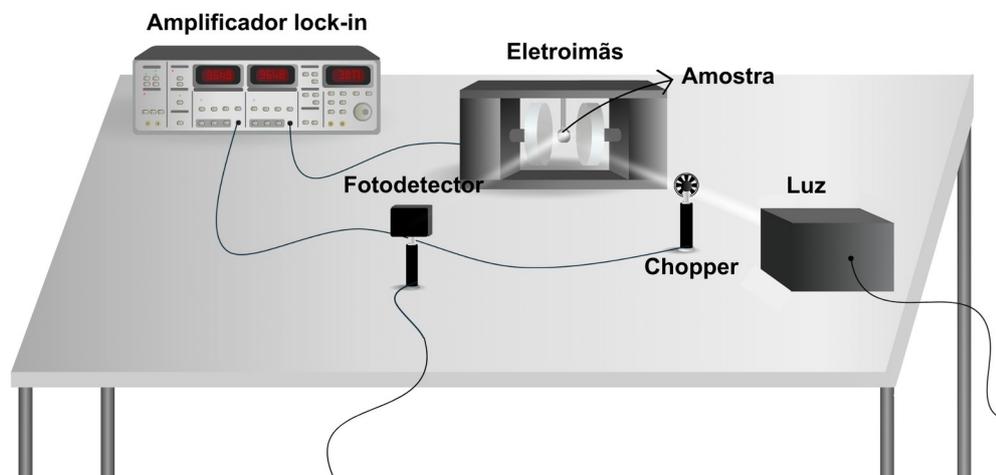


Fonte: elaborada pela própria autora.

4.6.2 Espectrômetro de Absorção Magneto-Óptica

O espectrômetro de absorção magneto-óptica é um dispositivo utilizado para medir as variações na absorção de luz por um material submetido a um campo magnético. Na configuração experimental apresentada na Figura 16, a luz branca colimada de uma lâmpada é modulada por um chopper e direcionada para a amostra, possibilitando a análise das interações magneto-ópticas por meio do MAV. Parte da luz refletida é captada por um fotodetector, cuja função é monitorar as eventuais perdas de tensão durante o processo, assegurando a estabilidade e a precisão das medições.

Figura 16. Espectrômetro de absorção magneto-óptica

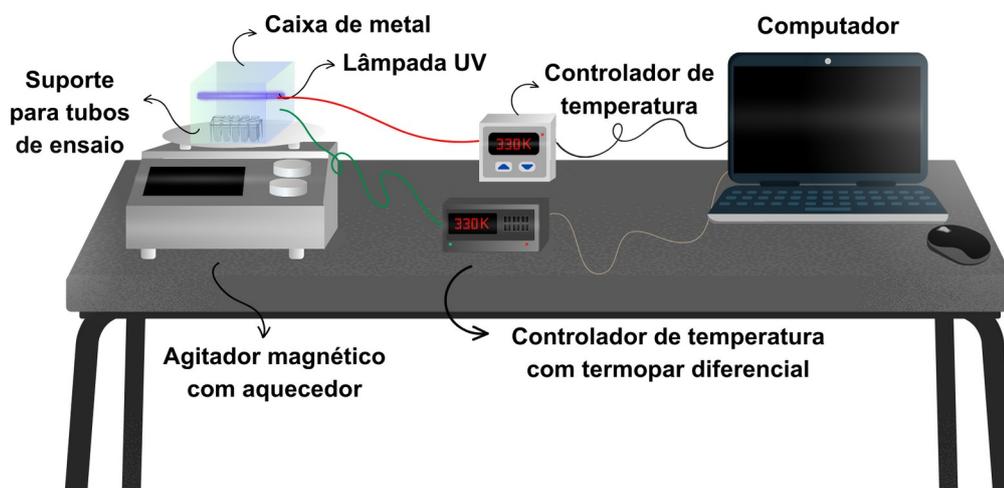


Fonte: elaborada pela própria autora.

4.6.3 Sintetizador de Nanoestruturas com Radiação Ultravioleta

O sintetizador de nanoestruturas com radiação ultravioleta é um equipamento desenvolvido para fabricar e manipular materiais em escala nanométrica, utilizando radiação UV como fonte de energia, conforme ilustrado na Figura 17. Durante o processo, as nanopartículas são colocadas em um tubo de ensaio, misturadas com uma solução e submetidas à ação de um agitador magnético com aquecimento controlado por várias horas. Nesse intervalo, uma lâmpada UV emite radiação ultravioleta pura, cuja intensidade é ajustada por meio de um dimmer. O procedimento ocorre em um ambiente fechado, onde dois controladores de temperatura garantem um controle preciso das condições experimentais. Toda a operação é monitorada e gerenciada por meio de uma interface gráfica desenvolvida em Python, o que assegura a eficiência e a precisão no controle dos parâmetros envolvidos.

Figura 17. Sintetizador de nanoestruturas com radiação ultravioleta



Fonte: elaborada pela própria autora.

Todas as técnicas experimentais apresentadas desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento deste trabalho, sendo essenciais para a realização das análises e interpretações dos dados. A compreensão profunda do funcionamento de cada uma dessas metodologias tornou-se indispensável para a correta interpretação dos resultados obtidos. Portanto, o conhecimento e a aplicação dessas técnicas foram indispensáveis para a validação das hipóteses propostas e para o avanço do entendimento sobre o comportamento dos materiais em estudo.

5 RESULTADOS

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos a partir das configurações experimentais e metodologias descritas anteriormente. Os dados coletados foram analisados de forma detalhada, com o objetivo de verificar as hipóteses e responder às questões de pesquisa levantadas. A seção está organizada de acordo com os principais experimentos realizados, destacando as observações mais relevantes e os padrões encontrados. A análise dos dados visa fornecer uma compreensão mais profunda dos fenômenos investigados e contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre o tema.

5.1 INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS EM NANOFIOS

A análise das interações magneto-ópticas em nanofios proporciona uma compreensão essencial dos fenômenos magnéticos e ópticos em escala nanométrica. Essa compreensão pode ser crucial para o desenvolvimento de novas tecnologias baseadas em materiais magnéticos. Em particular, a análise das interações magnéticas em estados remanescentes é indispensável para otimizar o desempenho desses materiais em condições extremas. Os efeitos das interações magnéticas em estruturas têm sido explorados por meio de curvas Δm (Aharoni *et al.*; Wohlfath *et al.*, 1958) ou modelos discretos, sem levar em consideração diretamente a dependência entre o campo magnético e a luz (Holanda *et al.*, 2021).

Nesse contexto, minimizar o tamanho dos bits em sistemas magneto-ópticos para gravação de dados representa um desafio significativo para as aplicações em optoeletrônica e spintrônica (Cvelbar, 2011; Holanda *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019). A redução do tamanho dos bits intensifica as interações entre os componentes da estrutura, e o interesse científico atual se concentra na quantificação (ou codificação) dessas interações. Arranjos de nanofios magnéticos eletrodepositados em membranas de alumina, com alta densidade de distribuição de partículas, são exemplos de sistemas que podem ser fortemente afetados por interações magneto-ópticas (Holanda *et al.*; Zafar *et al.*, 2015; Sepúlveda *et al.*, 2016). Essa influência é tipicamente detectada durante o processo de magnetização quando a luz é aplicada ao sistema. Nas aplicações práticas, a eletrodeposição em membranas de alumínio é empregada no desenvolvimento de sistemas e dispositivos (Holanda *et al.*, 2014;

Lv *et al.*, 2020; Mourachkine *et al.*, 2018). Tais sistemas podem exibir diferentes modos de reversão da magnetização (Bran *et al.*, 2017; Landeros *et al.*, 2007) e são fortemente influenciados por interações magneto-ópticas. A presença dessas interações é principalmente detectada durante o processo de magnetização com luz, que envolve componentes tanto reversíveis quanto irreversíveis.

Durante a magnetização, separar as partes da histerese resulta em perda de informações essenciais devido às mudanças nas energias magnéticas da estrutura. Assim, é crucial realizar um estudo integrado das interações ópticas e magnéticas. As interações magneto-ópticas podem ser avaliadas a partir do estado remanente gerado nesse processo (Holanda, 2021). O comportamento magneto-óptico desses sistemas frequentemente gera efeitos provenientes da interação luz-matéria, essenciais para a excitação ou detecção de ondas de spin utilizando luz (Alex *et al.*, 1992; Courths *et al.*, 1977; Donnio *et al.*, 2010). Essa interação não só altera as propriedades magnéticas do sistema, como também promove a propagação das paredes de domínio, alterando a estrutura magnética do material.

Em um sistema particular, as curvas Δm normalizadas (Δm_N) bem definidas fornecem informações sobre os efeitos de interação. Essas curvas são obtidas comparando as curvas de magnetização remanente isotérmica (IRM(H)) com as de desmagnetização por corrente contínua (DCD(H)). Dessa análise, derivam-se outras grandezas físicas, como $m_d(H) = \text{DCD}(H)/\text{IRM}(H_{\text{Max}})$ e $m_r(H) = \text{IRM}(H)/\text{IRM}(H_{\text{Max}})$ que são normalizadas considerando o valor obtido com campo magnético máximo (Buehler *et al.*, 1996; Mayo *et al.*, 1991; Wohlfarth *et al.*, 1958). As curvas Δm são derivadas das relações entre $m_d(H)$ e $m_r(H)$, sendo diferenciadas pelo estado magnético inicial da estrutura.

O modelo de Stoner-Wohlfarth (Wohlfarth *et al.*, 1958) destaca uma relação intrínseca entre $m_d(H)$ e $m_r(H)$ em estruturas não interagentes. Neste trabalho, propomos que as interações magneto-ópticas, em conjunto com as interações exclusivamente magnéticas em partículas não interagentes, possuem uma intensidade associada que pode ser expressa como

$$I_{N-I} = \left| \int_{H_i}^{H_f} \frac{\eta_{N-I}}{\Delta H} dH \right| \quad (3)$$

onde $H_f > H_i$ e $\eta_{N-1} = [1 - 2m_r(H)] - m_d(H)$. Os campos magnéticos H_f e H_i representam os campos máximo e o mínimo no intervalo $\Delta H = H_f - H_i$, respectivamente.

Para descrever de forma mais precisa os sistemas reais, Henkel sugeriu que as diferenças nesse comportamento em um modelo simplificado eram atribuídas às interações entre as partes da estrutura. Qualitativamente, o tipo de interação foi caracterizado pela introdução do termo Δm na equação (3). Com base nessa abordagem, propomos que a intensidade das interações magneto-ópticas, em conjunto com as interações puramente magnéticas em partículas interagentes, pode ser expressa como

$$I_l = \left| \int_{H_i}^{H_f} \frac{\eta_l}{\Delta H} dH \right| \quad (4)$$

onde $\eta_l = \Delta m_N + [1 - 2m_r(H)] - m_d(H)$. Os índices $N - l$ e l nas Equações (3) e (4) estão associados a η para sistemas com e sem interações. Quando as interações magneto-ópticas predominantes são desmagnetizantes (PMOID), $\Delta m_N < 0$; e quando as interações magneto-ópticas predominantes são magnetizantes (PMOIM), $\Delta m_N > 0$. Assim, o valor da intensidade das interações magneto-ópticas é obtido através das Equações (3) e (4) por

$$I_k = \left| \int_{H_i}^{H_f} \frac{\Delta m_N}{\Delta H} dH \right| \quad (5)$$

onde $k = \text{PMOID}$ (quando $\Delta m_N < 0$) e PMOIM (quando $\Delta m_N > 0$).

Para obter os estados PMOID e PMOIM, usamos a comparação entre as curvas de magnetização remanente isotérmica óptica (OIRM(H)) e desmagnetização óptica de corrente contínua (ODCD(H)), que define outras grandezas físicas como $m_d(H) = \text{ODCD}(H)/\text{OIRM}(H_{\text{Max}})$ e $m_r(H) = \text{OIRM}(H)/\text{OIRM}(H_{\text{Max}})$ que são normalizadas considerando o valor obtido com um campo magnético máximo (H_{Max}). Com as curvas $m_d(H)$ e $m_r(H)$, plotamos os mapas de interação magneto-óptica.

As interações desmagnetizantes são frequentemente observadas em medições experimentais (Aharoni *et al.*; Wohlfarth *et al.*, 1958; Chuev *et al.*, 1948; Henkel *et al.*, 1964). Isso ocorre, na maioria dos casos, porque a resposta magnética das estruturas é oposta ao campo magnético aplicado H , resultando em um estado de desmagnetização global do sistema.

A dependência de Δm_N em termos do campo magnético H em sistemas envolvendo PMOID pode ser escrita como $\Delta m^D / |\Delta m_{max}^D|$, onde $\Delta m^D = -(H_C^D)^2 / [(H - H_C^D)^2 + (\Delta J_D)^2]$, H_C^D é o campo crítico de desmagnetização e ΔJ_D é a largura de linha magneto-óptica. A estreita largura da linha magneto-óptica concentra o balanço de energia das interações, levando à formação de um tipo de avalanche, semelhante às bolhas magnéticas skyrmion (Hoffmann, 2022; Jiang *et al.*, 2015).

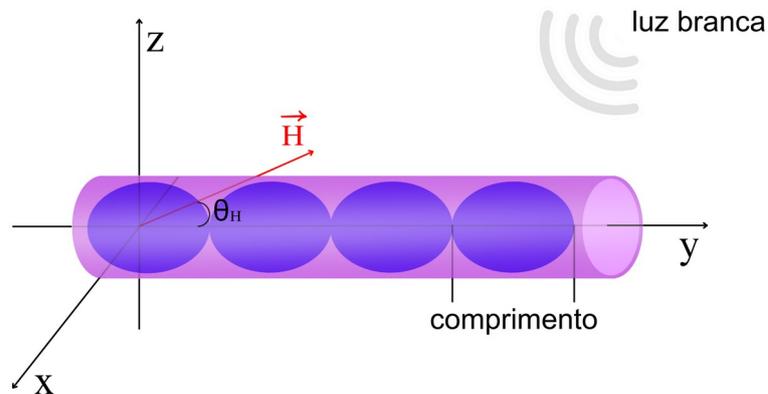
Os resultados de Δm_N refletem os efeitos de interação magnética e são determinados pela comparação entre as curvas de magnetização remanente isotérmica óptica (OIRM(H)) e desmagnetização óptica em corrente contínua (ODCD(H)). Na medição OIRM(H), o experimento inicia com a amostra previamente desmagnetizada após ter sido resfriada em um campo magnético nulo. Em seguida, aplica-se um pequeno campo magnético, permitindo que a amostra alcance o equilíbrio magnético após um intervalo de tempo adequado. Após esse período, o campo magnético é desligado e a remanência resultante é registrada. Este procedimento é repetido de forma incremental, com valores progressivamente maiores do campo magnético, até que a amostra alcance a saturação magnética e a remanência atinja seu valor máximo.

A medição ODCD(H) segue um procedimento semelhante ao da OIRM(H), com uma diferença crucial: a amostra começa em estado de saturação magnética. Nesse método, o campo magnético aplicado é lentamente invertido até atingir um pequeno valor oposto à magnetização inicial. Após isso, o campo magnético é desligado e a remanência é medida. Esse processo é repetido passo a passo, aumentando gradualmente o valor do campo magnético invertido até que a amostra alcance a saturação completa. Esses procedimentos permitem determinar o Δm_N em amostras magnéticas (Buehler *et al.*, 1996; Kelly *et al.*, 1989; Mayo *et al.*, 1991), estando alinhados com a proposta de Henkel (Henkel *et al.*, 1964; Klik *et al.*, 1997) e com os modelos desenvolvidos por J. Holanda (Holanda *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023). Por outro lado, na ausência de interações magnéticas, o comportamento do sistema é bem descrito pelo modelo clássico de Stoner e Wohlfarth (Wohlfarth *et al.*, 1958).

5.1.1 Nanofios com Partículas de Domínio Único

Aqui, analisaremos as interações magneto-ópticas em nanofios compostos por grãos elipsoidais de domínio único, com foco em como essas interações podem ser moduladas pela forma e estrutura dos nanofios. Estudaremos também como elas se manifestam em nanofios de cobre, ferro e níquel, cujas propriedades magnéticas distintas influenciam a dinâmica da magnetização e a resposta óptica. Nanofios com partículas interagentes de domínio único são estruturas extremamente pequenas, em escala nanométrica, formadas por materiais magnéticos ou condutores. Essas partículas de domínio único apresentam magnetização uniforme, sem subdivisões internas, o que potencializa suas propriedades magnéticas. Nossos resultados foram obtidos considerando um nanofio como uma cadeia de grãos elipsoidais interagentes com o comprimento dos grãos variando entre 20 e 100 nm conforme a Figura 18.

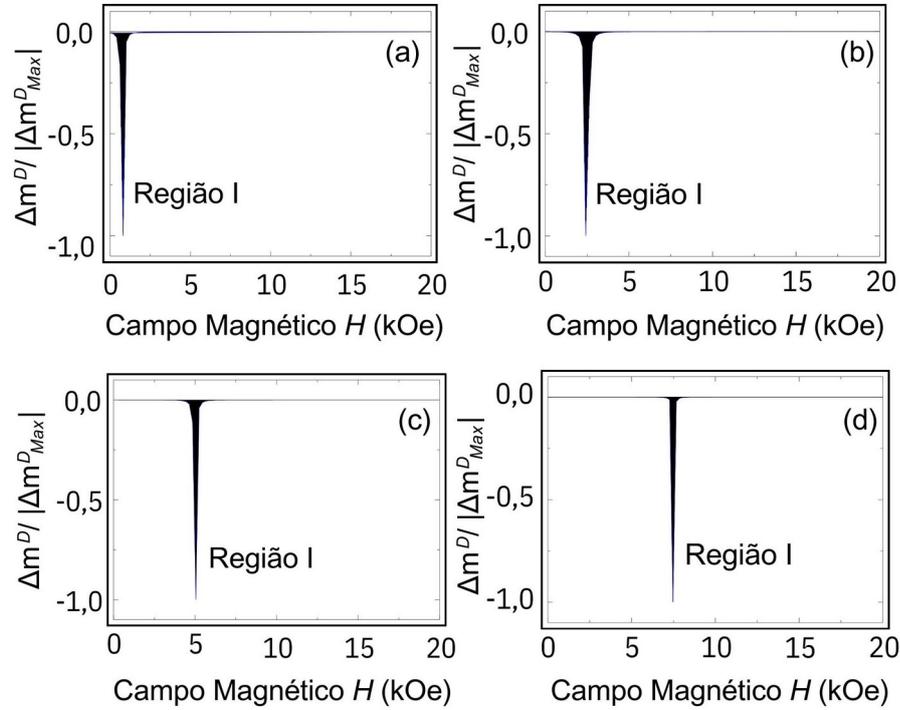
Figura 18. Esquema de um nanofio com grãos elipsoidais, influenciados por campo magnético e luz branca.



Fonte: elaborada pela própria autora.

A Figura 19 mostra as interações (Regiões I) considerando as curvas Δm_N . Os mapas de interação foram calculados a partir das interações magneto-ópticas em termos do campo magnético aplicado a diferentes campos críticos de desmagnetização H_C^D . Em sequência temos: (a) $H_C^D = 0,75$ kOe, (b) $H_C^D = 2,5$ kOe, (c) $H_C^D = 5,0$ kOe e (d) $H_C^D = 7,5$ kOe. As intensidades foram calculadas usando a equação (5), que são (a) $I_{\text{PMOID}} = 0,26$, (b) $I_{\text{PMOID}} = 0,32$, (c) $I_{\text{PMOID}} = 0,25$ e (d) $I_{\text{PMOID}} = 0,21$.

Figura 19. Mapas de interação magneto-óptica em termos do campo magnético aplicados a diferentes campos críticos de desmagnetização.

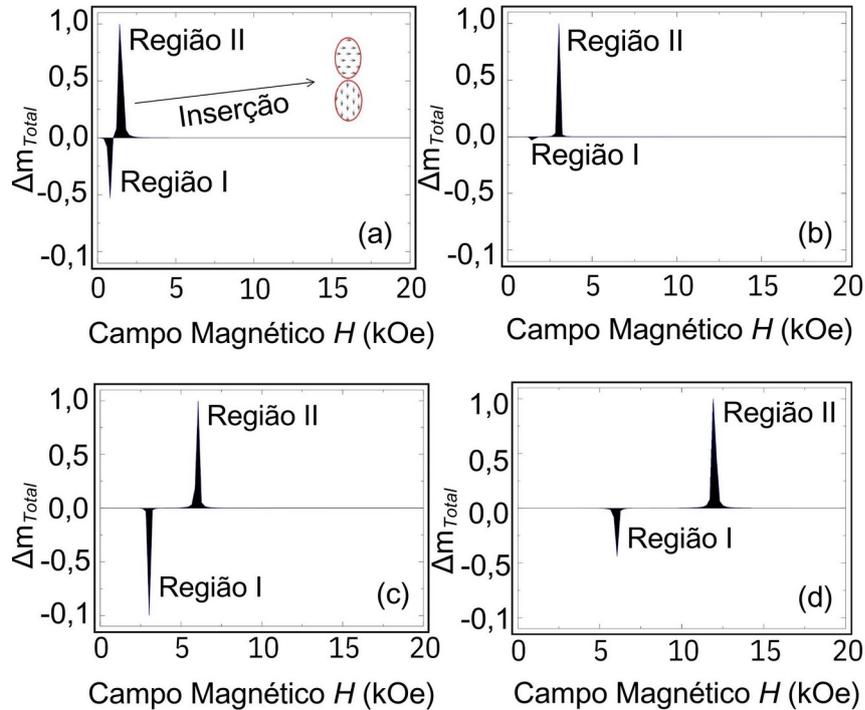


Fonte: elaborada pela própria autora.

Para analisar o PMOIM, consideramos os efeitos da desmagnetização e magnetização nas interações magneto-ópticas como, $\Delta m_{\text{Total}} = \Delta m^D/|\Delta m_{\text{Max}}^D| + \Delta m^M/|\Delta m_{\text{Max}}^M|$, onde $\Delta m^D = -(H_C^D)^2/[(H - H_C^D)^2 + (\Delta J_D)^2]$ e $\Delta m^M = (H_C^M)^2/[(H - H_C^M)^2 + (\Delta J_M)^2]$, que também pode descrever muito bem medições experimentais obtidas em laboratório (Aharoni *et al.*, 1958; Chuev *et al.*, 1948; Henkel *et al.*, 1964). Aqui, ΔJ_M é a largura de linha magneto-óptica, em que consideramos $\Delta J_M = 1\%H_C^M$ para todos os cálculos.

A Figura 20 mostra o PMOID (Regiões I) para os diferentes curvas $\Delta m^D/|\Delta m_{\text{Max}}^D|$. Os mapas de interação foram calculados a partir das interações magnéticas em termos do campo magnético H para diferentes campos críticos de desmagnetização H_C^D e magnetização H_C^M . (a) $H_C^D = 0,75$ kOe e $H_C^M = 1,5$ kOe, (b) $H_C^D = 1,5$ kOe e $H_C^M = 3,0$ kOe, (c) $H_C^D = 3,0$ kOe e $H_C^M = 6,0$ kOe, e (d) $H_C^D = 6,0$ kOe e $H_C^M = 12$ kOe.

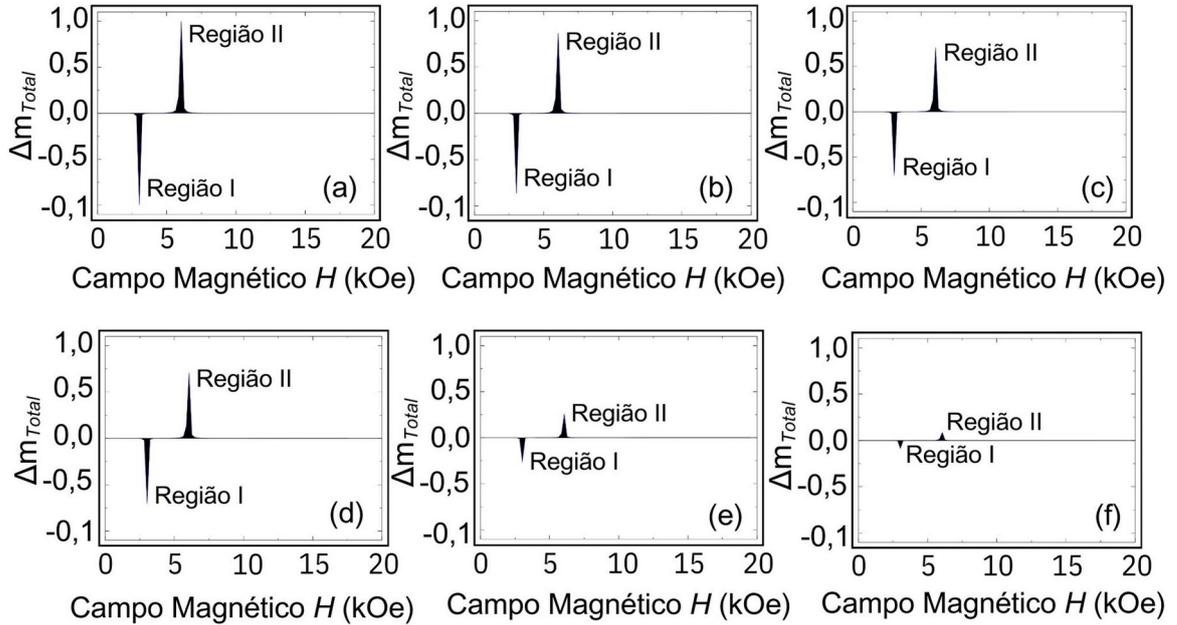
Figura 20. Mapas de interação para diferentes campos críticos de desmagnetização e magnetização.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Os mapas de interação foram determinados com as equações. (1) e (2), e as intensidades foram calculadas usando a equação (4). Para PMOID: (a) $I_{PMOID} = 0,12$, (b) $I_{PMOID} = 0,01$, (c) $I_{PMOID} = 0,21$ e (d) $I_{PMOID} = 0,12$, e para PMOIM: (a) $I_{PMOIM} = 0,35$, (b) $I_{PMOIM} = 0,21$, (c) $I_{PMOIM} = 0,27$ e (d) $I_{PMOIM} = 0,35$. O comportamento angular das interações magneto-ópticas em um sistema de forte interação, apresentamos na Figura 21, a dependência angular das interações considerando a relação $\Delta m_{Total} = (\Delta m^D / |\Delta m_{Max}^D| + \Delta m^M / |\Delta m_{Max}^M|) \cos(\theta_H)$ semelhante para o caso de sistema sem aplicação de luz para $H_C^D = 3$ kOe e $H_C^M = 6$ kOe. Os mapas de interação foram obtidos com as equações (2), (3) e $\Delta m_{Total} = (\Delta m^D / |\Delta m_{Max}^D| + \Delta m^M / |\Delta m_{Max}^M|) \cos(\theta_H)$ para $H_C^D = 3$ kOe e $H_C^M = 6$ kOe. (a) $\theta_H = 0^\circ$, (b) $\theta_H = 30^\circ$, (c) $\theta_H = 45^\circ$, (d) $\theta_H = 60^\circ$, (e) $\theta_H = 75^\circ$ e (f) $\theta_H = 85^\circ$.

Figura 21. Dependência angular de interações magneto-ópticas para diferentes ângulos.



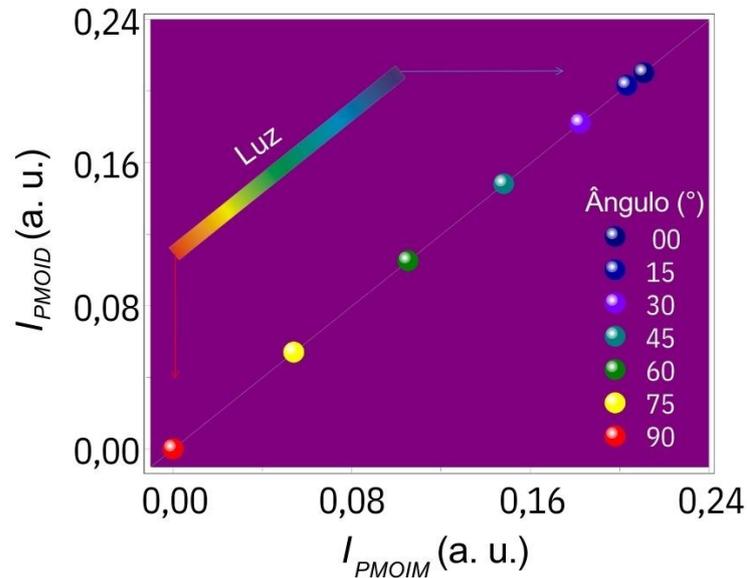
Fonte: elaborada pela própria autora.

Essa dependência indica que, quando um campo magnético é aplicado ao longo do eixo do nanofio, os comportamentos PMOID e PMOIM alcançam seus valores máximos. No entanto, esses comportamentos sofrem uma redução progressiva à medida que o ângulo θ_H entre o campo magnético e o eixo do fio aumenta, evidenciando uma relação direta entre a orientação do campo e a intensidade das interações. Esse fenômeno está intrinsecamente associado à diminuição da intensidade das interações magnéticas entre os grãos, que ocorre devido à orientação gradual do campo magnético em direção à perpendicularidade ao eixo do fio, resultando em uma configuração menos eficiente para a transmissão dessas interações.

Na Figura 22 mostramos a variação geral dos valores de intensidade das interações magneto-ópticas (I_{PMOID} e I_{PMOIM}) em função do ângulo θ_H , onde usamos $\Delta m_{Total} = (\Delta m^D / |\Delta m_{Max}^D| + \Delta m^M / |\Delta m_{Max}^M|) \cos(\theta_H)$ com $H_C^D = 3$ kOe, $\Delta J_D = 1\% H_C^D$, $H_C^M = 6$ kOe e $\Delta J_M = 1\% H_C^M$. Definimos para qualquer comprimento de onda as melhores condições para observar o número máximo de interações magneto-ópticas, que são quando o PMOID e o PMOIM possuem intensidades semelhantes. O gráfico

apresenta as condições ideais para observar o número máximo de interações magneto-ópticas com o uso de luz branca.

Figura 22. Interações magneto-ópticas (I_{PMOID} e I_{PMOIM}) em função do ângulo θ_H .



Fonte: elaborada pela própria autora.

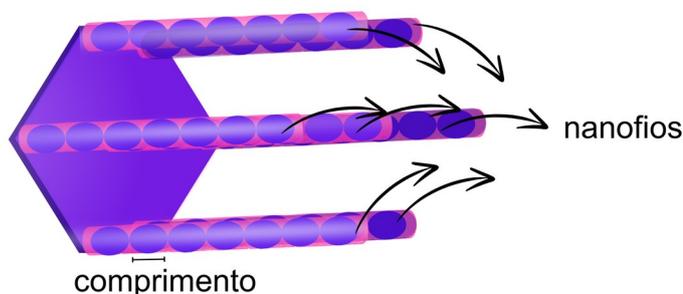
Os resultados fornecem uma descrição clara dessas interações, considerando a dependência angular e o campo magnético durante o processo de magnetização. Além disso, evidenciam que os estados magnéticos globais, como a desmagnetização e a magnetização, impactam a excitação de ondas de spin, tanto por métodos convencionais quanto pela interação luz-matéria.

5.1.2 Nanofios de Cobalto, Ferro e Níquel

Aqui, analisamos as intensidades das interações magneto-ópticas em arranjos hexagonais de nanofios magnéticos (Figura 23) por meio de medições experimentais e simulações numéricas. Nanofios compostos por (i) Cobalto (Co), (ii) Ferro (Fe) e (iii) Níquel (Ni) foram eletrodepositados em membranas de alumina, utilizando moldes de óxido de alumínio anódico (AAO) para a preparação dos arranjos hexagonais. O processo de fabricação das membranas AAO envolveu a oxidação eletroquímica de placas de alumínio de alta pureza (Aldrich 99,9999%) sob uma tensão de 20 V em soluções ácidas aquosas. Como resultado, obtivemos poros cilíndricos uniformes com diâmetro médio de 27 nm e uma distância entre centros de

55 nm, nos quais os nanofios foram eletrodepositados, formando estruturas ordenadas.

Figura 23. Arranjo hexagonal de nanofios.



Fonte: elaborada pela própria autora.

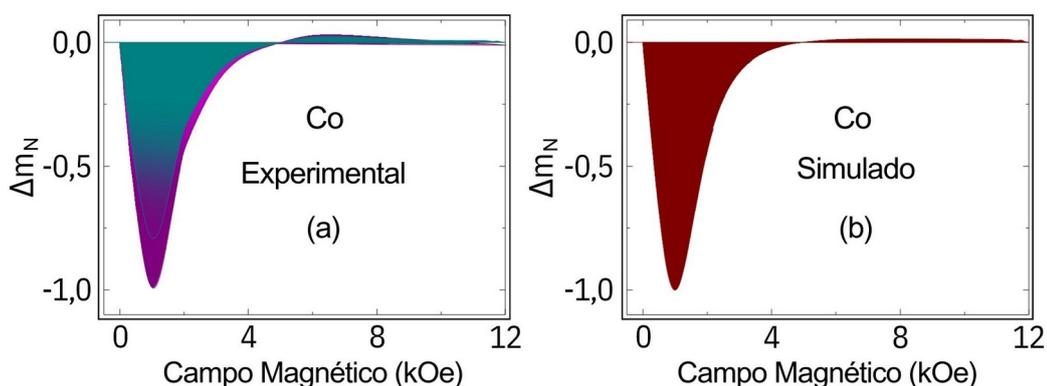
Para o experimento, utilizamos o espectrômetro de absorção magneto-óptica descrito aqui anteriormente. Usamos também um modelo MAV MicroSense EV7 com uma sensibilidade de detecção magnética na ordem de 10^{-7} emu, uma lâmpada de arco DC Hg(Xe) de 1000 W forneceu luz branca colimada, que foi modulada por um chopper operando a uma frequência de 1 MHz e amplitude de 10 W. A luz modulada foi então focada na amostra, permitindo a medição das interações magneto-ópticas por meio do MAV. Além disso, parte do sinal refletido foi capturada por um fotodetector, cuja função foi monitorar possíveis perdas de tensão durante o processo experimental.

(i) Cobalto (Co)

Iniciamos nossos estudos analisando arranjos de nanofios de cobalto (Co), onde o estado PMOID apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = -1,40$ e $I_{M-MO}^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = -1,70$ para a desmagnetização pura e a desmagnetização magneto-óptica, respectivamente. Isso permitiu obter uma intensidade de desmagnetização puramente óptica $I_O^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = -0,34$. Da mesma forma, o estado PMOIM apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = 0,16$, e $I_{M-MO}^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = 0,11$ para a magnetização pura e magnetização magneto-óptica, respectivamente. Isso permitiu obter uma intensidade de magnetização puramente óptica $I_O^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Co}} = -0,05$.

Na Figura 24, é possível observar as curvas experimentais Δm_N de arranjos de nanofios de cobalto (Co) em função do campo magnético (H), tanto na ausência (curva vinho) quanto na presença (curva roxa) de luz modulada, que foram obtidas considerando as curvas de magnetização remanente isotérmica óptica (OIRM(H)) e desmagnetização óptica por corrente contínua (ODCD(H)).

Figura 24. Curva Δm_N (a) experimental e (b) teórica para arranjos de nanofios de cobre



Fonte: elaborada pela própria autora.

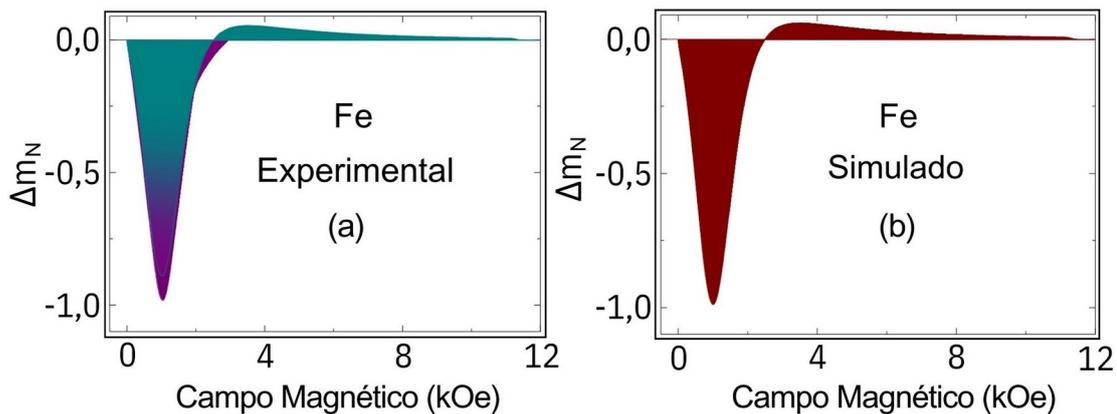
Em nanofios de cobalto, onde os modos de reversão de magnetização predominantes são ondulação e flambagem (Cvelbar, 2011; Henkel, 1964; Kelly *et al.*, 1989; Klik *et al.*, 1997; Landeros *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2019; Sugano *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2018), os efeitos da interação luz-matéria magnética são devidos às paredes do domínio de ondulação e flambagem.

O modo de ondulação ocorre ao redor do eixo do nanofio, possibilitando um fluxo tridimensional fechado, no qual os spins se invertem progressivamente por meio da propagação de um vórtice. Já o modo de flambagem é similar ao modo coerente, com a magnetização também sendo uniforme para qualquer plano perpendicular ao eixo do nanofio. No entanto, neste caso, existe uma periodicidade adicional na distribuição da magnetização ao longo do eixo do nanofio. O comportamento observado nesse fenômeno resulta em uma variação energética tanto no regime dipolar quanto no regime de troca, o que destaca o novo comportamento magneto-óptico.

(ii) Ferro (Fe)

Continuamos nossos estudos em arranjos de nanofios de ferro (Fe), e realizamos medidas de Δm_N sem (vinho) e com (roxo) a incidência de luz modulada (Figura 25), que apresentou intensidades para os estados PMOID e PMOIM da mesma forma que as amostras de cobre. As curvas experimentais Δm_N de arranjos de nanofios de ferro (Fe) em função do campo magnético (H), obtidas considerando as curvas de magnetização remanente isotérmica óptica (OIRM(H)) e desmagnetização óptica por corrente contínua (ODCD(H)).

Figura 25. Curva Δm_N (a) experimental e (b) teórica para arranjos de nanofios de ferro.



Fonte: elaborada pela própria autora.

O estado PMOID apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -1,05$, e $I_{M-MO}^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -1,18$ para a desmagnetização pura e a desmagnetização magneto-óptica, respectivamente; isso permitiu obter uma intensidade de desmagnetização puramente óptica $I_O^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -0,13$. Paralelamente, o estado PMOIM apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -1,05$, e $I_{M-MO}^{M-EX}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -1,18$ para a magnetização pura e magnetização magneto-óptica, respectivamente; o que também nos permitiu obter uma intensidade de magnetização puramente óptica $I_O^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Fe}} = -0,13$.

Em nanofios de ferro, onde os modos de reversão de magnetização predominantes são transversais e de vórtice (Cvelbar, 2011; Henkel, 1964; Kelly et

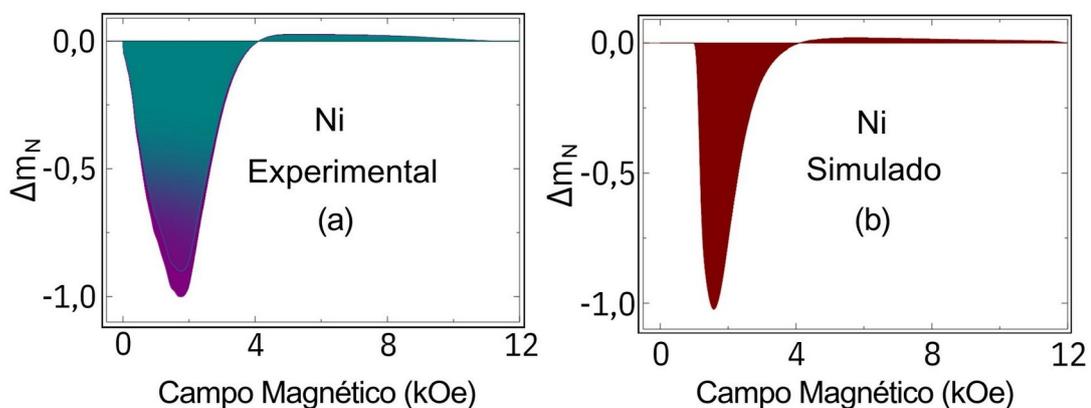
al., 1989; Klik *et al.*, 1997; Landeros *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2019; Sugano *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2018), os efeitos da interação luz-matéria magnética são devidos às paredes transversais e de domínio de vórtice.

No modo transversal, os spins se invertem progressivamente por meio da propagação de uma parede de domínio transversal, enquanto o modo vórtice corresponde a uma ondulação localizada. De forma análoga aos resultados obtidos com as amostras de Co, observamos um comportamento no fenômeno que possibilita variações energéticas nos regimes dipolar e de troca, evidenciando a relevância dos efeitos magneto-ópticos.

(iii) Níquel (Ni)

Finalizamos nossos estudos considerando arranjos de nanofios de níquel (Ni), e realizamos as medidas de Δm_N sem (vinho) e com (roxo) a incidência de luz modulada (Figura 26), que apresentou intensidades para os estados PMOID e PMOIM. As curvas experimentais Δm_N de arranjos de nanofios de níquel (Ni) em função do campo magnético (H), também foram obtidas considerando as curvas de magnetização remanente isotérmica óptica (OIRM(H)) e desmagnetização óptica por corrente contínua (ODCD(H)).

Figura 26. Curva Δm_N (a) experimental e (b) teórica para arranjos de nanofios de níquel



Fonte: elaborada pela própria autora.

O estado PMOID apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = -1,78$, e $I_{M-MO}^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = -1,98$ para a desmagnetização pura e a desmagnetização magneto-óptica, respectivamente; isso permitiu obter uma intensidade de desmagnetização puramente óptica $I_O^{D-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = -0,20$. Da mesma forma, o estado PMOIM apresentou as seguintes intensidades, $I_M^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = 0,14$, e $I_{M-MO}^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = 0,12$ para a magnetização pura e magnetização magneto-óptica, respectivamente; isso permitiu obter uma intensidade de magnetização puramente óptica $I_O^{M-Ex}(\text{a.u.})_{\text{Ni}} = 0,02$. Realizamos simulações utilizando os modelos apresentados nos trabalhos de Silva (Silva *et al.*, 2023) e Holanda (Holanda, 2021), para todas as amostras.

Nos nanofios de Ni, o fenômeno também é sensível ao campo magnético estático, sendo proporcional à magnetização remanente do material e à intensidade da luz incidente. Nesse tipo de nanofio, onde o modo predominante de reversão de magnetização é coerente (Holanda, 2021; Landeros *et al.*, 2007; Lavín *et al.*, 2009; Yalçın *et al.*, 2015), os efeitos de interação luz-matéria magnética são atribuídos às paredes de domínio entre os modos coerentes dos grãos. Nesse contexto, os grãos, que são monodomínios puros, estão desalinhados uns com os outros, o que implica que as interações ocorrem devido à reversão de magnetização entre os grãos.

É importante ressaltar que o modo coerente envolve uma rotação uníssona de todos os spins. Além disso, o comportamento observado permitiu uma variação energética nos regimes dipolar e de troca entre grãos, evidenciando um comportamento magneto-óptico de interface. Contudo, nossos resultados experimentais e simulados apresentaram uma discrepância considerável, pois, no modelo, adotamos uma abordagem similar às anteriores, onde a variação energética também incorpora contribuições internas aos grãos.

As interações ópticas decorrem do acoplamento do campo eletromagnético da luz com as paredes de domínio existentes entre os grãos monodomínio nos nanofios. O fenômeno é sensível ao campo magnético estático e proporcional à magnetização remanente do material e à intensidade da luz incidente. Esses resultados indicam que os efeitos responsáveis pelos estados magnéticos globais (desmagnetizados e magnetizados) influenciam a excitação de ondas magneto-ópticas, seja por meio do método convencional ou pela interação luz-matéria.

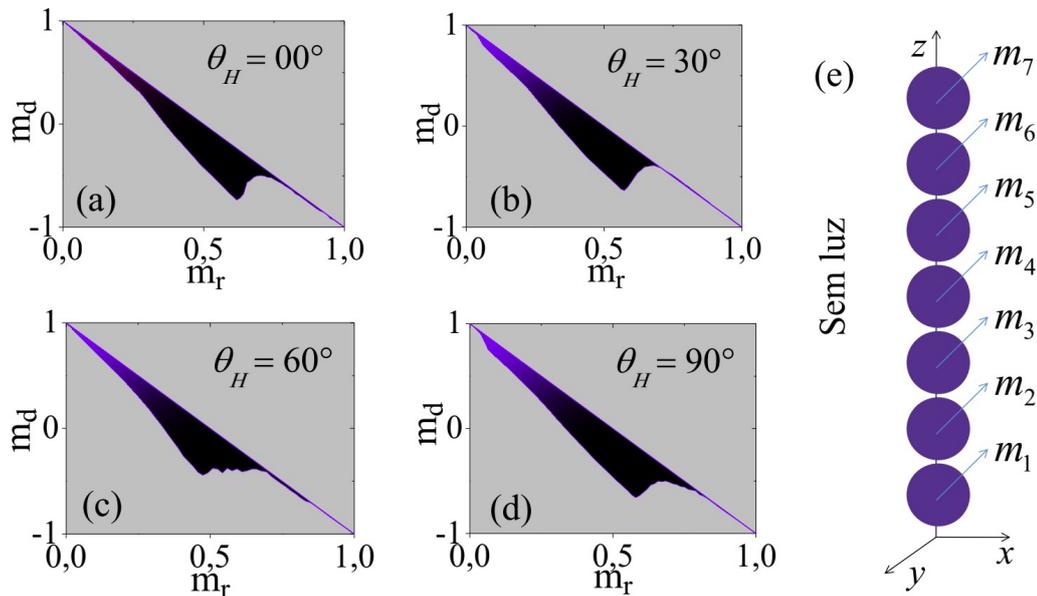
5.3 TRANSFERINDO CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS PARA NANOPARTÍCULAS ESFÉRICAS DE MAGHEMITA ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)

A maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) é um óxido de ferro pertencente à mesma família da magnetita, possuindo uma estrutura cristalina de espinélio inverso. Essa estrutura forma uma rede cúbica de face centrada, com um parâmetro de rede de $a = 0,834$ nm, e apresenta uma magnetização de saturação entre 70 e 85 emu/g (Goetze *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2001). A maghemita pode ser considerada como a versão oxidada da magnetita, resultante de um processo no qual um íon Fe^{2+} é removido do sítio, criando um defeito na rede cristalina, enquanto outro íon Fe^{2+} se oxida para Fe^{3+} . Essa transformação é a principal diferença entre a maghemita e a magnetita, sendo que na maghemita o ferro está predominantemente no estado trivalente (Aphsteguy *et al.*, 2007; Verwey, 1939; Verwey *et al.*, 1947).

As amostras utilizadas em nossos experimentos consistiram em nanopartículas esféricas de maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) com diâmetro médio de 45 nm. Essas nanopartículas foram posicionadas em um tubo cilíndrico acoplado à extremidade da haste de um Magnetômetro de Amostra Vibrante (MAV), onde foram submetidas simultaneamente à aplicação de luz e de um campo magnético. Uma orientação inicial foi definida como referência para permitir o giro do cilindro, contendo as nanopartículas, em um intervalo angular de $\theta_H = 0^\circ$ a $\theta_H = 90^\circ$. Esse procedimento possibilitou a análise da distribuição das interações magneto-ópticas e da anisotropia magnética entre as diferentes nanopartículas, fornecendo informações detalhadas sobre suas propriedades magnéticas e ópticas.

Na Figura 27, apresentamos os mapas de interação obtidos por meio de interações puramente magnéticas, ou seja, sem a incidência de luz. O ângulo θ_H variou de (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° e (d) 90° . Em (e), é mostrada a distribuição dos momentos magnéticos das nanopartículas, responsáveis pelo efeito desmagnetizante local e global observado nos mapas. A diferença nos formatos dos mapas revela a sensibilidade das interações magneto-ópticas à aplicação do campo magnético em diferentes ângulos θ_H . A anisotropia magnética em cada nanopartícula também contribui para a direção da polarização magnética na ausência de luz ou para campos magnéticos baixos, sendo causada pela alteração na forma esférica das nanopartículas.

Figura 27. Mapas de interação obtidos por meio de interações puramente magnéticas.



Fonte: elaborada pela própria autora.

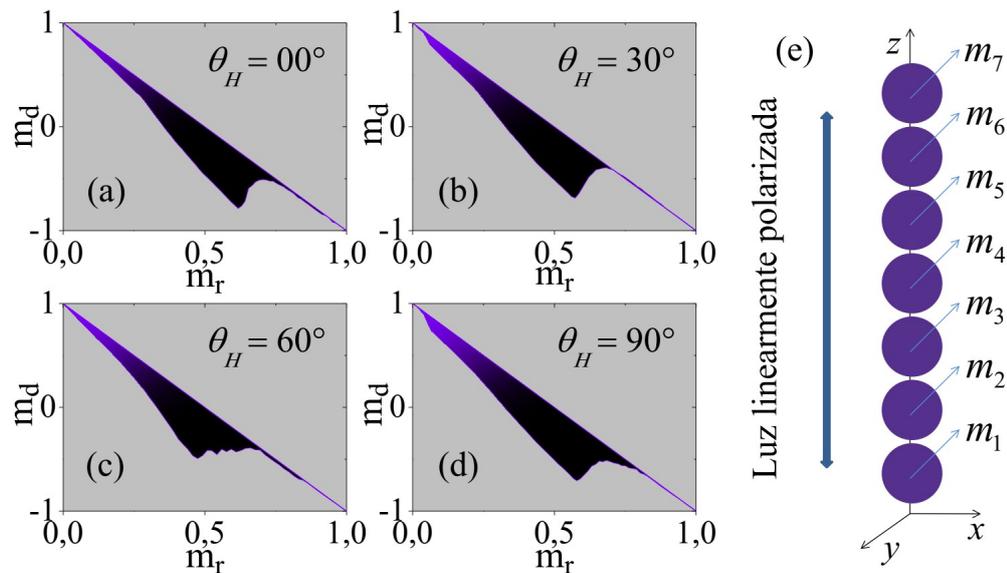
Esses mapas de interação são influenciados pela anisotropia magnética local de cada nanopartícula, combinada com a interação dipolar magnética, que desempenha um papel crucial na intensidade dos gráficos $m_d(H)$ versus $m_r(H)$, conforme ilustrado na Figura 27 (e). A reversão simultânea dos momentos magnéticos das nanopartículas caracteriza um comportamento coerente na reversão da magnetização, evidenciando o efeito exclusivamente desmagnetizante presente nos mapas.

Investigamos os efeitos da interação luz-matéria magnética introduzindo luz no sistema sem alterar o método de medição. Para isso, realizamos medições das interações magneto-ópticas utilizando luz polarizada linearmente. As mudanças nos mapas ($m_d(H)$ versus $m_r(H)$) indicaram a presença de uma contribuição magneto-óptica, similar à observada em sistemas que apresentam apenas interações magnéticas (Holanda *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2023). O ângulo θ_H foi ajustado em diferentes valores: (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° e (d) 90° . Além disso, em (e) foi apresentada a distribuição dos momentos magnéticos das nanopartículas sob a incidência da luz polarizada linearmente.

Nesse contexto, foi observado um aumento na intensidade das interações, como mostrado na Figura 28, o que se traduz em uma expansão dos mapas em

comparação com aqueles associados às interações puramente magnéticas, ilustrados na Figura 27. Esse comportamento sugere que características ópticas da luz foram transferidas para a matéria magnética por meio da interação magneto-óptica, evidenciando um efeito significativo dessa combinação entre luz e magnetismo.

Figura 28. Mapas de interação obtidos por meio de interações magneto-ópticas.



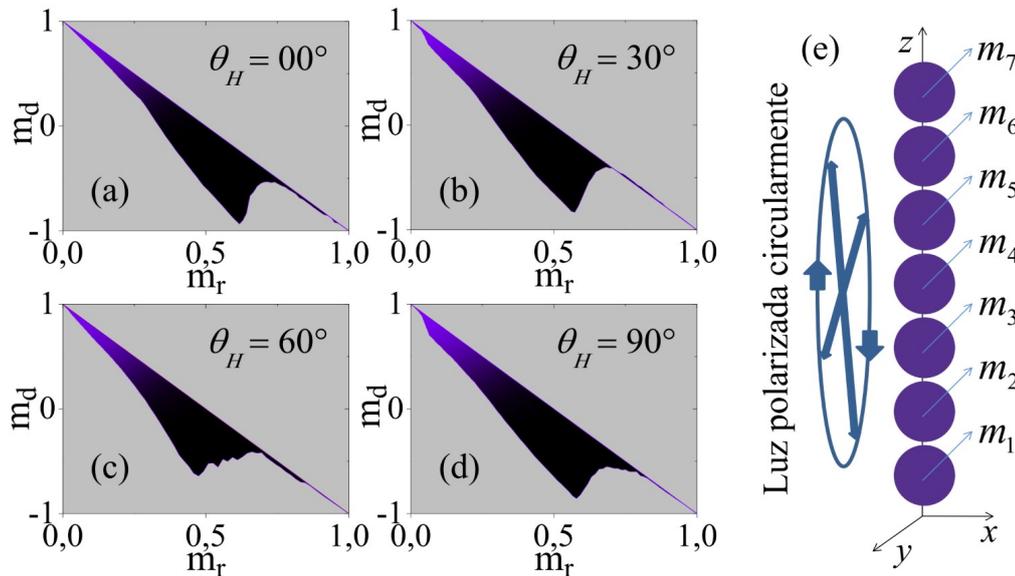
Fonte: elaborada pela própria autora.

Aprofundamos nossa análise ao polarizar circularmente a luz e repetir as medições de interação. Os mapas de interação apresentados na Figura 29 revelam um aumento significativo em comparação com os das Figuras 27 e 28, independentemente do ângulo θ_H . Nessas novas medições, constatamos que a intensidade das interações magneto-ópticas praticamente dobrou em relação às obtidas com luz polarizada linearmente na Figura 28. Esse comportamento indica que, enquanto o aumento nas interações foi de X ao comparar as Figuras 28 e 27 para luz polarizada linearmente, ele atingiu 2X ao comparar as Figuras 29 e 28 para luz polarizada circularmente.

Os mapas de interação ($m_d(H)$ versus $m_r(H)$) da Figura 29 foram obtidos por meio de interações magneto-ópticas, com o ângulo θ_H variando entre (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° e (d) 90° . Além disso, em (e) é apresentada a distribuição dos momentos magnéticos das nanopartículas sob a incidência de luz branca polarizada circularmente. Esses resultados destacam a influência da polarização da luz sobre

as interações magneto-ópticas, proporcionando informações sobre a transferência de propriedades ópticas para sistemas magnéticos.

Figura 29. Mapas de interação obtidos por meio de interações magneto-ópticas com luz branca polarizada circularmente.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Ao analisar as Figuras 28 (e) e 29 (e), observamos que a interação luz-matéria magnética na Figura 28 (e) resulta em apenas uma direção para a polarização linear das interações magneto-ópticas. Em contraste, na Figura 29 (e), a interação magnética luz-matéria desencadeia duas direções associadas à polarização circular das interações magneto-ópticas. Esse comportamento reflete as diferenças fundamentais nos efeitos produzidos pelas polarizações linear e circular no sistema estudado.

Nossas observações revelaram que, independentemente do ângulo θ_H , a intensidade das interações magneto-ópticas aumentou em um valor X ao comparar a Figura 28 com a Figura 27 para luz polarizada linearmente. Já para luz polarizada circularmente, esse aumento foi de 2X ao comparar a Figura 29 com a Figura 28. Esses resultados abrem novas possibilidades no contexto das equações do eletromagnetismo, ao demonstrar que as interações magneto-ópticas possuem características tanto magnéticas quanto ópticas, permitindo uma integração funcional entre essas áreas.

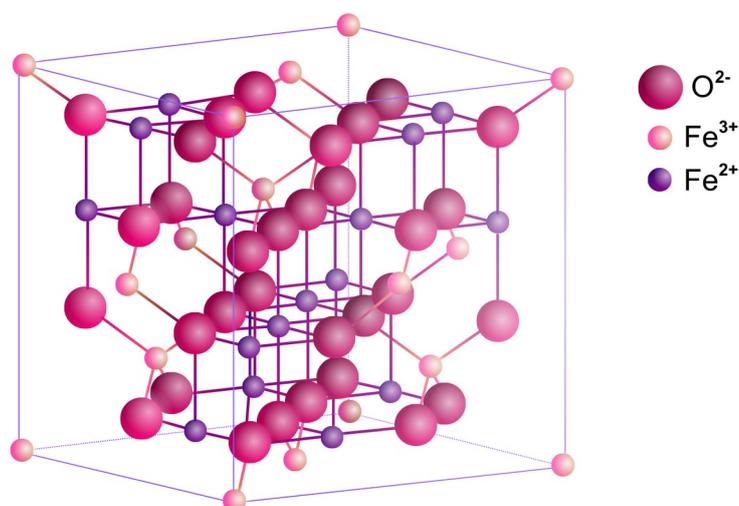
5.4 INTERAÇÕES MAGNETO-ÓPTICAS EM NANOESTRUTURAS DE $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$

A síntese de nanoestruturas tem se consolidado como uma área essencial na ciência e tecnologia, permitindo o desenvolvimento de materiais com propriedades exclusivas, como alta reatividade, condutividade ajustável e maior resistência mecânica. Essas características são cruciais para a criação de dispositivos inovadores e eficientes, com aplicações em áreas como eletrônica, energia e biomedicina. No campo científico, a síntese de nanoestruturas facilita a investigação de fenômenos em escala nanométrica, ampliando o conhecimento sobre as propriedades dos materiais e abrindo novas possibilidades para o design de sistemas funcionais.

5.4.1 Magnetita (Fe_3O_4)

A magnetita (Fe_3O_4) é um material de grande interesse devido à sua estrutura cúbica de face centrada e seu parâmetro de rede de $a = 0,839 \text{ nm}$. Ela apresenta uma magnetização de saturação na faixa de 90 a 100 emu/g (Goetze *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2001). A principal característica que diferencia a magnetita de outros óxidos de ferro é a presença de íons de ferro divalentes (Fe^{2+}) e trivalentes (Fe^{3+}) em sua estrutura (Figura 30). Isso confere à magnetita propriedades magnéticas únicas, que são exploradas em diversas aplicações tecnológicas e científicas.

Figura 30. Estrutura da magnetita



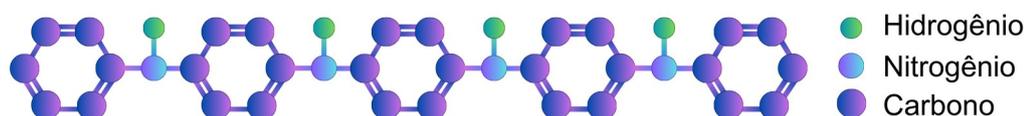
Fonte: elaborada pela própria autora.

A magnetita possui uma estrutura cristalina do tipo espinélio inverso, onde os íons Fe^{3+} ocupam os sítios tetraédricos, enquanto os sítios octaédricos são ocupados por uma combinação de Fe^{3+} ($S = 5/2$) e Fe^{2+} ($S = 2$) (Cai *et al.*, 1998; Henthorn *et al.*, 2022; Mckenna *et al.*, 2014; Vijayakumar *et al.*, 2000). O arranjo dos íons nos sítios octaédricos e tetraédricos, acompanhado do ordenamento dos spins, resulta em um cancelamento dos momentos magnéticos dos íons Fe^{3+} , sendo o momento magnético líquido gerado apenas pelos íons Fe^{2+} . Além disso, a magnetita apresenta uma temperatura Curie de 850 K, o que a torna um material de interesse para aplicações em altas temperaturas.

5.4.2 Polianilina (PANI)

A polianilina (PANI – Figura 31), por sua vez, também tem atraído considerável atenção devido à sua facilidade de síntese, baixo custo, estabilidade química e alta condutividade elétrica em comparação com outros polímeros condutores (Bednarczyk *et al.*, 2021; Virji *et al.*, 2004). Os polímeros, que são macromoléculas compostas pela repetição de unidades estruturais chamadas monômeros, estão ligados por ligações covalentes. Essas longas cadeias formam estruturas que conferem aos polímeros propriedades únicas, tornando-os essenciais em uma variedade de aplicações industriais e cotidianas. As propriedades dos polímeros dependem de diversos fatores, como a natureza das unidades monoméricas, o tamanho das cadeias e a cristalinidade, entre outros aspectos (Bednarczyk *et al.*, 2021; Virji *et al.*, 2004).

Figura 31. Estrutura molecular da polianilina



Fonte: elaborada pela própria autora.

Para a preparação da polianilina (PANI), os métodos mais utilizados são os processos químico e eletroquímico. No método eletroquímico, o monômero anilina ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$) é oxidado em soluções eletrolíticas ácidas, como H_2SO_4 , HCl e HNO_3 , entre outros. Independentemente do método de síntese, a estrutura da polianilina na

forma básica (não dopada) pode apresentar três estados fundamentais: oxidado, reduzido e oxidado-reduzido. Essas diferentes formas estruturais da PANI são essenciais para suas propriedades condutivas, o que contribui para suas diversas aplicações em dispositivos eletrônicos e sensores.

Um estado oxidado da polianilina (PANI) é conhecido como pernigranilina, enquanto o estado reduzido é chamado de leucoeseraldina. Já o estado intermediário, caracterizado por 50% de oxidação e 50% de base esmeraldina, é denominado estado oxidado-reduzido (Ha *et al.*, 2007). Esses três estados são isolantes. No entanto, para obter o sal esmeraldina, a forma condutora do PANI, a base esmeraldina reage com ácido, promovendo a protonação dos átomos de nitrogênio ligados aos anéis benzenoide e quinóide. Esse processo leva à separação de cargas, formando polarons que resultam na condutividade esperada (Bednarczyk *et al.*, 2021; Virji *et al.*, 2004).

5.4.3 Magnetita/Polianilina (Fe_3O_4 /PANI)

Nos últimos anos, as nanoestruturas contendo óxido de ferro e PANI têm sido amplamente investigadas devido à combinação ideal de propriedades magnéticas e condutividade polimérica (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004). Estudos recentes indicam que as estruturas Fe_3O_4 /PANI apresentam propriedades elétricas e magnéticas promissoras, possibilitando aplicações em diversas áreas, como armazenamento de dados, ferrofluidos, optoeletrônica, spintrônica, administração de medicamentos, degradação de corantes na indústria têxtil, entre outras (Bednarczyk *et al.*, 2021; Cai *et al.*, 1998; Ha *et al.*, 2007; Mckenna *et al.*, 2014; Virji *et al.*, 2004).

A primeira estrutura de PANI contendo nanopartículas de Fe_3O_4 foi obtida pela mistura de uma solução aquosa de Fe_3O_4 com base esmeraldina (Ha *et al.*, 2007). Observou-se que as propriedades superparamagnéticas dessa estrutura estão associadas às nanopartículas de Fe_3O_4 incorporadas ao PANI. Além disso, verificou-se que as características desses sistemas, envolvendo polianilina e óxidos de ferro, dependem diretamente do tamanho das partículas, das interações entre elas e da temperatura. Em consequência, diversos grupos de pesquisa têm desenvolvido novos compósitos, alterando as rotas de síntese para explorar suas

características magnéticas e condutivas (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004).

5.4.4 Sintetizando Nanoestruturas de Fe₃O₄/PANI com Radiação Ultravioleta

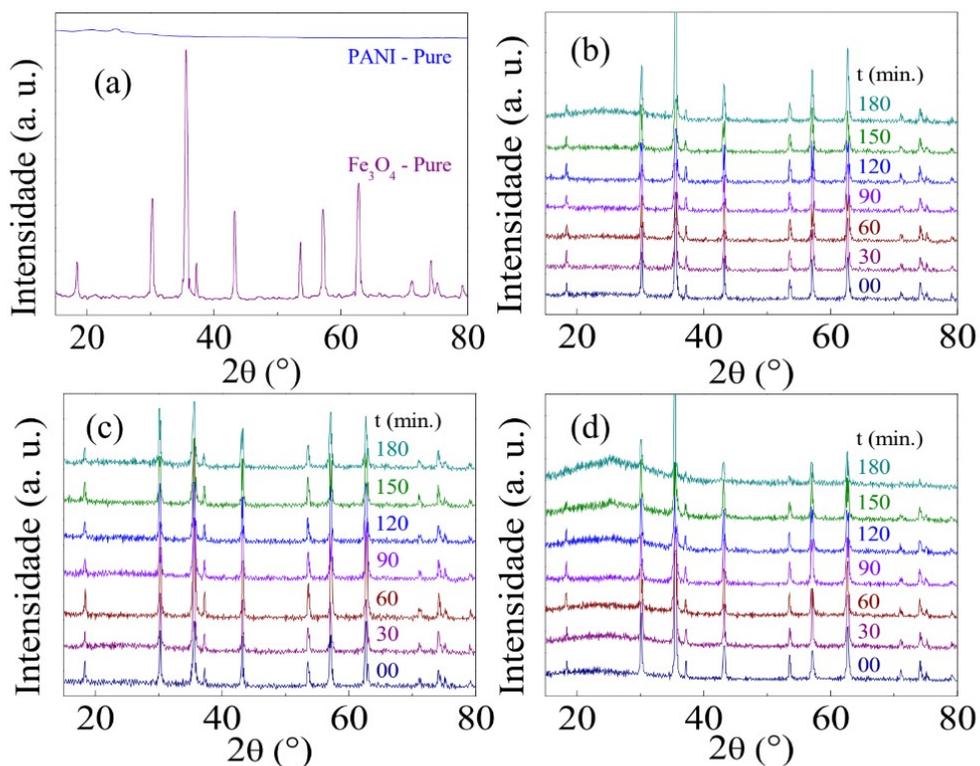
A síntese das nanoestruturas de Fe₃O₄/PANI foi conduzida em um sintetizador de nanoestruturas com radiação ultravioleta (Figura 17), conforme descrito anteriormente, utilizando nanopartículas esféricas comerciais de óxido de ferro adquiridas da Sigma-Aldrich. O procedimento seguiu as etapas detalhadas a seguir:

1. Uma quantidade de 0,1 g de nanopartículas foi transferida para um tubo de ensaio e misturada com 6 mL de uma solução de sulfato de anilina, preparada com 0,5 mol/L de anilina e 1 mol/L de H₂SO₄.
2. A solução resultante foi colocada em um agitador magnético QUIMIS, modelo Q261M, equipado com aquecedor, operando a 1500 rpm por 3,5 horas. Durante esse período, a solução foi exposta à radiação ultravioleta (UV) emitida por uma lâmpada Cole-Parmer 97620-42, com comprimento de onda de 365 nm e potência de 400 W. A intensidade da radiação UV foi ajustada para 360 W por meio de um dimmer, e as temperaturas do agitador magnético foram fixadas em 310 K, 330 K e 350 K.
3. O processo foi conduzido em um ambiente fechado, utilizando dois controladores de temperatura: um modelo 9700 da Scientific Instruments e outro com termopar diferencial, garantindo um controle preciso das condições térmicas. Durante a síntese, amostras foram retiradas do sistema a cada 30 minutos para monitoramento e análise.
4. As nanoestruturas foram submetidas a um processo de centrifugação e lavagens sucessivas com água destilada e acetonitrila, até que a solução sobrenadante apresentasse aspecto transparente. Posteriormente, as nanoestruturas foram secas em estufa nas temperaturas de 310 K, 330 K e 350 K.

Todo o processo foi monitorado e controlado por meio de uma interface gráfica desenvolvida em Python.

As medições de difração de raios X foram realizadas utilizando um difratômetro Shimadzu XRD-7000, com fonte de radiação $K\alpha_{Cu}$ ($\lambda = 0,1542$ nm), tensão de 40 kV e corrente de 30 mA. As amostras analisadas correspondem a nanoestruturas de $Fe_3O_4/PANI$ tratadas a 310 K, 330 K e 350 K sob radiação UV, com diferentes tempos de síntese (t). Para cada temperatura, foram preparadas sete amostras, com tempos de reação variando de $t = 0$ min a $t = 180$ min, em intervalos de 30 minutos. A Figura 32 apresenta os seguintes resultados: (a) difração de raios X para amostras puras de Fe_3O_4 e PANI; (b), (c) e (d) difração de raios X para amostras de $Fe_3O_4/PANI$ sintetizadas sob radiação UV com comprimento de onda de 365 nm, destacando os diferentes tempos t e temperaturas utilizadas: 310 K (b), 330 K (c) e 350 K (d) durante a síntese.

Figura 32. Difração de raios X para amostras puras de Fe_3O_4 e PANI sintetizadas sob radiação UV



Fonte: elaborada pela própria autora.

Os diâmetros médios do cristalito foram calculados a partir dos difratogramas usando a equação 1 de Sherrer (Holzwarth *et al.*, 2011), definida por,

$$d_{DRX} = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (6)$$

onde d_{DRX} é o diâmetro médio do cristalito, e k é uma constante que depende da forma do cristalito. Assim, $k = 1$ (partícula esférica), λ representa o comprimento de onda da radiação incidente ($K\alpha_{Cu} = 0,1542$ nm), e β é a largura a meia altura do pico difratado mais intenso, localizado em 2θ (Holzwarth *et al.*, 2011). O valor de β foi obtido ajustando o pico de maior intensidade utilizando uma função Pseudo-Voigt, que é uma combinação de funções gaussiana e lorentziana. A Tabela 1 apresenta o tamanho médio de cristalito estimado por difração de raios X para nanoestruturas de $Fe_3O_4/PANI$ com diferentes tempos de síntese sob radiação UV com comprimento de onda de 365 nm e temperaturas de síntese de 310 K, 330 K e 350 K.

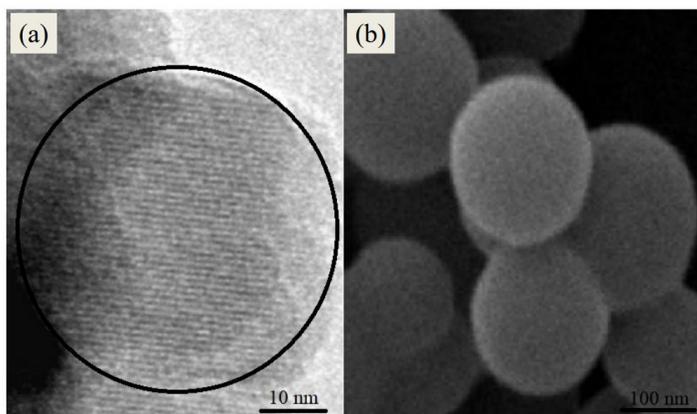
Tabela 1. Diâmetro médio das amostras sintetizadas e todas as temperaturas

Temperatura	310 K	330 K	350 K
Tempo de Síntese (min)	Diâmetro		
0	44 ± 1.2	44 ± 1.2	44 ± 1.2
30	44 ± 1.0	44 ± 1.2	44 ± 1.1
60	43 ± 1.6	44 ± 1.2	43 ± 1.3
90	42 ± 1.4	44 ± 1.1	42 ± 1.2
120	41 ± 1.7	43 ± 1.4	41 ± 1.6
150	40 ± 1.1	43 ± 1.3	40 ± 1.4
180	39 ± 1.3	42 ± 1.6	39 ± 1.7

Fonte: elaborada pela própria autora.

Na Figura 33 (a), é apresentada uma micrografia de uma nanopartícula cristalina de Fe_3O_4 obtida por Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), utilizando um modelo 300 kV FEG Tecnai. Já na Figura 33 (b), mostramos uma micrografia das nanoestruturas de $Fe_3O_4/PANI$, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o modelo 200 kV FEG Quanta. Observa-se que as nanoestruturas de $Fe_3O_4/PANI$, visualizadas por MEV, formam aglomerados de nanopartículas, evidenciando a incorporação das nanopartículas de Fe_3O_4 no PANI. As nanopartículas de $Fe_3O_4/PANI$ da Figura 33 (b) foram sintetizadas sob radiação UV com comprimento de onda de 365 nm, a uma temperatura de 330 K e um tempo de síntese de $t = 60$ minutos.

Figura 33. (a) Micrografia de uma nanopartícula Fe_3O_4 (b) aglomerados de nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.

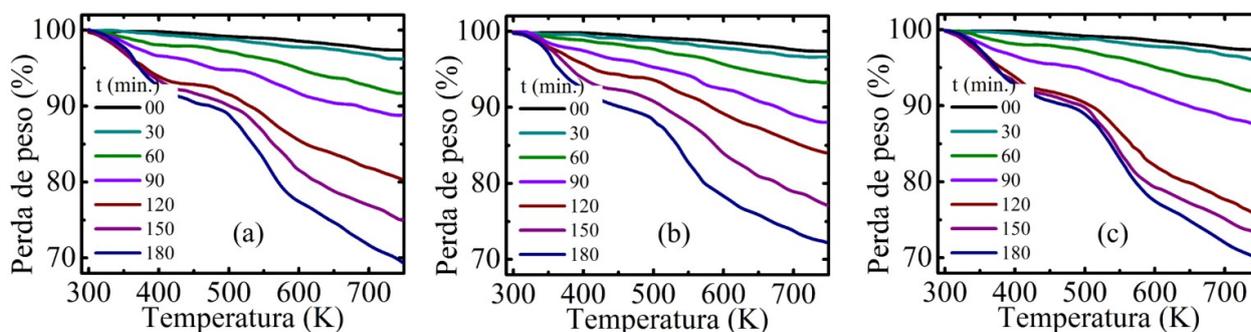


Fonte: elaborada pela própria autora.

Para compreender as transições das nanoestruturas sob radiação UV e estimar a quantidade de polímero em uma amostra, realizamos análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) utilizando o equipamento TGA e DSC modelo LabSys Evo da SETARAM. Os termogramas foram obtidos em atmosfera de ar, com uma faixa de temperatura variando de 300 K a 770 K e uma taxa de aquecimento de 10 K/min. Essa faixa de temperatura foi suficiente para determinar o ponto de início da degradação do PANI.

As Figuras 34 (a), (b) e (c) apresentam os termogramas das nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sintetizadas sob radiação UV, nas temperaturas de 310 K, 330 K e 350 K, respectivamente. O tempo de síntese variou de $t = 0$ min a $t = 180$ min, com intervalos de 30 minutos. Todos os termogramas exibem um comportamento semelhante em relação à perda de peso.

Figura 34. Termogramas para amostras de nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.

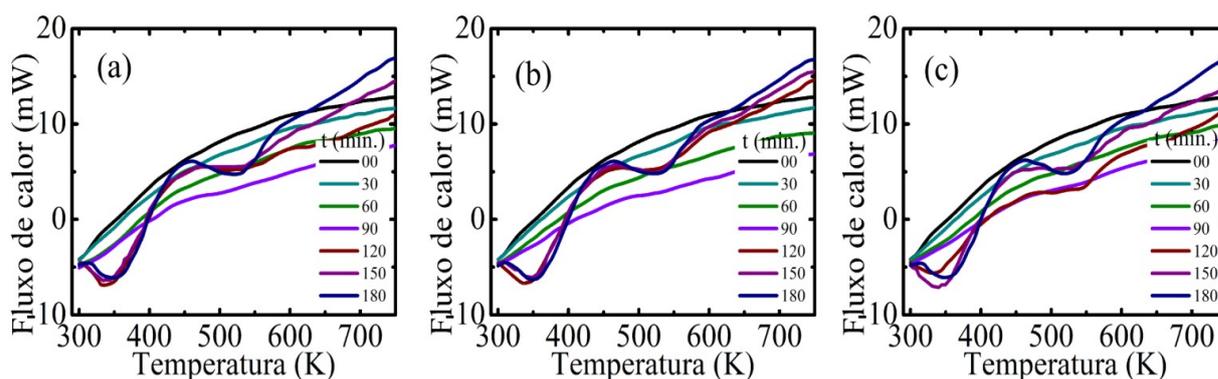


Fonte: elaborada pela própria autora.

A perda de massa inicial, ocorrendo entre 323 K e 373 K, está associada à evaporação da água residual no material (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004). A segunda perda de massa, observada entre 373 K e 573 K, é atribuída à perda de compostos voláteis ligados principalmente à cadeia de PANI (Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004). Já a perda de peso que ocorre entre 573 K e 770 K está relacionada à degradação do PANI (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004). Além disso, as quantidades de polímero que cobrem o material magnético aumentam com o tempo de síntese.

As Figuras 35 (a), (b) e (c) apresentam os resultados da calorimetria exploratória diferencial (DSC) das nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sintetizadas sob radiação UV, a diferentes temperaturas de 310 K, 330 K e 350 K, respectivamente. O tempo de síntese das amostras variou de $t = 0$ min a $t = 180$ minutos, com intervalos de 30 minutos entre as medições. Cada figura ilustra o comportamento térmico das nanoestruturas em função do tempo de síntese e da temperatura aplicada, permitindo uma análise detalhada das transições térmicas que ocorreram durante o processo de preparação. Essa análise é crucial para compreender o impacto das condições de síntese nas propriedades térmicas e na estabilidade das nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.

Figura 35. Calorimetria para amostras de nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.



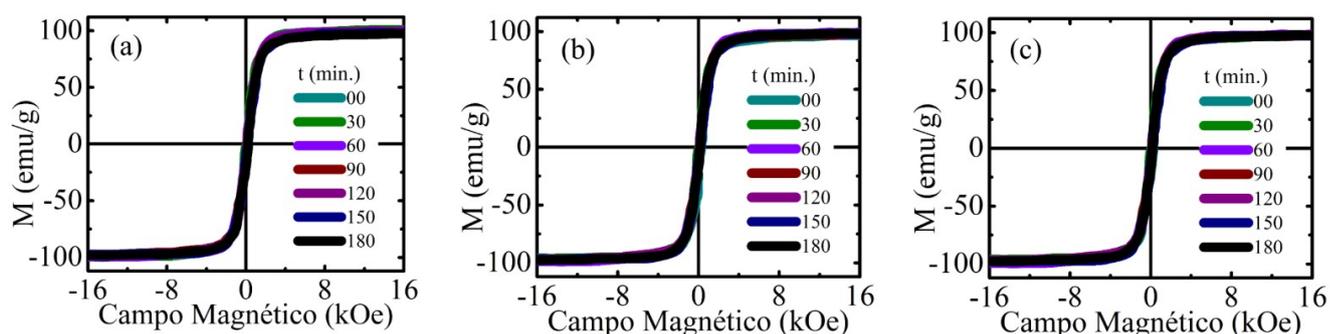
Fonte: elaborada pela própria autora.

As nanoestruturas com tempo de síntese inferior a $t = 90$ min não exibem transformações endotérmicas. No entanto, os resultados indicam a presença de dois picos endotérmicos no intervalo de tempo entre 90 e 180 minutos. O primeiro pico endotérmico é atribuído à perda de água fisicamente adsorvida na superfície dos materiais (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004). Ao comparar as

faixas de temperatura com os resultados da análise TGA para as mesmas amostras, observa-se que o segundo pico está relacionado à degradação da polianilina (Bednarczyk *et al.*, 2021; Ha *et al.*, 2007; Virji *et al.*, 2004).

Realizamos medições magnéticas utilizando um modelo MAV MicroSense EV7, adaptado para melhorar sua sensibilidade de detecção magnética, que é da ordem de 10^{-8} emu. Apresentamos os resultados dos loops de histerese, obtidos em temperatura ambiente, para as nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sintetizadas sob radiação UV, a diferentes temperaturas de 310 K, 330 K e 350 K, com tempos de síntese variando de $t = 0$ min a $t = 180$ minutos, em intervalos de 30 minutos. As Figuras 36 (a), (b) e (c) mostram os resultados dos loops de histerese para as temperaturas de 310 K, 330 K e 350 K, respectivamente, os quais apresentam alta qualidade (Araújo *et al.*, 2010; França *et al.*, 2017).

Figura 36. Loops de histerese para amostras de nanoestruturas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Destacamos aqui a alta estabilidade das propriedades magnéticas das nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sintetizadas a diferentes temperaturas, evidenciando sua qualidade superior. A combinação de estabilidade, propriedades magnéticas e condutivas das nanoestruturas abre novas possibilidades para seu uso em dispositivos eletrônicos avançados, sensores e outras tecnologias emergentes que exigem materiais de alto desempenho.

5.4.5 Interações Químico-Quânticas-Magnéticas

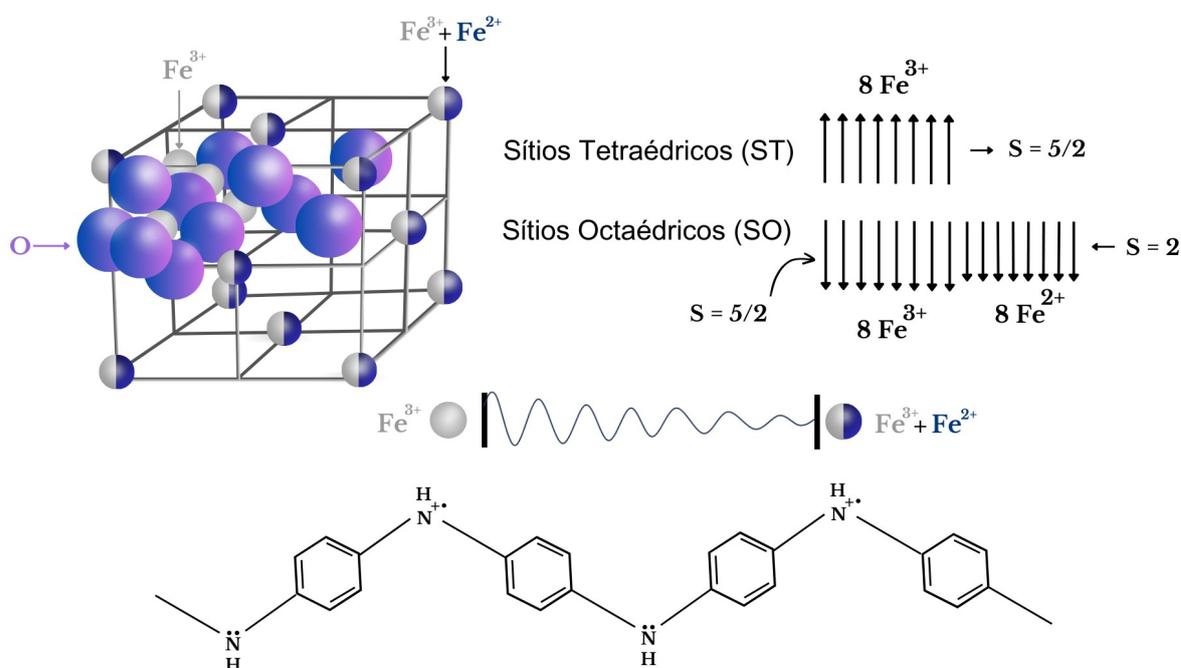
As interações quânticas, químicas e magnéticas em nanoestruturas representam um campo de estudo fundamental, nos quais fenômenos de química, física quântica e magnetismo se manifestam na escala nanométrica. No caso das

nanoestruturas de magnetita (Fe_3O_4) sintetizadas com radiação UV, essas interações geram propriedades exclusivas que não são observadas em materiais em escala macroscópica.

Para a produção das amostras utilizadas neste estudo, foram empregadas nanopartículas comerciais de óxido de ferro da Sigma Aldrich e luz ultravioleta (UV) de uma lâmpada Cole-Parmer 97620-42, que emite radiação UV com comprimento de onda de 365 nm. Utilizando o MAV, as medições realizadas foram principalmente de curvas isotérmicas de magnetização remanente (IRM(H)) e desmagnetização por corrente contínua (DCD(H)) (Holanda, 2021; Holanda *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023).

Na Figura 37, apresentamos um esquema ilustrativo do comportamento oscilatório resultante da interação químico-quântica-magnética entre os dois íons de ferro com diferentes valências e números de spins. A magnetita possui uma estrutura cristalina do tipo espinélio inverso, onde os sítios tetraédricos (em cinza) são ocupados por íons Fe^{3+} , enquanto os sítios octaédricos (em cinza/azul) são ocupados tanto por íons Fe^{3+} ($S = 5/2$) quanto por íons Fe^{2+} ($S = 2$).

Figura 37. Comportamento oscilatório da magnetita.



Fonte: elaborada pela própria autora.

O sistema opera como um oscilador harmônico amortecido, um dos modelos mais amplamente estudados na física. No caso em questão, ele segue a seguinte equação:

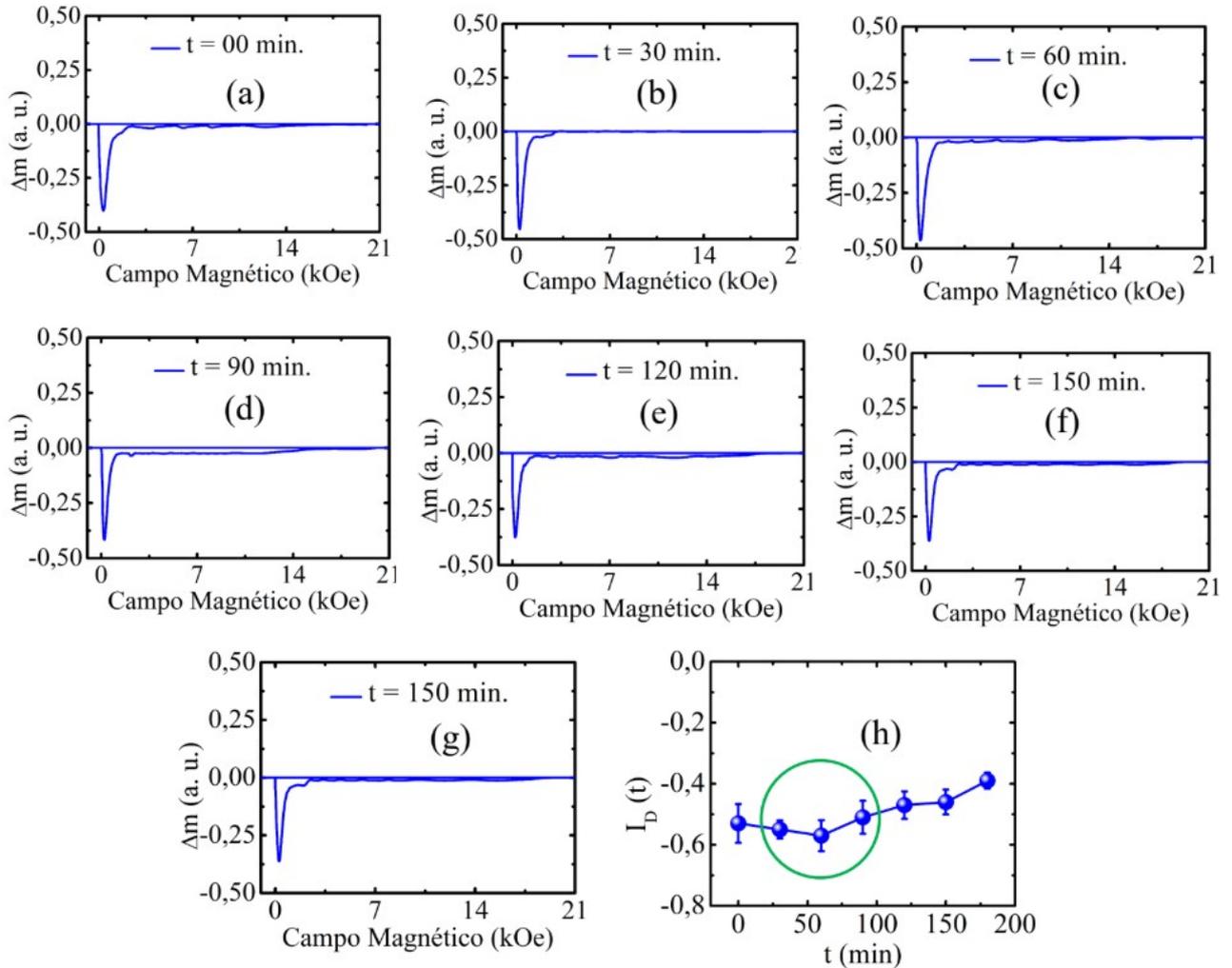
$$\frac{d^2 \Delta m(H)}{dH^2} + \frac{1}{H_D} \frac{d \Delta m(H)}{dH} + \frac{1}{H_M^2} [\Delta m(H) - \Delta m(H=0)] = 0 \quad (7)$$

Os campos H_D e H_M são os campos desmagnetizante e magnetizante, respectivamente (Holanda, 2021; Holanda *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023). Os campos desmagnetizante e magnetizante estão associados à dissipação e ao ganho de energia magnética, respectivamente, e ambos são decorrentes da interação químico-quântica-magnética.

A interação de dupla valência, que resulta na alteração do número de spins dos íons, é responsável pela interação químico-quântica, a qual pode aumentar o magnetismo local da nanoestrutura. Esse comportamento está na base da nossa observação de uma nova forma de interação, que denominamos interação químico-quântica-magnética. A interação entre os íons favorece a geração de oscilações no fluxo magnético. O comportamento dessas interações é influenciado pelo processo de fabricação das nanoestruturas (Holanda, 2021; Holanda *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023).

Na Figura 38, mostramos as curvas $\Delta m(H)$ para um conjunto de nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ sintetizadas a 310 K, seguindo a metodologia descrita na seção experimental. O tempo t , presente na Figura 38, representa o período de exposição das nanoestruturas à radiação UV antes das medições de $\Delta m(H)$, com os seguintes tempos: (a) $t = 0$ min, (b) $t = 30$ min, (c) $t = 60$ min, (d) $t = 90$ min, (e) $t = 120$ min, (f) $t = 150$ min, e (g) $t = 180$ min. Os resultados apresentados nas Figuras 38 (a)-(g) indicam que, para esta temperatura de síntese, apenas estados com interações predominantemente desmagnetizantes estão presentes, o que implica a ausência de ganho líquido de energia magnética. Dessa forma, não se observam oscilações devido à mudança de valência, ou seja, à interação químico-quântica-magnética. Na Figura 38 (h), mostramos as intensidades das interações em função do tempo de síntese t para o estado predominantemente desmagnetizante de interações químico-quânticas-magnéticas.

Figura 38. Medições de curvas $\Delta m(H)$ realizadas em nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$

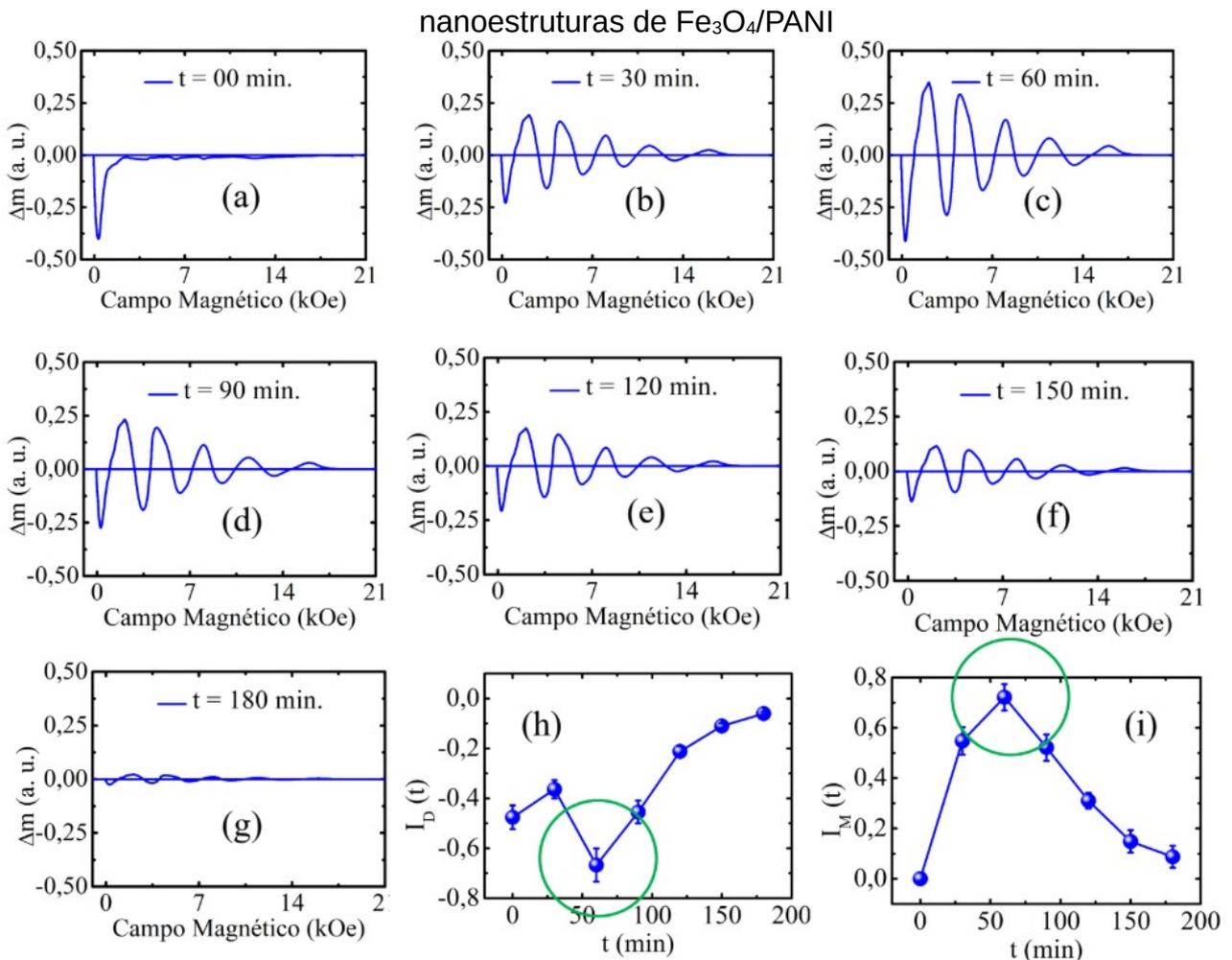


Fonte: elaborada pela própria autora.

Esta abordagem está alinhada com a Equação (7), pois, caso o terceiro termo desta equação não exista, ele simplesmente indica que as interações químico-quântico-magnéticas são proporcionais à variação do campo magnético, em conformidade com os modelos de Stoner-Wohlfarth (Stoner *et al.*; Wohlfarth *et al.*, 1958), Henkel (Henkel, 1964), e J. Holanda (Holanda, 2021; Holanda *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023), além de corroborar os resultados apresentados na Figura 38 (h) para as intensidades das interações em função do tempo de síntese t . Os valores das intensidades das interações, mostrados na Figura 38 (h), foram obtidos considerando os dados das Figuras 38 (a)-(g) e os modelos das referências citadas. Além disso, para $t = 60$ minutos, encontramos a intensidade máxima das interações químico-quântico-magnéticas no estado predominantemente desmagnetizante.

O segundo grupo de amostras foi sintetizado a uma temperatura de 330 K, variando também o tempo t de exposição à radiação UV, conforme mostrado na Figura 39. Sob essas condições, observamos grandes oscilações nas interações químico-quântica-magnéticas, com a amplitude máxima ocorrendo para $t = 60$ minutos. Esse efeito de oscilação resulta de contribuições tanto de dissipação quanto de ganho de energia magnética, estando em concordância com a Equação (7). Além disso, verificamos que a amplitude das oscilações é sensível ao tempo de síntese t , ou seja, ao tempo de exposição à radiação UV, como ilustrado nas Figuras 39 (a)-(g). As Figuras 39 (h) e (i) confirmam que as condições ideais para alcançar as oscilações máximas são para um tempo de exposição de $t = 60$ minutos. Nessas figuras, também são apresentadas separadamente as intensidades das interações nos estados predominantemente desmagnetizantes e magnetizantes, respectivamente.

Figura 39. Medições de curvas $\Delta m(H)$ com grandes oscilações realizadas em



Fonte: elaborada pela própria autora.

Um comportamento notável desse processo de oscilação é sua evolução em direção à estabilidade, conforme mostrado na Figura 39 (g), que destaca o equilíbrio energético entre dissipação e ganho de energia magnética. O tempo t representa o tempo de exposição das nanoestruturas à radiação UV antes das medições de $\Delta m(H)$. As medições de $\Delta m(H)$ são mostradas para os seguintes tempos de exposição: (a) $t = 0$ min, (b) $t = 30$ min, (c) $t = 60$ min, (d) $t = 90$ min, (e) $t = 120$ min, (f) $t = 150$ min, (g) $t = 180$ min, e as intensidades de interações em função do tempo de síntese t são apresentadas em (h) e (i).

Para termos uma comparação direta dos resultados apresentados na Figura 40 e na equação (7), resolvemos analiticamente a equação (3) considerando particularmente a solução subcrítica, que é a solução que melhor descreve nossas oscilações observadas, ou seja,

$$\Delta m(H) = \Delta m(H=0) + \Delta \tilde{m}(H) e^{-H/H_D} \cos\left[\left(\frac{H}{H_{eff}} + \phi_{DM}\right)\right] \quad (8)$$

com

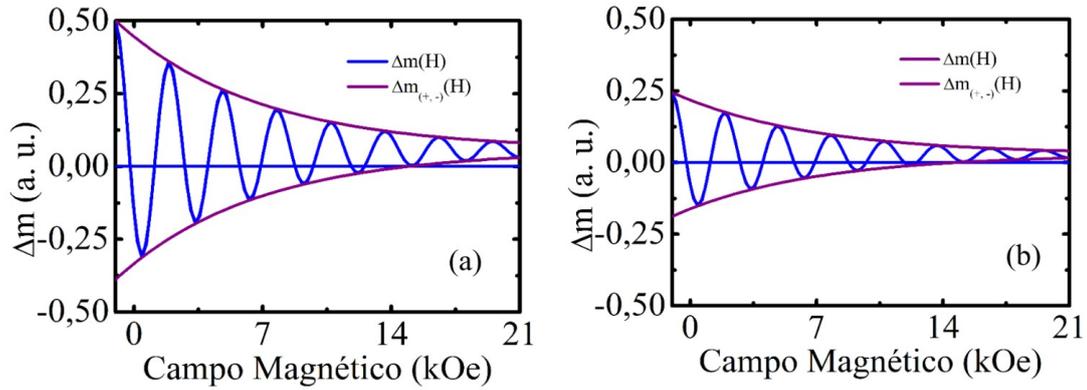
$$\frac{1}{H_{eff}^2} = \frac{1}{H_M^2} - \frac{1}{H_D^2} \quad (9)$$

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos a partir das equações (8) e (9), utilizando os parâmetros listados na Tabela 1 para os tempos de exposição de $t = 60$ e 120 minutos. Os termos $\Delta m(+)(H) = \Delta m(H, \Delta \tilde{m}(H) > 0)$ e $\Delta m(-)(H) = \Delta m(H, \Delta \tilde{m}(H) < 0)$ representam as amplitudes do estado subcrítico das oscilações, ilustradas pelas linhas azuis na Figura 40. Essas oscilações, em um contexto mais amplo, abrem novas possibilidades para a pesquisa em nanoestruturas compostas por materiais ferromagnéticos e poliméricos, devido à sua semelhança com os fenômenos observados em nano-osciladores spintrônicos, sistemas caóticos, circuitos eletrônicos não lineares e até mesmo ondas gravitacionais (Freire *et al.*, 2013; Kuhn *et al.*, 1984).

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos com as equações (4) e (5), utilizando os parâmetros da Tabela 2 para os tempos de $t = 60$ min. (a) e $t = 120$ min. (b). Nesses gráficos, os termos $\Delta m(+)(H) = \Delta m(H, \Delta \tilde{m}(H) > 0)$ e $\Delta m(-)(H) = \Delta m(H, \Delta \tilde{m}(H) < 0)$ ainda definem as amplitudes do estado subcrítico das oscilações,

que são representadas pelas linhas azuis, reforçando a relevância dos parâmetros temporais na evolução das interações magnéticas.

Figura 40. Resultados obtidos com as equações (4) e (5) utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 2.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas equações (8) e (9) para obtenção dos resultados apresentados na Figura 30 para $t = 60$ e 120 min.

t (min.)	Δm ($H = 0$) (a.u.)	$\Delta \tilde{m}$ (H) (a.u.)	H_D (Oe)	H_M (Oe)	Φ_{DM} ($^\circ$)
60	0.056	± 0.39	7.7	0.008	-56.5
120	0.028	± 0.19	7.7	0.008	-56.5

Fonte: elaborada pela própria autora.

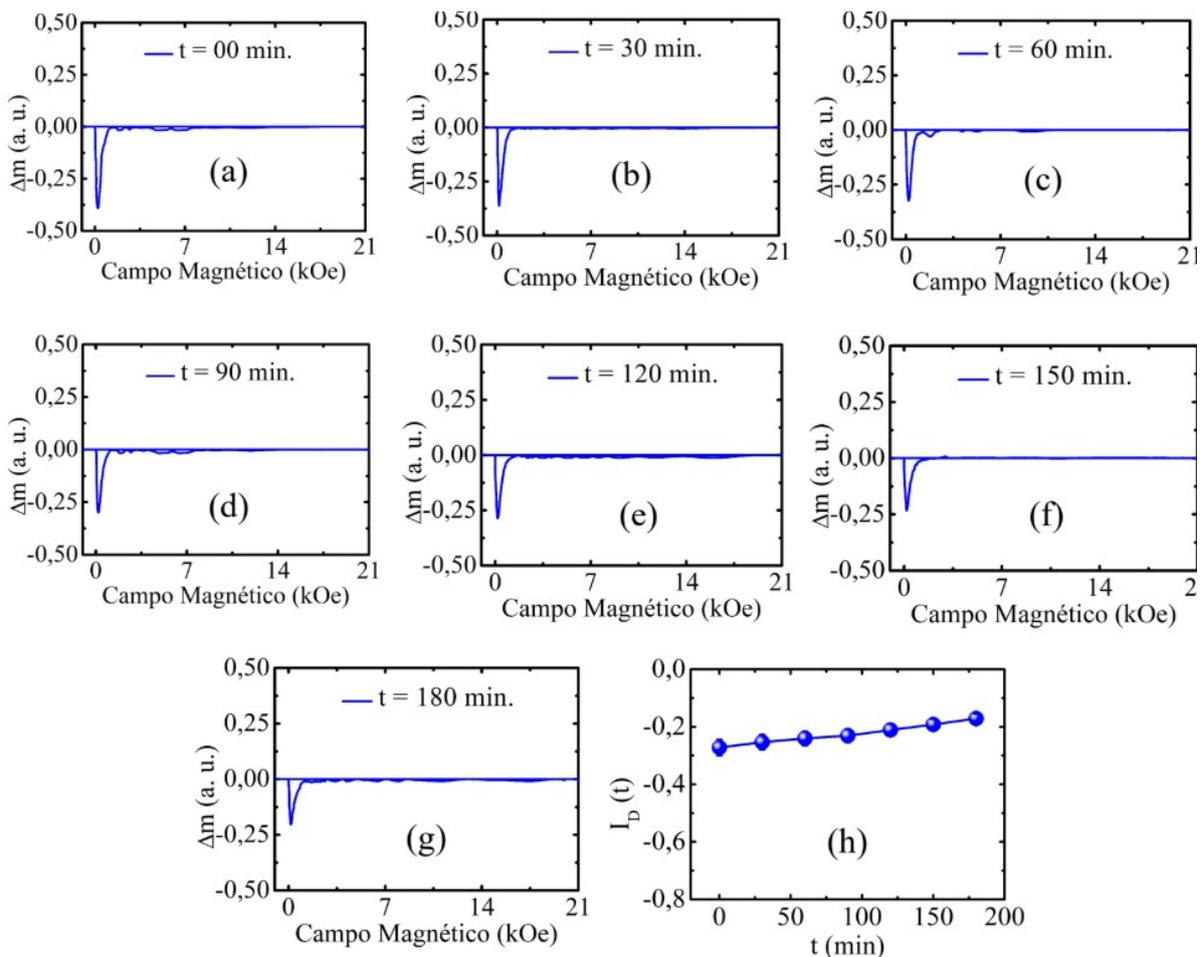
Na Figura 41, apresentamos as medições das curvas $\Delta m(H)$ para um novo conjunto de amostras sintetizadas a uma temperatura de 350 K. O tempo t indica o período de exposição das nanoestruturas à radiação UV antes das medições de $\Delta m(H)$. Os diferentes tempos de exposição são representados como segue: (a) $t = 0$ min, (b) $t = 30$ min, (c) $t = 60$ min, (d) $t = 90$ min, (e) $t = 120$ min, (f) $t = 150$ min, (g) $t = 180$ min. A Figura 41 (h) mostra as intensidades de interação em função do tempo de síntese t , para o estado predominante de interações químico-quânticas-magnéticas.

Observamos o mesmo comportamento observado na Figura 38 para este conjunto de amostras, o que indica que a temperatura de síntese contribui para ativar oscilações amortecidas nas interações químico-quânticas-magnéticas. Esse

efeito possui uma faixa estreita de ativação, semelhante às oscilações observadas em nano-osciladores spintrônicos, produzidas pelo efeito anti-amortecimento (D-C *et al.*, 2023). Sob a perspectiva da termodinâmica química quântica, as oscilações representam flutuações proporcionais à temperatura de síntese e são sensíveis ao comportamento magnético dos íons nas nanoestruturas (Callen, 1985).

Além disso, as Figuras 41 (a)-(g) mostram que, para esta temperatura de síntese, apenas o estado predominantemente desmagnetizante está bem definido. Isso é evidenciado na Figura 41 (h), que apresenta um comportamento linear puro para $\Delta m(H)$ em função de t , algo que não é tão evidente na Figura 38 (h). Esse comportamento sugere que a faixa de temperatura para a interação químico-quântica-magnética oscilante é inferior a 350 K.

Figura 41. Medições de curvas $\Delta m(H)$ realizadas no último grupo de nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$



Fonte: elaborada pela própria autora.

Tanto o processo de síntese quanto a exposição à radiação UV desempenham um papel crucial na ativação das oscilações, fazendo com que os íons de diferentes valências oscilem. Como as curvas DCD(H) e IRM(H) seguem ciclos termodinâmicos com variação do campo magnético, o comportamento oscilatório se mostra sensível a esse campo, permitindo a modulação de sua amplitude. Dessa forma, os resultados apresentados nesta seção revelam a existência de uma nova interação fundamental, que denominamos de interação químico-quântica-magnética.

5.6 EFEITOS MAGNÉTICOS-QUÂNTICOS EM PARTÍCULAS DE $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-X}$ (X = Ni, Fe, Co)

Materiais dopados com íons de terras raras e metais de transição têm mostrado grande potencial, pois a dopagem pode modificar significativamente suas propriedades, conferindo-lhes características ópticas e magnéticas desejáveis (Park *et al.*, 2012; Pathak *et al.*; Unithrattil *et al.*, 2014). Um material de destaque com propriedades excepcionais é a matriz hospedeira ABC_3O_7 , que cristaliza no sistema tetragonal com o grupo espacial P421m, onde A representa Ca, Sr ou Ba; B representa La ou Gd; e C representa Al ou Ga. Especificamente, o monocristal CaYAl_3O_7 (CYAM), pertencente à família da melilita não centrosimétrica, tem atraído considerável interesse devido às suas diversas vantagens, como boa estabilidade físico-química, disponibilidade de matérias-primas e condições diretas de síntese.

Além disso, CYAM exhibe notáveis propriedades de luminescência quando dopado ou co-dopado com íons de terras raras (Bispo *et al.*, 2018; Igashira *et al.*, 2020) e demonstra propriedades piezoelétricas sob altas temperaturas (Li *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019). Essas características são essenciais para várias aplicações fotônicas, como sensores de temperatura, LEDs de luz branca e dispositivos eletrônicos, incluindo atuadores, dispositivos ultrassônicos e transformadores elétricos (Bispo *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2012; Unithrattil *et al.*, 2014). As propriedades luminescentes do CYAM são tipicamente estudadas usando amostras de pó não dopadas (Bispo *et al.*, 2017).

Análises morfológicas frequentemente revelam partículas com formas regulares. Espectros de emissão e excitação de fotoluminescência (PL), obtidos

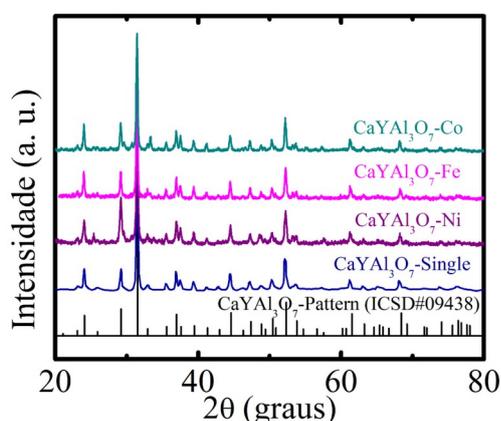
usando radiação síncrotron nas regiões espectrais ultravioleta e ultravioleta de vácuo, indicam que a energia da banda proibida do CYAM é de aproximadamente 6,8 eV ou menor (Holanda *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019). Uma banda de emissão de baixa intensidade, localizada em torno de 4,4 eV, observada quando excitada a 6,5 eV, é atribuída a excítons autoaprisionados gerados durante a excitação ultravioleta de vácuo. Três bandas principais de emissão foram identificadas, com picos em 2,57, 2,94 e 3,23 eV, responsáveis pela maior parte da emissão de PL e radioluminescência (RL) no CYAM (Bispo *et al.*, 2018).

Até o momento, fósforos de óxido de cálcio e ítrio e alumínio dopados com íons de terras raras foram extensivamente estudados para obter emissões vermelhas e azuis em cores completas (Hong-Ling *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2014). Além disso, pesquisas sobre a luminescência de excítons em monocristais (SCs) e filmes monocristais (SCFs) de YAlO_3 demonstraram que a radiação resultante da aniquilação de excítons em SCFs ocorre principalmente em locais regulares dentro da rede de perovskita, resultando em luminescência com um pico em $\lambda_{\text{máx}} = 295 \text{ nm}$ (Cai *et al.*, 2011; Zorenko *et al.*, 2005).

Em sistemas de aluminato baseados em ítrio (Y), bandas de emissão foram identificadas em uma faixa de energia de 2,53 a 3,49 eV (Popov *et al.*, 2010; Zorenko *et al.*, 2013). As emissões de excítons geralmente envolvem duas ou mais bandas, e seu posicionamento é influenciado por diversos fatores, como a lacuna de banda do óxido, a distribuição de cátions em diferentes locais de rede, o método de síntese utilizado e a temperatura de medição (Gorbunov *et al.*, 1987; Zorenko *et al.*, 2004). Embora o CYAM seja uma estrutura frequentemente estudada devido às suas características únicas, não foram encontrados relatos sobre as propriedades magnéticas dessas partículas dopadas com metais de transição. Neste estudo, observamos pela primeira vez características magnéticas em partículas de aluminato de cálcio de ítrio com a composição CaYAl_3O_7 , dopadas com cobalto (Co), ferro (Fe) e níquel (Ni). Esses dopantes foram escolhidos devido às suas propriedades magnéticas intrínsecas, que podem influenciar o comportamento geral do material. A introdução desses metais de transição no alumínio permite explorar suas interações magnéticas e avaliar o potencial do material para aplicações específicas.

Para a preparação de nossas amostras, optamos pelo método Pechini (Bispo *et al.*, 2017), devido à sua capacidade de produzir partículas com tamanhos e composições controlados, utilizando uma fração de dopagem de 10% de metal de transição. Na Figura 42 (a), apresentamos as medidas típicas de difração de raios X das nossas amostras. Realizamos uma análise detalhada da estrutura das amostras para comparar as composições puras de CaYAl_3O_7 com as dopadas com Ni, Fe e Co, em relação ao padrão ICSD #09438 (Igashira *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2012; Pathak *et al.*, 2014). Essa análise revelou que os íons Ca/Y foram substituídos por íons de metais de transição (Ni, Fe e Co), como mostrado na Figura 42.

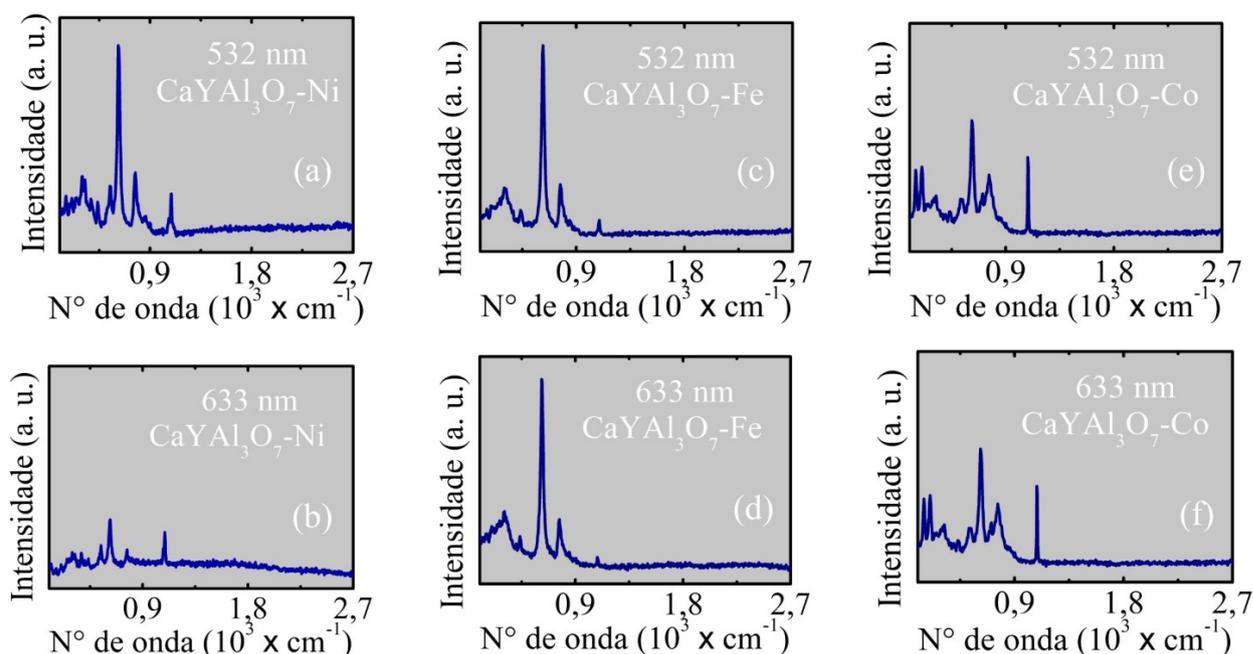
Figura 42. Medições de difração de raios X de amostras de CaYAl_3O_7 puras e dopadas com Ni, Fe e Co, comparadas com o padrão ICSD#09438.



Fonte: elaborada pela própria autora.

As propriedades estruturais de um material podem influenciar suas propriedades ópticas. Para investigar essa relação, realizamos medições utilizando Microscopia Raman Confocal, previamente apresentada. Nas nossas medições, utilizamos duas linhas de laser com comprimentos de onda de 532 nm e 633 nm. As partículas foram depositadas sobre uma lâmina de microscópio para análise. Na Figura 43, apresentamos as medições realizadas nas nossas amostras, que incluem três tipos de partículas: CaYAl_3O_7 -Ni, CaYAl_3O_7 -Fe e CaYAl_3O_7 -Co, considerando ambos os comprimentos de onda do laser. Cada espectro Raman foi obtido a partir dos pontos marcados com um 'X' nos mapas de microscopia mostrados na Figura 43. Especificamente para as duas linhas de laser, foram realizadas as seguintes medições: CaYAl_3O_7 -Ni, (a) 532 nm e (b) 633 nm; CaYAl_3O_7 -Fe, (c) 532 nm e (d) 633 nm; CaYAl_3O_7 -Co, (e) 532 nm e (f) 633 nm.

Figura 43. Medidas de microscopia confocal Raman das amostras de $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-X}$ (X = Ni, Fe e Co).



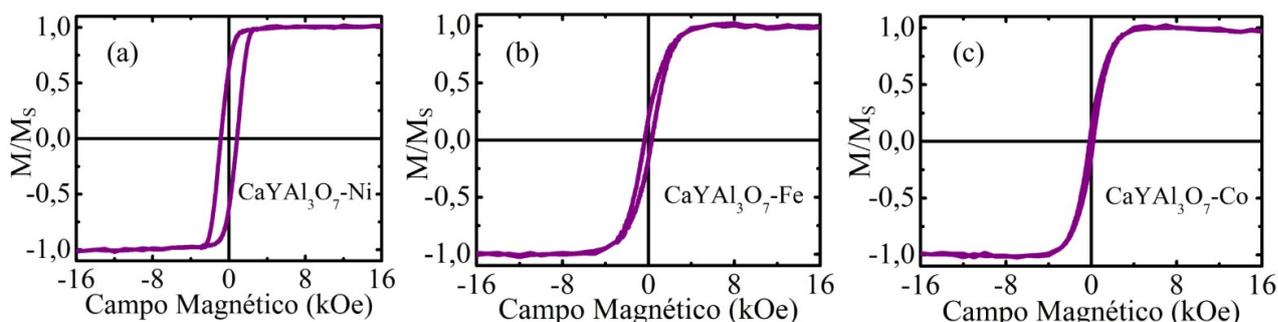
Fonte: elaborada pela própria autora.

Para todas as amostras de CaYAl_3O_7 dopadas com metais de transição, os picos observados correspondem às energias características do CaYAl_3O_7 , acompanhadas pelas energias ressonantes dos metais de transição. Os sinais Raman observados para o CaYAl_3O_7 são consistentes com aqueles descritos na literatura (Igashira *et al.*, 2020; Jadhav *et al.*; Singh *et al.*; Zhang *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2012; Pathak *et al.*, 2014). O material CaYAl_3O_7 apresenta excelentes características ópticas, como evidenciado pelos espectros mostrados na Figura 43. Notavelmente, quando dopado com metais de transição que substituem os íons Ca/Y, ele preserva suas propriedades ópticas (Igashira *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2012; Pathak *et al.*, 2014).

Encontramos evidências claras de efeitos magnéticos por meio de medições da curva de histerese, conforme mostrado na Figura 44. Nossas observações indicam que os materiais dopados apresentaram maior coercividade e remanência, seguindo a ordem: $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Co}$, $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Fe}$ e $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Ni}$, como ilustrado nas Figuras 44 (a), (b) e (c). O posicionamento bem-sucedido dos íons de metais de transição dentro das estruturas cristalinas dos materiais dopados fortaleceu as interações de spin dos íons magnéticos, tornando essas interações observáveis por meio de medições macroscópicas, como as curvas de histerese. Para as medições

magnéticas, utilizamos a técnica de Magnetometria de Amostra Vibrante, previamente apresentada.

Figura 44. Medições da curva de histerese para os três materiais: (a) $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Ni}$, (b) $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Fe}$ e (c) $\text{CaYAl}_3\text{O}_7\text{-Co}$.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Concluimos que, após a dopagem com esses metais de transição, o CaYAl_3O_7 adquiriu propriedades magnéticas notáveis, as quais foram demonstradas por meio de medições de curvas de histerese. O efeito observado decorre das interações entre os spins dos íons de metais de transição, que possuem natureza puramente quântica. Isso é significativo, pois conseguimos detectar esse efeito por meio de medições magnéticas macroscópicas. Os materiais dopados analisados neste estudo mostram grande potencial para aplicações em sistemas microeletromecânicos biológicos.

5.6 OSCILAÇÕES EM INTERFACES FERRO(PARA)MAGNÉTICAS E ANTIFERROMAGNÉTICAS NÃO COLINEARES

O estudo das oscilações em interfaces ferro(para)magnéticas e antiferromagnéticas não colineares é de grande importância para o desenvolvimento de novos dispositivos, especialmente no contexto da spintrônica e da próxima geração de tecnologias de memória e armazenamento de dados. Essas oscilações são fenômenos dinâmicos que envolvem a interação entre os spins dos elétrons nas interfaces de materiais magnéticos, podendo ser influenciadas por fatores como o campo magnético aplicado, a corrente elétrica e as características dos materiais envolvidos. Os materiais antiferromagnéticos apresentam propriedades de spin Hall superiores às dos materiais não magnéticos convencionais. Os efeitos de spin Hall

promovem o acoplamento entre as correntes de carga e a dinâmica de spin em sistemas magnéticos. Nesse contexto, o mecanismo de quebra de simetria pode caracterizar as diferentes fases da matéria.

Em materiais antiferromagnéticos (AFMs), o vetor Néel desempenha um papel fundamental, quebrando a simetria rotacional do estado paramagnético. Os chamados "eixos fáceis", que correspondem às direções particulares dos spins no cristal, são determinados pelos parâmetros de ordem, como o vetor Néel e o acoplamento spin-órbita. Essas direções se associam à menor energia de anisotropia magnetocristalina (MAE). Certos materiais antiferromagnéticos, como o Mn_2Au , são bons exemplos de ímãs Heisenberg isotrópicos, apresentando níveis de MAE no plano em torno de $10 \mu\text{eV}$ por unidade de fórmula (Kohn *et al.*, 2013). Já o IrMn_3 destaca-se como um importante AFM não colinear, com um MAE gigante de 10 meV por unidade de fórmula (Tomeno *et al.*, 1999). Além disso, o IrMn_3 possui um ângulo de spin Hall significativo de 0,35, conforme relatado em estudos (Dyakonov *et al.*, 1971; Kimata *et al.*, 2019; Sakuma *et al.*, 2003).

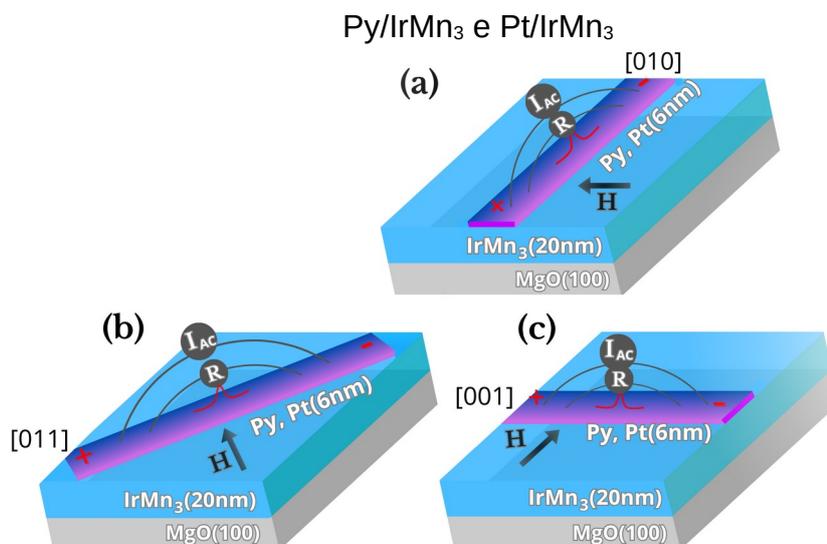
A superfície de filmes finos de antiferromagnetos como o IrMn_3 apresenta características únicas. O ferromagnetismo de spins locais não compensados pode induzir simetria do antiferromagneto em materiais adjacentes (Arpaci *et al.*, 2021). A intensidade da interação entre o IrMn_3 e o material adjacente depende das excitações na superfície. Esses fatores influenciam tanto o comportamento do efeito Hall de spin não magnético (NMSHE) (Hirsch, 1999; Hoffmann, 2013) quanto o efeito Hall de spin magnético (MSHE) (Holanda *et al.*, 2020; Kimata *et al.*, 2019; Kohn *et al.*, 2013). O efeito Hall de spin convencional, ou NMSHE, caracteriza-se por correntes de spin transversais que fluem em condutores não magnéticos, gerando um acúmulo de spin próximo às superfícies da amostra. Esse fenômeno oferece diversas possibilidades para a exploração de efeitos relacionados ao spin Hall (Hirsch, 1999; Hoffmann, 2013). Materiais não magnéticos também têm sido amplamente estudados devido ao fato de a polarização de spin induzida por corrente, por meio da interação spin-órbita, representar uma aplicação potencial em tecnologias de torque de transferência de spin (Liu *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2018).

Por outro lado, o efeito MSHE é compreendido a partir das simetrias intrínsecas das funções de resposta linear, que são cuidadosamente definidas e analisadas. Esse fenômeno surge como uma contraparte reativa da resposta de spin

associada a processos dissipativos. A ordem magnética nas interfaces, sejam elas antiferromagnéticas/ferromagnéticas não colineares ou antiferromagnéticas/paramagnéticas não colineares, está diretamente relacionada à simetria estrutural e eletrônica do material, bem como à orientação dos spins envolvidos. Essa relação destaca a importância das propriedades intrínsecas do material na determinação e manipulação do efeito MSHE, com implicações significativas em dispositivos de spintrônica.

As oscilações nas bicamadas de Py/IrMn₃ são intensas e bem definidas, enquanto nas bicamadas de Pt/IrMn₃ são significativamente amortecidas. A Figura 47 apresenta um esquema das três configurações cristalográficas utilizadas nas medições de magnetorresistência (MR), definida como $MR = [(R(H) - R(H=0))/R(H=0)] \times 100\%$, em função do campo magnético H. A direção cristalográfica é destacada, pois desempenha um papel essencial na manipulação da intensidade do efeito observado. Na Figura 45, é ilustrado o esquema experimental empregado para medir a magnetorresistência considerando as principais direções cristalográficas das bicamadas de Py/IrMn₃ e Pt/IrMn₃: (a) [010], (b) [011] e (c) [001]. Os contatos de fios de ouro foram aplicados nas amostras utilizando a técnica de *wire bonder*, com posicionamento alinhado às direções cristalográficas. A distância entre os fios externos é de 8 mm, entre os internos é de 4 mm, e entre os fios internos e externos é de 2 mm.

Figura 45. Esquema experimental utilizado para medir a magnetorresistência no



Fonte: elaborada pela própria autora.

Todos os filmes de IrMn_3 foram crescidos epitaxialmente em um sistema de pulverização catódica magnetron, operando sob uma pressão base de aproximadamente 1×10^{-7} torr, com argônio a 3-mtorr e temperatura de 840 K sobre substratos de MgO (100). As camadas de Py e Pt foram depositadas a uma temperatura de 470 K.

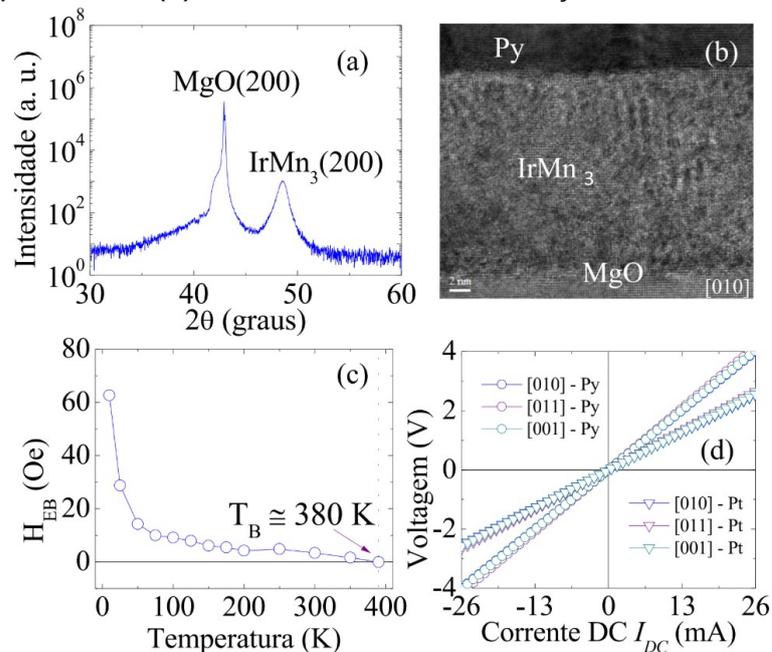
A Figura 46 (a) apresenta a difração de raios X em uma amostra de $\text{MgO}/\text{IrMn}_3(20 \text{ nm})/\text{Ti}(2 \text{ nm})$, realizado em Difrátômetro Philips com radiação $\text{CuK}\text{-}\alpha$ ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$). Considerando o pico (200), obtivemos o parâmetro $a = 0,377 \text{ nm}$, (Arpaci *et al.*, 2021; Holanda *et al.*, 2020; Kimata *et al.*, 2019; Kohn *et al.*, 2013). Realizamos a caracterização estrutural das amostras utilizando um Microscópio Eletrônico de Transmissão de 200 kV modelo JEOL 8100 (França *et al.*, 2017). Preparamos as amostras para medições de TEM usando um Microscópio Eletrônico de Varredura / Feixe de Íons Focados modelo Zeiss NVision 40 com seção transversal. Na Figura 46 (b), é apresentada uma micrografia eletrônica de transmissão que evidencia as diferentes camadas da amostra $\text{MgO}/\text{IrMn}_3/\text{Py}$. Observa-se que a interface das camadas está bem definida, como reportado em outros estudos (Arpaci *et al.*, 2021; Holanda *et al.*, 2020; Kimata *et al.*, 2019; Kohn *et al.*, 2013). Além disso, nota-se que o IrMn_3 cristalizado acopla-se de forma eficiente ao permalói.

Realizamos a caracterização magnética utilizando um Dispositivo Supercondutor de Interferência Quantum da Quantum Designer, onde definimos o campo de polarização de troca como $H_{\text{EX}} = - (H_1 + H_2)/2$, onde H_1 e H_2 são as coercividades dos loops de histerese. A Figura 46 (c) mostra que a temperatura de bloqueio está acima de 300 K, onde o viés de troca se estabilizou à temperatura ambiente, como em outros trabalhos com a bicamada IrMn_3/Py (Holanda *et al.*, 2020; Kohn *et al.*, 2013). O efeito de viés de troca é um fenômeno que surge devido à presença de spins não compensados na interface entre bicamadas antiferromagnéticas e ferromagnéticas (Arpaci *et al.*, 2021; Holanda *et al.*, 2020; Kohn *et al.*, 2013). Em grande parte da superfície do filme, os spins antiferromagnéticos não compensados são alinhados na direção da anisotropia unidirecional, sendo estabilizados por domínios antiferromagnéticos (Kohn *et al.*, 2013; Tomeno *et al.*, 1999). Na maior parte da superfície do filme, spins

antiferromagnéticos não compensados são fixados na direção da anisotropia unidirecional por domínios antiferromagnéticos.

A Figura 46 (c) representa uma diminuição no campo de polarização de troca com o aumento da temperatura. Na temperatura de 380 K, o efeito exchange polar deixa de existir, definindo a temperatura de bloqueio (T_B) para a bicamada IrMn₃/Py. O acoplamento dos átomos de Ni (Holanda *et al.*, 2015) aos átomos de Mn (Kohn *et al.*, 2013; Szunyogh *et al.*, 2009) na interface define a direção preferida pelo domínio antiferromagnético no filme IrMn₃ à medida que a amostra é resfriada (Kimata *et al.*, 2019; Kohn *et al.*, 2013). O comportamento descrito justifica o aumento repentino no campo de polarização de troca para temperaturas abaixo de 100 K (Kimata *et al.*, 2019; Kohn *et al.*, 2013; Kong *et al.*, 2016). Adicionalmente, a Figura 46 (d) demonstra que os contatos de fios de ouro, confeccionados utilizando a técnica de *wire bonder*, apresentam comportamento ôhmico em todas as amostras analisadas. Esse comportamento assegura uma transferência eficiente de corrente elétrica, essencial para a confiabilidade das medições realizadas.

Figura 46. (a) DRX em uma amostra de MgO/IrMn₃(20 nm)/Ti(2 nm), (b) MET da amostra MgO/IrMn₃/Py, (c) mudança do campo de polarização cambial em função da temperatura e (d) curvas de tensão em função da corrente elétrica.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Uma abordagem eficiente para investigar a interface antiferromagnética é por meio da detecção elétrica do estado magnético da superfície em materiais

antiferromagnéticos (AFMs) (Chikina *et al.*, 2014; Nakagawa *et al.*, 2023; Roos *et al.*, 2022). A distribuição espacial dos spins superficiais em antiferromagnetos não colineares desempenha um papel crucial, já que essa configuração difere significativamente daquela observada em antiferromagnetos colineares (Jungwirth *et al.*, 2016; MacDonald *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2018).

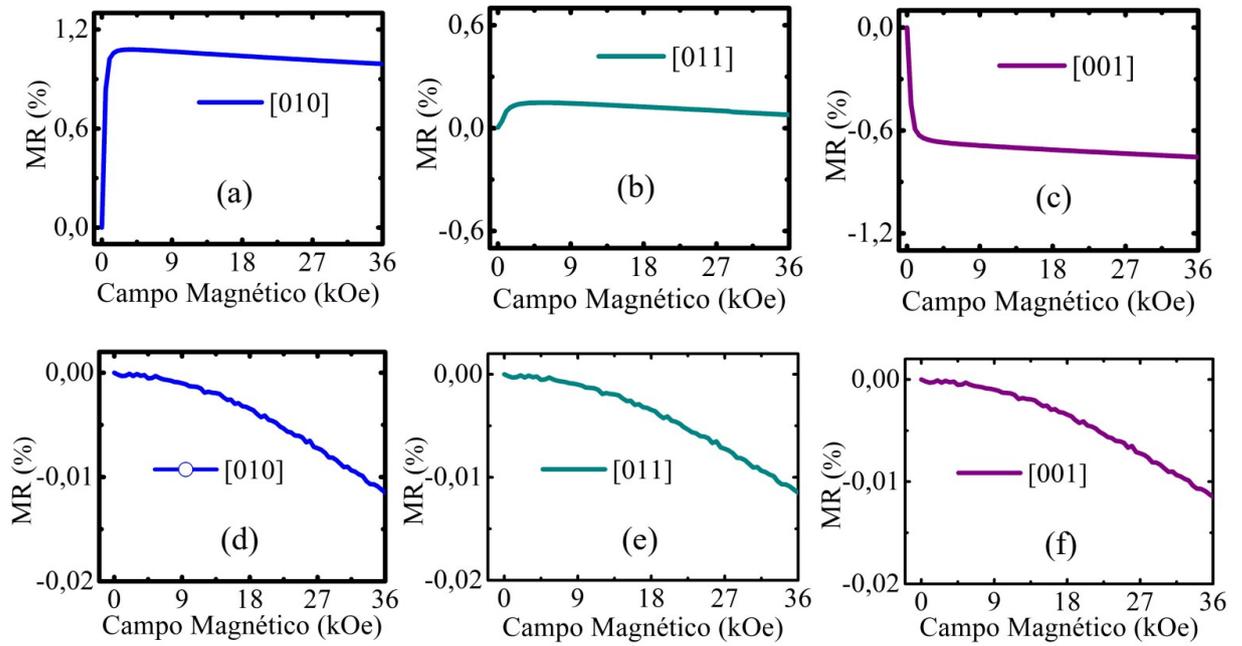
Outro aspecto relevante é a diferença na dinâmica ferromagnética (ou paramagnética) e antiferromagnética, quando induzida por correntes polarizadas por spin. Conforme estudos anteriores, o valor da corrente crítica necessária para alcançar a estabilidade em estado estacionário em antiferromagnetos é geralmente maior do que em ferromagnéticos ou paramagnéticos (Arpaci *et al.*, 2021; Chikina *et al.*, 2014; Holanda *et al.*, 2020; Kohn *et al.*, 2013). A variação da magnetorresistência em função do campo magnético, analisada para diferentes direções cristalográficas, evidencia um acoplamento sólido e estável nas interfaces de IrMn₃/Py. Observa-se também uma alteração uniforme na magnetorresistência ao longo de toda a faixa do campo magnético aplicado. Todas as medições foram realizadas à temperatura ambiente, utilizando um Sistema de Medição de Propriedade Física da Quantum Designer.

Conforme ilustrado na Figura 47, são apresentados os resultados da variação da magnetorresistência para as três principais direções cristalográficas. Para a amostra de IrMn₃/Py, foram analisadas as direções: (a) [010], (b) [011] e (c) [001]. Já para a amostra de IrMn₃/Pt, as medições foram realizadas nas direções: (d) [010], (e) [011] e (f) [001]. Durante os experimentos, foi aplicada uma corrente pulsada de 2 mA de amplitude e largura de pulso de 1 μ s, com formato quadrado.

A Figura 48 ilustra as oscilações geradas por uma corrente pulsada de 20 mA, com largura de pulso quadrada de 1 μ s. Como discutido anteriormente, o efeito de magnetorresistência também pode ocorrer em antiferromagnetos, particularmente devido aos spins não compensados na superfície do material. Dessa forma, uma corrente elétrica age como um mecanismo capaz de induzir variações na magnetorresistência do material quando submetido a um campo magnético. Nas Figuras 48 (a), (b) e (c), as oscilações são claramente observadas. É possível notar que os sinais oscilantes diminuem, mesmo com a contínua injeção de correntes de spin em direção à interface. Para campos magnéticos pequenos, o efeito está relacionado à instabilidade dos spins na superfície. À medida que o campo

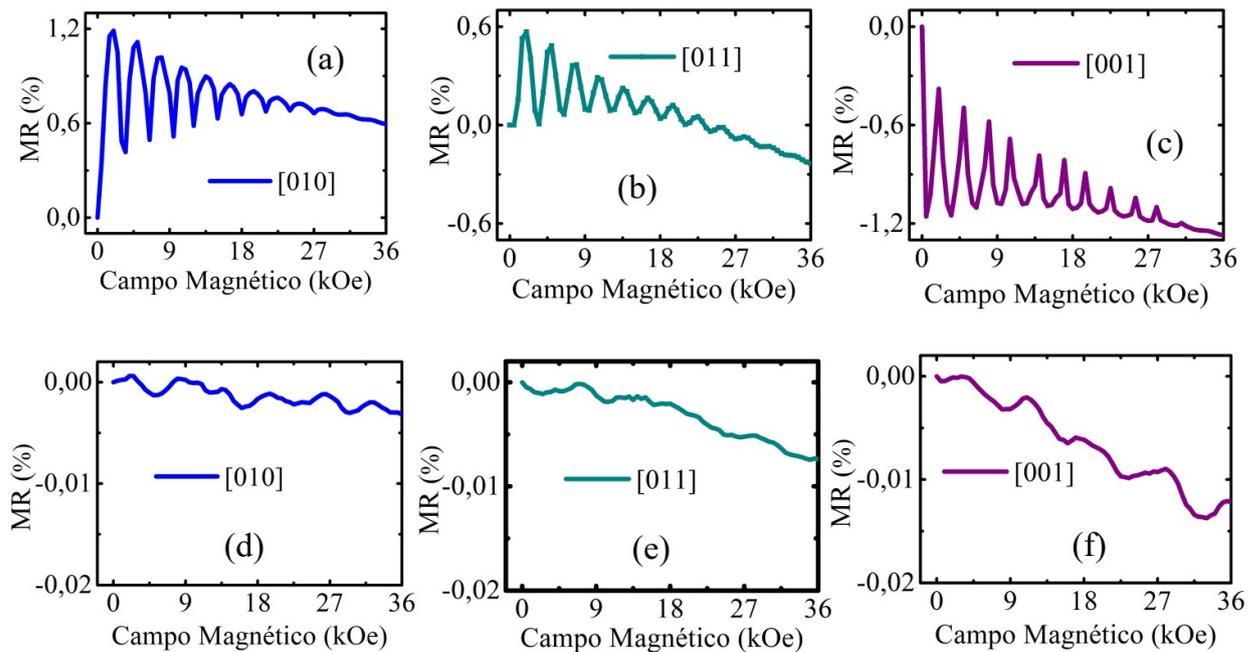
magnético aumenta, mais spins se alinham, resultando na evolução das oscilações, que passam a apresentar períodos e fases bem definidos.

Figura 47. Variação da magnetorresistência em função do campo magnético em três direções cristalográficas nas amostras de IrMn₃/Py e IrMn₃/Pt.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Figura 48. Oscilações na variação da magnetorresistência em função do campo magnético em três direções cristalográficas nas amostras de IrMn₃/Py e IrMn₃/Pt.



Fonte: elaborada pela própria autora.

Para o caso de Pt como material adjacente ao IrMn₃, o efeito responsável pelas oscilações observadas na magnetorresistência (MR) na interface é o NMSHE. As oscilações são mais amortecidas devido ao grande ângulo de rotação Hall de ambos os materiais. A platina apresenta um ângulo de spin Hall de 5% e um comprimento de difusão de cerca de 5 nm, enquanto o IrMn₃ possui um ângulo de spin Hall de 35% e um comprimento de difusão de aproximadamente 3 nm (Arpaci *et al.*, 2021; Holanda *et al.*, 2020; Kimata *et al.*, 2019). Dessa forma, o acúmulo de spin na interface é bastante pronunciado em ambos os materiais, mas não há um material com polarização bem definida, como ocorre no caso do permalóio.

As Figuras 48 (d), (e) e (f) revelam que as oscilações em uma amostra do tipo (100)MgO/IrMn₃(20nm)/Pt(6nm) exibem características de acoplamento intenso entre os materiais, independentemente da direção cristalográfica. Essas oscilações possuem um efeito significativo, pois o fluxo de spin pode ser controlado com base na corrente pulsada e na intensidade do campo magnético, representando uma nova abordagem para a codificação de informações.

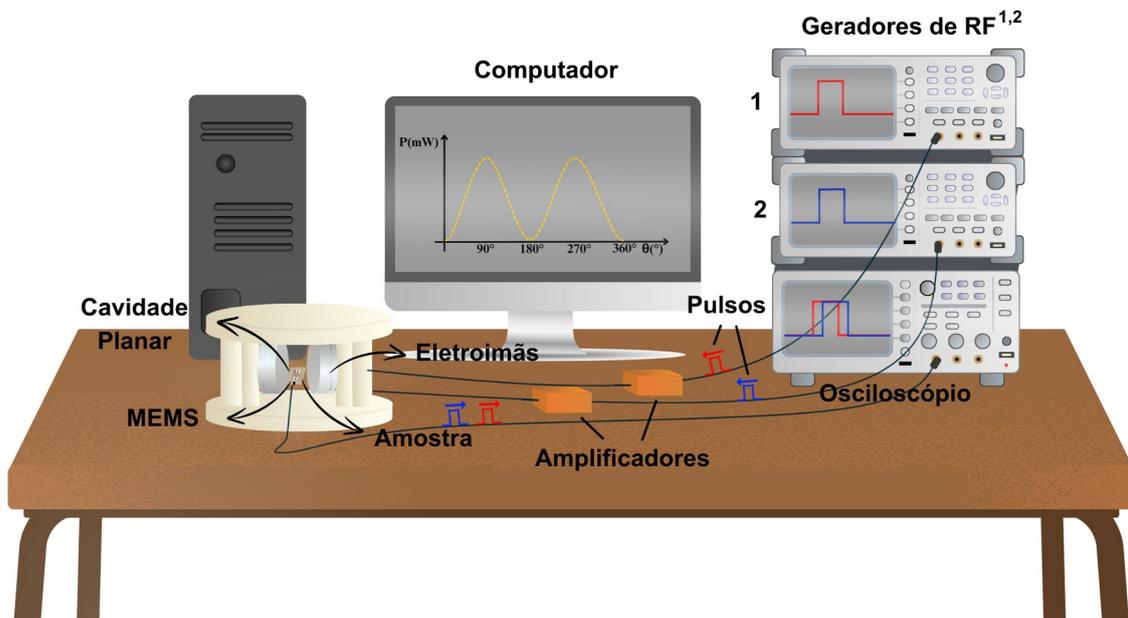
Em resumo, as oscilações são observadas e controladas principalmente em bicamadas de material paramagnético sob um ferromagnético ou ferrimagnético. Os principais efeitos responsáveis pelas oscilações na magnetorresistência são o NMSHE e o MSHE. Os sinais oscilantes variam de acordo com a direção cristalográfica do material, o ferromagnetismo do material adjacente ao IrMn₃ e a amplitude da corrente pulsada. A compreensão física dessas oscilações está relacionada ao acúmulo de spin na interface.

5.7 ANALISADOR DE SISTEMAS MICROELETROME CÂNICOS

Como resultado de nosso trabalho, desenvolvemos uma técnica inovadora para a análise de sistemas microeletromecânicos (MEMS) com e sem materiais magnéticos (Figura 49). Essa técnica tem como principal objetivo avaliar o desempenho desses sistemas quando submetidos a diferentes estímulos — mecânicos, elétricos e magnéticos. A metodologia é baseada no uso de dois geradores de radiofrequência, responsáveis por emitir pulsos de ondas que atravessam o sistema sob análise. Esse sistema é composto por amplificadores e

uma cavidade planar onde é posicionada a amostra a ser investigada. Os sinais transmitidos pela amostra são captados por um osciloscópio de alta precisão, permitindo um monitoramento detalhado do comportamento do sistema.

Figura 49. Analisador de sistemas microeletromecânicos



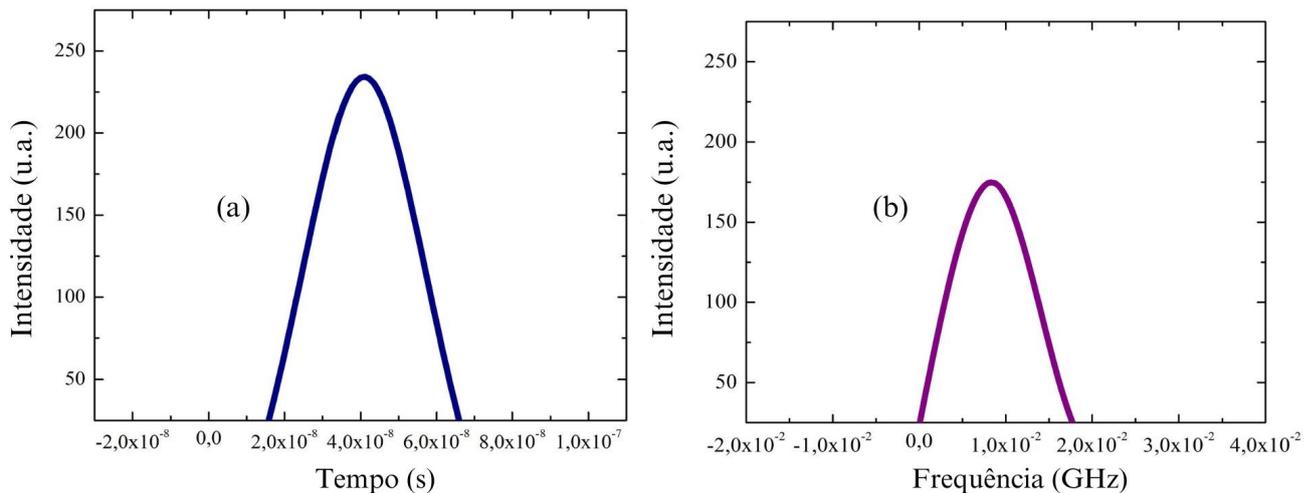
Fonte: elaborada pela própria autora.

Adicionalmente, um campo magnético controlado é aplicado utilizando um eletroímã, com o intuito de explorar a influência desse fator externo sobre as propriedades da amostra. Todos os dados coletados ao longo do experimento são processados e analisados por meio de ferramentas computacionais, possibilitando uma avaliação abrangente da eficiência na transmissão de sinais nos MEMS. Essa abordagem não apenas oferece informações sobre o desempenho desses sistemas, mas também contribui para o avanço de suas potenciais aplicações em micro e nanodispositivos, abrangendo áreas como sensores, atuadores e circuitos avançados.

Na Figura 50, é apresentado um exemplo de sinal transmitido por uma amostra de NiO/Pt. Os resultados obtidos evidenciam qualitativamente a eficiência da técnica, destacando sua viabilidade para a análise de sinais transmitidos em materiais magnéticos e não magnéticos aplicados a sistemas microeletromecânicos (MEMS). No entanto, é importante ressaltar a necessidade de ampliar os estudos, incluindo um maior número de amostras e diferentes configurações experimentais, a

fim de consolidar a técnica e compreender melhor suas aplicações. Essa ampliação permitirá explorar plenamente o grande potencial da metodologia na análise e desenvolvimento de sistemas MEMS, além de possibilitar a identificação de novas propriedades físicas e funcionais em diferentes materiais.

Figura 50. (a) Pulso transmitido através de uma amostra de NiO/Pt e (b) a transformada de Fourier correspondente ao pulso transmitido.



Fonte: elaborada pela própria autora.

De forma geral, a técnica desenvolvida representa um avanço significativo para a análise de sistemas MEMS, sobretudo no estudo de materiais magnéticos e não magnéticos. Ao integrar estímulos mecânicos, elétricos e magnéticos, a metodologia apresentada oferece uma abordagem promissora para a avaliação qualitativa do comportamento desses sistemas. Além disso, a possibilidade de expandir sua aplicação a novos materiais reforça seu impacto no campo da micro e nanoengenharia, abrindo caminho para o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes. Assim, este trabalho não apenas impulsiona o avanço científico na área de MEMS, mas também estabelece uma base sólida para a exploração de novas fronteiras tecnológicas e futuras pesquisas.

6 CONCLUSÃO

O estudo das interações magneto-ópticas desempenha um papel central no avanço das áreas de spintrônica e optoeletrônica, que emergem como promissoras frentes tecnológicas para o desenvolvimento de dispositivos de alta eficiência e funcionalidades inovadoras. Essas interações, envolvendo a relação entre campos magnéticos e luz, possibilitam o controle preciso de propriedades eletrônicas e magnéticas em materiais, promovendo a manipulação de dados de forma mais rápida e com menor consumo de energia — qualidades cruciais para memórias e processadores de última geração.

Nesta dissertação, explorei detalhadamente os fenômenos das interações magneto-ópticas, apresentando análises e experimentos que evidenciam sua aplicabilidade em tecnologias emergentes. Meus resultados destacaram a dependência angular dessas interações e o papel do campo magnético no processo de magnetização, demonstrando que os estados magnéticos globais impactam diretamente a excitação de ondas de spin, seja por métodos convencionais ou pela interação luz-matéria. Essa abordagem reforça a importância dessas interações para o desenvolvimento de dispositivos avançados voltados à computação quântica e à engenharia.

Além disso, introduzi uma metodologia inovadora para a síntese de nanoestruturas de $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ utilizando radiação ultravioleta, com controle rigoroso da temperatura de síntese. Essa técnica resultou em amostras com alta estabilidade e propriedades magnéticas e condutivas excepcionais, consolidando seu potencial para a produção de filmes finos e aplicações em baterias. Durante este processo, identifiquei uma nova interação, que denominei de interação químico-quântico-magnética, atribuída às variações de valência adquiridas por nanoestruturas em condições específicas.

Também investiguei as propriedades magnéticas do CaYAl_3O_7 dopado com metais de transição (Co, Fe, Ni), que apresentaram características magnéticas marcantes, confirmadas por curvas de histerese. Além disso, analisei interfaces ferromagnéticas e antiferromagnéticas não colineares, que geram oscilações na

magnetorresistência. Essa análise permitiu apresentar uma nova abordagem para codificação de informações, baseada no controle do fluxo de spin.

Por fim, desenvolvi uma técnica inovadora para análise de sistemas microeletromecânicos, com grande potencial para avaliar materiais destinados a aplicações tecnológicas em pequena escala. Esse avanço foi reconhecido em uma reportagem que destacou o feito que realizei (<https://ufrpe.br/br/content/aluna-de-mestrado-desenvolve-nova-t%C3%A9cnica-para-sistemas-micro-eleto-mec%C3%A2nicos>), trazendo ainda mais visibilidade ao trabalho. Os resultados do meu trabalho resultaram na publicação de cinco artigos em revistas científicas de destaque, como *Next Materials*, *Applied Optics*, *The European Physical Journal B*, *Journal of Material Science and Technology Research* e *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. Além disso, três artigos estão atualmente submetidos (Hildever *et al.*, 2023; Hildever *et al.*, 2024; Thiago *et al.*, 2024). Participei de diversos eventos científicos nacionais e internacionais, sendo reconhecida em um deles como “O Melhor Trabalho Apresentado” na 2ª Escola de Optoeletrônica e Spintrônica. Essas conquistas reforçam a relevância e o impacto das minhas contribuições para as áreas de optoeletrônica e spintrônica, estabelecendo bases sólidas para avanços futuros na comunidade científica.

REFERÊNCIAS

- ALEX, M., GUDERMAN, C., PETER, D. Magneto optical measurement of interactions in thin-film media. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, p. 3111-3113, Ago. 1992. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/179729>. Acesso em: 16 mar. 2025.
- AHARONI, A. Angular dependence of nucleation by curling in a prolate spheroid. **Journal Applied Physics**, v. 82, Ago. 1997. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/82/3/1281/3443/Angular-dependence-of-nucleation-by-curling-in-a?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- AHARONI, A., SHTRIKMAN, S. Magnetization curve of the infinite cylinder. **Physical Review**, v. 109, Mar. 1958. Disponível em: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.109.1522>. Acesso em: 15 mar. 2025.
- AJAYAN, P., TOUR, J. Nanotube composites. **Nature**, v. 447, p. 1066–1068 jun. 2007. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/4471066a>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- ALGAMILI, A., KHIR, M., DENNIS, J., AHMED, A., ALABSI, S., BAHASHWAN, S., JUNAID, M. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. **Nanoscale Research Letters**, v. 16, Jan. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s11671-021-03481-7>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- ANDREWS, R., WEISENBERGER, M. Carbon nanotube polymer composites. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, v. 8, Jan. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359028603000925>. Acesso em: 13 mar. 2025.
- APHESTEGUY, J., JACOBO, S. Synthesis of a soluble polyaniline–ferrite composite. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 7062-7068 Mai. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-1423-7>. Acesso em: 17 mar. 2025.

APPENZELLER, J., KNOCH, J., BJORK, M., RIEL, H., SCHMID, H., RIESS, W. Toward Nanowire Electronics. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 55, Nov. 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4668569>. Acesso em: 14 mar. 2025.

ARAÚJO, A., OLIVEIRA, R., JÚNIOR, S., RODRIGUES, A., MACHADO, F., CABRAL F., AZEVEDO, W. Synthesis, characterization and magnetic properties of polyaniline-magnetite nanocomposites. **Synthetic Metals**, v. 160, p. 685-690, Abr. 2010.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379677910000135>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ARPACI, S., DOMINGUEZ, V., SHI, J., TEJERINA, L., GARESCI, F., WANG, C., YAN, X., SANGWAN, V., GRAYSON, M., HERSAM, M., FINOCCHIO, G. Observation of current-induced switching in non-collinear antiferromagnetic IrMn₃ by differential voltage measurements. **Nature Communications**, v. 12, n. 3828, Jun. 2021.

Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24237-y>. Acesso em: 20 mar. 2025.

BEDNARCZYK, K., MATYSIAK, W., TANSKI, T., JANEKZEK, H., SCHAB-BALCERZAK, E., LIBERA, M. Effect of polyaniline content and protonating dopants on electroconductive composites. **Scientific Reports**, v. 11, n. 7487, Abri. 2021.

Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-86950-4>. Acesso em 18 mar. 2025.

BISPO, G., ANDRADE, A., BEZERRA, C., TEIXEIRA, V., GALANTE, D., VALERIO, M. Luminescence in undoped CaYAl₃O₇ produced via the Pechini method. **Physica B: Condensed Matter**, v. 507, p. 119-130, Fev. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452616305701?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

BISPO, G., NOVAIS, S., TEIXEIRA, V., MACEDO, Z., VALERIO, M. Luminescence characterization and the energy level scheme for lanthanide doped CaYAl₃O₇, **Journal of Luminescence**, v. 203, p. 486-491, Nov. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002223131830190X?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

BOYCE, B., GRAZIER, J., BUCHHEIT, T., SHAW, M. L. Strength Distributions in Polycrystalline Silicon MEMS. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 16, Abri. 2007. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4147574>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BRAN, C., FERNANDEZ-ROLDAN, J., PALMERO, E., BERGANZA, E., GUZMAN, J. DEL REAL, R., ASENJO, A., FRAILE RODRÍGUES, A., FOERSTER, M., ABALLE, L., CHUBYKALO-FESENKO, O., VAZQUEZ, M. Direct observation of transverse and vortex metastable magnetic domains in cylindrical nanowires. **Physical Review B**, v. 96, Set. 2017. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.96.125415>. Acesso em: 16 mar. 2025.

BRATTAIN, W. Transistorized. **Bell Labs logbook**, v. 24, Dez. 1947. Disponível em: <https://www.pbs.org/transistor/science/labpages/labpg5.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

BUEHLER, C., MAYERGOYZ, I. Henkel plots and the Preisach model of hysteresis. **Journal of Applied Physics**, v. 79, p. 5746-5748, Abr. 1996. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/79/8/5746/495465/Henkel-plots-and-the-Preisach-model-of-hysteresis?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 16 mar. 2025.

CAI, Y., RITTER, M., WEISS, W., BRADSHAW, A. Valence-band structure of epitaxially grown Fe₃O₄(111) films. **Physical Review B**, v. 58, n. 5043, Ago. 1998. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.58.5043>. Acesso em 18 mar. 2025.

CAI, J., PAN, H., WANG, Y. Luminescence properties of red-emitting Ca₂Al₂SiO₇:Eu³⁺ nanoparticles prepared by sol-gel method. **Rare Metals**, v. 30, 374-380, Ago. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12598-011-0399-x>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CALLEN, H. **Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics**. 2. ed. New York Chichester Brisbane Toronto Singapore: John Wiley & Sons, 1985. Disponível em: [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/allen%20H.B%20-%20Thermodynamics%20And%20An%20Introduction%20To%20Thermostatistics-Wiley%20\(1985\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/allen%20H.B%20-%20Thermodynamics%20And%20An%20Introduction%20To%20Thermostatistics-Wiley%20(1985).pdf). Acesso em 19 mar. 2025.

CHIKINA, A., HOPNER, M., SEIRO, S., KUMMER, K., DANZENBACHER, S., PATIL, S., GENERALOV, A., GUTTLER, M., KUCHERENKO, Y., CHULKOV, E., KOROTEEV, Y., KOEPERNIK, K., GEIBEL, C., SHI, M., RADOVIC, M., LAUBSCHAT, C., VYALIKH, D. Strong ferromagnetism at the surface of an antiferromagnet caused by buried magnetic moments. **Nature Communications**, v. 5, Fev. 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms4171>. Acesso em: 21 mar. 2025.

CHUEV, M. Generalized Stoner-Wohlfarth model and the non-langevin magnetism of single-domain particles. **JETP Letters**, v. 85, p. 611-616, Ago. 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0021364007120053>. Acesso em: 15 mar. 2025.

COURTHS, R.: Magneto-optical study of magnetic interactions in HoCrO₃. **Physica B+C**, v. 89, p. 77-79, Abr. 1977. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0378436377900572>. Acesso em: 16 mar. 2025.

CVELBAR, U. Large-scale synthesis of nanowires. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, Abr. 2011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/44/17/174014>. Acesso em: 15 mar. 2025.

D-C, M., SHAO, D., HOU, V., VAILIONIS, A., QUARTERMAN, P., HABIBOGLU, A., VENUTI, M., XUE, F., HUANG, Y., LEE, C., MIURA, M, KIRBY, B., BI, C., LI, X., DENG, Y., LIN, S., TSAI, W., ELEY, S., WANG, W., BORCHERS, J., TSYMBAL, E., WANG, S. Observation of antidamping spin-orbit torques generated by in-plane and out-of-plane spin polarizations in MnPd₃. **Nature Materials**, v. 22, p. 591-598, Abr. 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41563-023-01522-3>. Acesso em 19 mar. 2025.

DONNIO, B., RIVIÈRE, E., TERAZZI, E., VOIRIN, E., ARONICA, C., CHASTANET, G., LUNEAU, D., ROGEZ, G., SHEREURER, F., JOLY, L. KAPPÇER, J., GALLANI, J. Magneto-optical interactions in single-molecule magnets: Low-temperature photon-induced demagnetization. **Solid State Sciences**, v. 12, p. 1307-1313, Ago. 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1293255810002347>. Acesso em: 16 mar. 2025.

DORNFELD, D., MIN, S., TAKEUCHI, Y. Recent Advances in Mechanical Micromachining. **UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability**, v. 2, Fev. 2006. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/8rf718jm>. Acesso em: 13 mar. 2025.

DYAKONOV, M., PEREL, V. Possibility of Orienting Electron Spins with Current. **Sov. JETP Letters**, v. 13, Jun. 1971. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1971JETPL..13..467D/abstract>. Acesso em: 20 mar. 2025.

FARADAY, M. Experimental researches in electricity - Nineteenth series Faraday. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 136, Dez. 1846. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1846.0001>. Acesso em: 15 mar. 2025.

FEYNMAN, R. There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New World of Physics. **Engineering and Science**, v. 23:5, Fev. 1960. Disponível em: <https://calteches.library.caltech.edu/47/>. Acesso em: 01 abr. 2025.

FERRO, T., DIAS, A., CLARA, M., HILDEVER, L., HOLANDA, J. Oscillating Magnetic Effect in BiFeO₃, **Materials Science**, Set. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2409.14533>. Acesso em: 22 mar. 2025.

FRANÇA, C., GUERRA, Y. VALADÃO, D HOLANDA, J., HERNÁNDEZ, E. Transmission electron microscopy as a realistic data source for the micromagnetic simulation of polycrystalline nickel nanowires. **Computational Materials Science**, v. 128, p. 42-44, Fev. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025616305493>. Acesso em: 18 mar. 2025.

FREIRE, J., CABEZA, C., MARTI, A., POSCHEL, T., GALLAS, J. Antiperiodic oscillations. **Scientific Reports**, v. 3, n. 1958, Jun. 2013. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep01958>. Acesso em: 19 mar. 2025.

GAJANAN, K., TIJARE, S. Applications of nanomaterials. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317324513>. Acesso em: 14 mar. 2025.

GATOS, H. Semiconductor electronics and the birth of the modern science of surfaces. **Surface Science**, v. 299–300, Jan. 1994. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0039602894906424>. Acesso em: 13 mar. 2025.

GOETZE, T., GANSAU, C., BUSKE, N., ROEDER, M., GORNET, P., BAHR, M. Biocompatible magnetic core/shell nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 252, p. 399-402, Nov. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885302006248?via%3Dihub>. Acesso em: 17 mar. 2025.

GORBUNOV, S., KRUZHALOV, A., SPRINGIS, M. Optical properties of the F-centre in beryllium oxide. **Physics Status Solidi b**, v. 141, Mai. 1987. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssb.2221410129>. Acesso em: 20 mar. 2025.

GUO, P. The emerging field of RNA nanotechnology. **Nature Nanotechnology**, v. 5, Nov. 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2010.231>. Acesso em: 14 mar. 2025.

HA, J., CHO, J., JANG, J. Fabrication of water-dispersible polyaniline-poly (4-styrenesulfonate) nanoparticles for inkjet-printed chemical-sensor applications. **Advanced Materials**, v. 19, Jun. 2007. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.200602127>. Acesso em: 18 mar. 2025.

HENKEL, O. Remanenzverhalten und wechselwirkungen in hart-magnetischen teilchenkollektiven. **Physica Status Solidi b**, v. 7, 919-929, 1964. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssb.19640070320>. Acesso em: 16 mar. 2025.

HENTHORN, J., CUTSAIL, G., WEYHERMULLER, T., DEBEER, S. Stabilization of intermediate spin states in mixed-valent diiron dichalcogenide complexes. **Nature Chemistry**, v. 14, p. 328-333, Jan. 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41557-021-00853-5>. Acesso em: 18 mar. 2025.

HILDEVER, L., FERRO, T., HOLANDA, J. Observation of Damped Oscillations in Chemical-Quantum-Magnetic Interactions. **Mesoscale and Nanoscale Physics**, Out. 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2310.15775>. Acesso em: 01 abr. 2025.

HILDEVER, L., LAURENTINO, J., ARAÚJO, J., ESTRADA, F., HOLANDA, J. Observing a quantum magnetic effect in CaYAl₃O₇-X particles (X=Ni, Fe, Co). **Materials Science**, Nov. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2411.06143>. Acesso em: 01 abr. 2025.

HIRSCH, J. Spin Hall Effect. **Physical Review Letters**, v. 83, Ago. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1834>. Acesso em: 20 mar. 2025.

HOFFMANN, A. Spin Hall Effects in Metals. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 49, p. 5172–5193, Mai. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6516040>. Acesso em: 20 mar. 2025.

HOFFMANN, A. Spin transport modified by magnetic order. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 563, Dez. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885322007818>. Acesso em: 16 mar. 2025.

HOLANDA, J. Analyzing the magnetic interactions in nanostructures that are candidates for applications in spintronics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54, Mar. 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/abeb40>. Acesso em 16 mar. 2025.

HOLANDA, J., CAMPOS, C., FRANCA, A., PADRÓN-HERNÁNDEZ, E. Effective surface anisotropy in polycrystalline ferromagnetic nanowires. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 617, p. 639-641, Dez. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838814018520>. Acesso em 16 mar. 2025.

HOLANDA, J., MAIOR, D., SANTOS, O., AZEVEDO, A., REZENDE, S. Evidence of phonon pumping by magnonic spin currents. **Applied Physics Letters**, v. 118, ed. 2, Jan. 2021. 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: 15 mar. 2025.

HOLANDA, J., SANGLAM, H., KARAKAS, V., ZHANG, Z., LI, Yi., DIVAN, R., LIU, Y., OZATAY, O., NOVOSAD, V., PEARSON, J., HOFFMANN, A. Magnetic damping modulation in IrMn₃/Ni₈₀Fe₂₀ via the magnetic spin Hall effect. **Physical Review Letters**, v. 124, Fev. 2020. Disponível em:

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.124.087204>. Acesso em: 15 mar. 2025.

HOLANDA, J., SILVA, D., HERNÁNDEZ, E. Angular dependence of the coercivity in arrays of ferromagnetic nanowires. **Journal of Magnetism Magnetic Materials**, v. 378, Mar. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885314011548>. Acesso em: 16 mar. 2025.

HOLANDA, J., SILVA, D., PADRÓN-HERNÁNDEZ, E. Angular dependence of the coercivity in arrays of ferromagnetic nanowires. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 378, Mar. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885314011548>. Acesso em: 15 mar. 2025.

HOLZWARTH, U., GIBSON, N. The Scherrer equation versus the 'DebyeScherrer equation'. **Nature Nanotechnology**, v. 6, Ago. 2011. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/nnano.2011.145>. Acesso em: 18 mar. 2025.

HONG-LING, Y., XUE, Y., XU-HUI, X., TING-MING, J., PENG-HUI, Y., QING, J., DA-CHENG, Z., JIAN-BEI, Q. Characterization and luminescence of Eu/Sm-coactivated CaYAl₃O₇ phosphor synthesized by using a combustion method. **Chinese Physics B**, v. 22, p. 640-643, 2013. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/22/9/098503>. Acesso em: 19 mar. 2025.

HOWE, R., MULLER, R. Resonant-microbridge vapor sensor. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 33, Abri. 1986. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1485736>. Acesso em: 13 mar. 2025.

HUTCHISON, D., MORRILL, N., ATEN, Q., TURNER, B., HOWELL, L. Carbon Nanotubes as a Framework for High-Aspect-Ratio MEMS Fabrication. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 19, Fev. 2010. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5350708>. Acesso em: 13 mar. 2025.

IGASHI, K., NAKAUCHI, D., FUJIMOTO, Y., KATO, T., NAWAGUCHI, N., YANAGIDA, T. Concentration dependence in CaYAl₃O₇ single crystalline scintillators. **Optical Materials**, v. 102, Abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925346720301580?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

JADHAV, S., GARUD, H., PATIL, A., PATIL, G., PATIL, C., DONGALE, T., PATIL, P. Recent advancements in silica nanoparticles based technologies for removal of dyes from water. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 30, Mai. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2215038219300263?via%3Dihub>. Acesso em: 20 mar. 2025.

JIANG, W., PRAMEY, U., ZHANG, W., YU, G., JUNGFLIECH, M., FRADIN, F., PEARSON, J., TSEKOVNYAK, Y., WANG, K., WANG, L., HEINONEN, O., VELTHUIS, S., HOFFMANN, A. Blowing magnetic skyrmion bubbles. **Science**, v. 349, Jun. 2015. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aaa1442>. Acesso em: 16 mar. 2025.

JUDY, J. Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. **Smart Materials and Structures**, v. 10, Nov. 2001. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/10/6/301/meta>. Acesso em: 13 mar. 2025.

JUNGWIRTH, T., MARTI, X., WADLEY, P., WUNDERLICH, J. Antiferromagnetic spintronics. **Nature Nanotechnology**, v. 11, p. 231-241, Mar. 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2016.18>. Acesso em: 21 mar. 2025.

KELLY, P., O'GRAY, K., MAYO, P., CHANTRELL, R. Switching mechanisms in cobalt-phosphorus thin films. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 25, n. 5, p. 3881-3883, Set. 1989. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/42466>. Acesso em: 16 mar. 2025.

KERR, J. On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 3, Jul. 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786447708639245>. Acesso em: 15 mar. 2025.

KHAN, Z., KERMANY, A., ÖCHSNER, A., IACOPI, F. Mechanical and electromechanical properties of graphene and their potential application in MEMS. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 5, Jan. 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/50/5/053003>. Acesso em: 13 mar. 2025.

KHATOKAR, J., VINAY, N., BALE, A., NAYANA, M., HARINI, R., REDDY, V., SOUNDARYA, N., SATHEESHA, T., HUDDAR, A. A study on improved methods in Micro-electromechanical systems technology. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532039060X>. Acesso em: 13 mar. 2025.

KIM, D., ZHANG, Y., VOIT, W., RAO, K., MUHAMMED, M. Synthesis and characterization of surfactant-coated superparamagnetic monodispersed iron oxide nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 225, p. 30-36, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885300012245>. Acesso em: 17 mar. 2025.

KIMATA, M., CHEN, H., KONDOU, K., SUGIMOTO, S., MUDULI, P., IKHLAS, M., YASUMOTO, O., TOMITA, T., MACDONALD, A., NAKATSUJI, S., OTANI, Y. Magnetic and magnetic inverse spin Hall effects in a non-collinear antiferromagnet. **Nature**, v. 565, 627-630, Jan. 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0853-0>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KOHN, A., KOVÁCS, A., FAN, R., MCINTYRE, G., WARD, R., GOFF, J. The antiferromagnetic structures of IrMn₃ and their influence on exchange-bias. **Scientific Reports**, v. 3, Ago. 2013. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep02412>. Acesso em: 20 mar. 2025.

KO, W. Trends and frontiers of MEMS. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 136, Mai. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424707000489>. Acesso em: 13 mar. 2025.

KONG, W., JI, Y., ZHANG, X., WU, H., ZHANG, Q., YUAN, Z., WAN, C., HAN, X., TU, T., FUKADA, K., NAGANUMA, H., TUNG, M. Field-free spin Hall effect driven

magnetization switching in Pd/Co/IrMn exchange coupling system. **Applied Physics Letters**, v. 109, Set. 2016. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/109/13/132402/32303/Field-free-spin-Hall-effect-driven-magnetization?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 21 mar. 2025.

KUHN, J., BOUGHN, S. Gravitational wave excitation of the 160-min solar oscillation?. **Nature**, v. 308, p. 164-165, Mar. 1984. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/308164a0>. Acesso em: 19 mar. 2025.

LANDEROS, P., ALLENDE, S., ESCRIG, J., SALCEDO, E., ALTBIR, D., VOGEL, E. Reversal modes in magnetic nanotubes. **Applied Physical Letters**, v. 90, ed. 10, Mar. 2007. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/90/10/102501/333057/Reversal-modes-in-magnetic-nanotubes?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 16 mar. 2015.

LAVÍN, R., DENARDIN, J., ESCRIG, J., ALTBIR, D. CORTÉS, A., GÓMEZ, H. Angular dependence of magnetic properties in Ni nanowire arrays. **Journal of Applied Physics**, v. 106, ed. 10, Nov. 2009. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/106/10/103903/343419/Angular-dependence-of-magnetic-properties-in-Ni?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 16 mar. 2025.

LIU, L., DIAO, Y., XIA, S., LU, F., TIAN, J. A first principle study on systematic stability and electronic properties of GaN nanowire surface with Cs/Li/NF₃ co-adsorption. **Applied Surface Science**, v. 478, p. 393-397, Jun. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433219303113?via%3Dihub>. Acesso em 15 mar. 2025.

LIU, L., PAI, C., LI, Y., TSENG, H., RALPH, D., BUHRMAN, R. Spin-torque switching with the giant spin Hall effect of tantalum. **Science**, v. 336, 555-558, Mai. 2012. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1218197>. Acesso em: 21 mar. 2025.

LIU, W., HUANG, C., WU, C., CHIU, Y., YEHA, Y., CHEN, T. High efficiency and high color purity blue-emitting NaSrBO₃:Ce³⁺ phosphor for near-UV light-emitting diodes. **Journal of Materials Chemistry**, v. 21, p. 6869-6874, Abr. 2011. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/jm/c1jm10765h>. Acesso em 19 mar. 2025.

LI, Y., JIA, Z., YIN, Y., HU, Q., MU, W., ZHANG, J., YU, X., TAO, X. Optimizing growth, structure, and elastic-electrical properties of acentric melilite CaYAl₃O₇ crystal. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 748, p. 57-62, Jun. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838818309563>. Acesso em 19 mar. 2025.

LV, Z., LIU, L., ZHANGYANG, X., LU, F., TIAN, J. Enhanced absorptive characteristics of GaN nanowires for ultraviolet (UV) photocathode. **Applied Physics A**, v. 126, n. 152, Fev. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-020-3312-3>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MACDONALD, A., TSOI, M. Antiferromagnetic metal spintronics. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 369, Ago. 2011. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2011.0014>. Acesso em: 21 mar. 2025.

MALLEGNI, N., MOLINARI, G., RICCI, C., LAZZERI, A., LA ROSA, D., CRIVELLO, A., MILAZZO, M. Sensing Devices for Detecting and Processing Acoustic Signals in Healthcare. **Biosensors**, v. 12, Out. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6374/12/10/835>. Acesso em: 13 mar. 2025.

MAYO, P., O'GRADY, K., KELLY, P., CAMBRIDGE J., SANDERS, I., YOGI, T., CHANTRELL, R. A magnetic evaluation of interaction and noise characteristics of CoNiCr thin films. **Journal of Applied Physics**, v. 69, p. 4733-4735, Abr. 1991. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/69/8/4733/20213/A-magnetic-evaluation-of-interaction-and-noise?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 16 mar. 2025.

MCKENNA, K., HOFER, F., GILKS, D., LAZAROV, V., CHEN, C., WANG, Z., IKUHARA, Y. Atomic-scale structure and properties of highly stable antiphase boundary defects in Fe₃O₄. **Nature Communications**, v. 5, n. 5740, Dez. 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ncomms6740>. Acesso em 18 mar. 2025.

MOURACHKINE, A., YAZYEV, O., DUCAT, C., ANSERMET, J. Template nanowires for spintronics applications: nanomagnet microwave resonators functioning in zero

applied magnetic field. **Nano Letters**, v. 8, ed. 11, Out. 2008. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl801820h>. Acesso em: 16 mar. 2025.

NAKAGAWA, K., KIMATA, M., YOKOUCHI, T., SHIOMI, Y. Surface anisotropic magnetoresistance in the antiferromagnetic semiconductor CrSb₂. **Physical Review B**, v. 107, Mai. 2023. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.107.L180405>. Acesso em: 21 mar. 2025.

NATHANSON, H., NEWELL, W., WICKSTROM, R., DAVIS, J. The resonant gate transistor, **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 14, Mar. 1967. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1474635>. Acesso em: 13 mar. 2025.

PARK, S., LEE, K., UNITHRATTIL, S., YOON, H., JANG, H., LM, W. Melilite-Structure CaYAl₃O₇:Eu³⁺ Phosphor: Structural and Optical Characteristics for Near-UV LED-Based White Light. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 116, ed. 51, Nov. 2012. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp307192y>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PATHAK, P., SELOT, A., KURCHANIA, R. Thermoluminescence properties of Mn-doped CaYAl₃O₇ phosphor irradiated with ultra-violet, mega-voltage and gamma radiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 99, p. 26-29, Jun. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X14000498?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

PERALTA-VIDEA, J., ZHAO, L., LOPEZ-MORENO, M., LA ROSA, G., HONG, J., GERDEA-TORRESDEY, J. Nanomaterials and the environment: A review for the biennium 2008–2010. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, Fev. 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410014305>. Acesso em: 14 mar. 2025.

PINHEIRO, A., HAN, D., SHIH, W., YAN, H. Challenges and opportunities for structural DNA nanotechnology. **Nature Nanotechnology**, v. 6, Dez. 2011. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2011.187>. Acesso em: 14 mar. 2025.

POPOV, A., KOTOMIN, E., MIER, J. Basic properties of the F-type centers in halides, oxides and perovskites. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 268, ed. 19, p. 3084-3089, Out. 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X10004714>. Acesso em: 19 mar. 2025.

QIN, L., ZHAO, X., HIRAHARA, K., MIYAMOTO, Y., ANDO, Y., IJIMA, S. The smallest carbon nanotube. **Nature**, v. 408, Nov. 2000. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/35040699>. Acesso em: 13 mar. 2025.

QIU, Z., BADER, S. Surface magneto-optic Kerr effect. **Review Scientific Instruments**, v. 71, Mar. 2000. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-abstract/71/3/1243/436229/Surface-magneto-optic-Kerr-effect?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ROOS, M., QUARTERMAN, P., DING, J., WU, M., KIRBY, B., ZINK, B. Magnetization and antiferromagnetic coupling of the interface between a 20 nm Y₃Fe₅O₁₂ film and Gd₃Ga₅O₁₂ substrate. **Physical Review Materials**, v. 6, Mar. 2022. Disponível em: <https://journals.aps.org/prmaterials/abstract/10.1103/PhysRevMaterials.6.034401>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SAKUMA, A., FUKAMICHI, K., SASAO, K., UMETSU, R. First-principles study of the magnetic structures of ordered and disordered Mn-Ir alloys. **Physical Review B**, v. 67, p. 1-7, Jan. 2003. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.67.024420>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SEPÚLVEDA, S., CORONA, R., ALTBIR, D., ESCRIG, J. Magnetic properties of mosaic nanocomposites composed of nickel and cobalt nanowires. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 416, p. 325-328, Out. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885316304607?via%3Dihub>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA, G. Introduction to nanotechnology and its applications to medicine. **Surgical Neurology**, v. 61, Mar. 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0090301903007857>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SILVA, W., DEGIORGI, S., HOLANDA, J. Experimental observation of a magnetic interfacial effect. **Advanced Materials Interfaces**, v. 10, Fev. 2023. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/admi.202202143>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SILVA, W., HILDEVER, L., SANTOS, M., ESTRADA, F., HOLANDA, J. Analyzing the Magnetic Influence on Magneto-optical Interactions. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, v. 36, p. 951-955, Mar. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-023-06530-7?fromPaywallRec=true>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SINGH, V., WATABE, S., RAO, T., KWAK, H. Synthesis, characterization, luminescence and defect centres in CaYAl₃O₇:Eu³⁺ red phosphor. **Journal of Fluorescence**, v. 21, p. 313-320, Out. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10895-010-0718-x>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SMITH, C. Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. **Physical Review Journals Archive**, v. 94, Abr. 1954. Disponível em: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.94.42>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SPEARING, S. Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS). **Acta Materialia**, v. 48, Jan. 2000, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645499002943>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SUGANO, S., KOJIMA, N. **Magneto-optics**. Berlin: Springer, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-04143-7>. Acesso em: 15 mar. 2025.

SZUNYOGH, L., LAZAROVITS, B., UDVARDI, L., JACKSON, J., NOWAK, U. Giant magnetic anisotropy of the bulk antiferromagnets IrMn and IrMn₃ from first principles. **Physical Review B**, v. 79, Jan. 2009. Disponível em: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.79.020403>. Acesso em 21 mar. 2025.

TOMENO, I., FUKU, H., IWASAKI, H., SAHASHI, M., TSUNODA, Y. Magnetic neutron scattering study of ordered Mn₃Ir. **Journal of Applied Physics**, v. 86, ed. 7, p. 3853-3856, Out. 1999. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/86/7/3853/688180/Magnetic-neutron-scattering-study-of-ordered-Mn3Ir?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 20 mar. 2025.

UNITHRATTIL, S., LEE, K., CHUNG, W., LIM, W. Full-color-emitting CaYAl₃O₇:Pr³⁺,Ce³⁺ phosphor for near-UV LED-based white light. **Journal of Luminescence**, v. 152, p. 176-181, Ago. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022231313007606?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

VERWEY, E. Electronic conduction of magnetite (Fe₃O₄) and its transition point at low temperatures. **Nature**, v. 144, p. 327-328, Ago. 1939. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/144327b0>. Acesso em: 17 mar. 2025.

VERWEY, E., HAAYMAN, P., ROMELIJN, F. Physical properties and cation arrangement of oxides with spinel structures II. Electronic conductivity. **The Journal of Chemical Physics**, v. 15, p. 181-187, Abr. 1947. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/15/4/181/291466/Physical-Properties-and-Cation-Arrangement-of?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em 18 mar. 2025.

VIJAYAKUMAR, R., KOLTYPIN, FELNER, I., GEDANKEN, A. Sonochemical synthesis and characterization of pure nanometer-sized Fe₃O₄ particles. **Materials Science and Engineering: A**, v. 286, p. 101-105, Jun. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150930000647X>. Acesso em: 18 mar. 2025.

VIRJI, S., HUANG, J., WEILLER, B., KANER, R. Polyaniline nanofibre gas sensors: examination of response mechanisms. **Nano Letters**, v. 4, ed. 3, p. 491-496, Fev. 2004. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl035122e>. Acesso em: 18 mar. 2025.

WANG, M., ZHANG, H., KOVALEVICH, T., SALUT, R., KIM, M., SUAREZ, M., BERNAL, M., HERZIG, H., LU, H., GROSJEAN, T. Magnetic spin-orbit interaction of light. **Light Science and Applications**, v. 7, Jun. 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41377-018-0018-9>. Acesso em: 16 mar. 2025.

WANG, Z., YI, Z., QIN, M., HUANG, Q. Low-Drift MEMS Thermal Wind Sensor With Symmetric Packaging Using Plastic Injection Molding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, p. 1-8, Mar. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9383025>. Acesso em: 13 mar. 2025.

WOHLFARTH, E. Relations between Different Modes of Acquisition of the Remanent Magnetization of Ferromagnetic Particles. **Journal of Applied Physics**, v. 29, p. 595-596, Mar. 1958. Disponível em:

<https://pubs.aip.org/aip/jap/article-abstract/29/3/595/367990/Relations-between-Different-Modes-of-Acquisition?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 16 mar. 2025.

XIONG, Y., LUO, H., NIE, Y., CHEN, F., DAY, W., WANG, X., CHENG, Y., GONG, R. Synergistic effect of silica coated porous rodlike nickel ferrite and multiwalled carbon nanotube with improved electromagnetic wave absorption performance. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 802, p. 364-372, Set. 2019. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09255838819322571?via%3Dihub>. Acesso: 15 mar. 2025.

YALÇIN, O., KARTOPU, G., ÇETIN, H., DEMIRAY, A., KAZAN, S. A comparison of the magnetic properties of Ni and Co nanowires deposited in different templates and on different substrates. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 373, p. 207-212, Jan. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304885314003254>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ZAFAR, N., SHAMAILA, S., SHARIF, R., WALI, H., NASEEM, S., RIAZ, S., KHALEEQ-UR-RAHMAN. Effects of pH on the crystallographic structure and magnetic properties of electrodeposited cobalt nanowires. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, V. 377, p. 215-219, Mar. 2015. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030488531401018X>. Acesso em: 16 mar. 2025.

ZHAO, X. LIU, W., LI, S., WANG, T., LIU, L., SONG, Y., MA, S., ZHAO, X., ZHAND, Z. Asymmetric current-driven switching of synthetic antiferromagnets with Pt insert layers. **Nanoscale**, Mar. 2018. Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/nr/c7nr09513a>. Acesso em: 20 mar. 2025.

ZHANG, H., NAN, C., TERASAKI, N., YAMADA, H. Electro-Mechano-Optical Luminescence from CaYAl₃O₇:Ce. **Electrochemical Solid-State Letters**, v. 14, Set. 2011. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.012111esl/pdf>.

Acesso em: 20 mar. 2025.

ZHANG, W., SHEN, H., HU, X., WANG, Y., LI, J., ZHU, Z., YOU, Z., TU, C. Solid-state synthesis, structure and spectroscopic analysis of Dy:CaYAl₃O₇ phosphors. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 781, p. 255-260, Abr. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838818346607>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ZHANG, Z., VOGEL, M., HOLANDA, J., JUNGFLAISCH, M., LIU, C., LI, Y., PEARSON, J., DIVAN, R., ZHANG, W., HOFFMANN, A., NIE, Y., NOVOSAD, V. Spin-wave frequency division multiplexing in an yttrium iron garnet microstripe magnetized by inhomogeneous field. **Applied Physics Letters**, v. 115, Dez. 2019. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article-abstract/115/23/232402/37457/Spin-wave-frequency-division-multiplexing-in-an?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ZHENG, L., ZYWIETZ, U., BIRR, T., DUDERSTADT, M., OVERMEYER, L., ROTH, R., REINHARDT, C. UV-LED. Projection photolithography for high-resolution functional photonic components. **Microsystems & Nanoengineering** 7, v. 7, Ago. 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41378-021-00286-7>. Acesso em: 13 mar. 2025.

ZHOU, D., YU, H., QIU, J. Effects of charge compensation on red emission in CaYAl₃O₇: Eu³⁺ phosphor. **Chinese Optics Letters**, v. 12, Mai. 2014. Disponível em: <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00005/2014/12/5/COL201412051602.pdf>, Acesso em: 19 mar. 2025.

ZHU, J., LIU, X., SHI, Q., HE, T., SUN, Z., GUO, X., LIU, W., SULAIMAN, O., DONG, B., LEE, C. Development Trends and Perspectives of Future Sensors and MEMS/NEMS. **Micromachines**, v. 11, Dez. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/1/7>. Acesso em: 13 mar. 2025.

ZORENKO, Y., FABISIAK, K., ZORENKO, T., MANDOWSKI, A., XIA, Q., BATENTSCHUK, M., FRIEDRICH, J., ZHUSUPKALIEVA, G. Comparative study of the luminescence of Al₂O₃:C and Al₂O₃ crystals under synchrotron radiation

excitation. **Journal of Luminescence**, v. 144, p. 41-44, Dez. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022231313003815?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ZORENKO, Y., VOLOSHINOVSKII, A., STRIGANYUK, G., GORBENKO, V. Exciton luminescence of YAIO₃ single crystals and single-crystal films. **Optics and Spectroscopy**, v. 98, p. 555-558, Abr. 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/1.1914891>. Acesso em: 19 mar. 2025.

ZORENKO, Y., VOLOSHINOVSKII, A., STRYGANYUK, G., KONSTANKEVYCH, I. Ultraviolet luminescence of single crystals and single-crystal films of YAIO₃. **Optics and Spectroscopy**, v. 96, p. 70-76, Mar. 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/1.1643988>. Acesso em: 19 mar. 2025.