



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
COLEGIADO DO CURSO DE FÍSICA

Aldir Antonio de Vasconcellos Neto

Ressonância Ferromagnética em Filmes Finos

Vitória, ES

2023

Aldir Antonio de Vasconcellos Neto

Ressonância Ferromagnética em Filmes Finos

Monografia apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, como requisito para obtenção do título de Bacharel em física.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro de Ciências Exatas

Colegiado do Curso de Física

Orientador: Valberto Pedruzzi Nascimento

Vitória, ES

2023

Aldir Antonio de Vasconcellos Neto

Ressonância Ferromagnética em Filmes Finos/ Aldir Antonio de Vasconcellos
Neto. – Vitória, ES, 2023-

40 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Valberto Pedruzzi Nascimento

Monografia (PG) – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro de Ciências Exatas

Colegiado do Curso de Física, 2023.

1. Filmes Finos. 2. Ressonância Ferromagnética. I. Python. II. Inteligência Artificial. IV. Aprendizado de Máquinas V. Ajustes

Aldir Antonio de Vasconcellos Neto

Ressonância Ferromagnética em Filmes Finos

Monografia apresentado a Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, como requisito para obtenção do título de Bacharel em física.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, () de () de ():

Valberto Pedruzzi Nascimento
Orientador

Edson Passamani Caetano
UFES

José Rafael Capua Proveti
UFES

Vitória, ES
2023

Agradecimentos

Sou grato a minha família pelo apoio ao longo deste percurso acadêmico. Seu incentivo, compreensão e crença em minhas habilidades têm sido uma fonte constante de motivação.

Sou profundamente grato ao meu orientador, Professor Valberto Pedruzzi Nascimento, por sua orientação, experiência e paciência inestimável. Seu trabalho foi fundamental para moldar minha pesquisa e refinar minhas habilidades analíticas. Tenho muita sorte de ter tido um mentor tão dedicado, perspicaz e paciente.

Um agradecimento especial vai para a equipe do Laboratório de Espectroscopia Mössbauer e Magnetometris (LEMAG) pelo seu espírito colaborativo e pelo ambiente enriquecedor que proporcionou a mim. Trabalhar ao lado de pessoas tão talentosas tem sido uma experiência gratificante e me sinto realizado por participar desse grupo.

Aos meus amigos, que têm sido uma fonte de inspiração e camaradagem, obrigado pelo incentivo e por compartilharem os desafios e as alegrias desta empreitada acadêmica. Nossa amizade tornou esta jornada memorável.

Estendo meus agradecimentos à UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) por fornecer um ambiente acadêmico propício e recursos que facilitaram minha pesquisa. A universidade desempenhou um papel crucial na formação da minha base acadêmica.

Agradeço também à FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo) pelo apoio financeiro durante minha Iniciação Científica. O seu investimento tem sido fundamental para promover o desenvolvimento de jovens acadêmicos, e estou grato pelas oportunidades que proporcionaram.

Resumo

Filmes finos magnéticos, essenciais em dispositivos spintrônicos, nanosensores, armazenamento de alta capacidade e até mesmo em tecnologias como placas solares, têm se tornado objeto de intensa investigação na comunidade científica. A complexidade dessas estruturas demanda constante exploração de novas técnicas de controle e aprofundamento no entendimento dos efeitos e propriedades físicas que regem esses sistemas.

No presente estudo, propomos uma abordagem fundamentada no formalismo desenvolvido por Landau e Lifshitz, posteriormente refinado por Gilbert. Este formalismo, aplicado com o objetivo de extrair parâmetros internos específicos das estruturas de filmes finos magnéticos, oferece uma base teórica robusta para investigações de propriedades magnéticas, tais como magnetização efetiva, anisotropias magnéticas, parâmetro de Gilbert e fator giromagnético.

Utilizando técnicas de Aprendizado de Maquinas, desenvolvemos processos computacionais para o ajuste preciso de espectros de ressonância ferromagnética em filmes finos. Além disso, investigamos a variação angular planar e fora do plano do campo de ressonância efetivo, permitindo a extração de parâmetros cruciais de Ressonância Ferromagnética. Entre esses parâmetros, destacam-se a magnetização efetiva, os campos de anisotropia planar e perpendicular e a constante de troca que acopla camadas magnéticas separadas por camadas não magnéticas em um sistema de multicamadas.

A implementação deste código de ajuste em Python, aliada à inteligência artificial, oferece vantagens significativas em relação ao desempenho limitado de programas antigos na linguagem Basic. Além de proporcionar uma análise mais eficiente e precisa dos dados de ressonância ferromagnética, essa abordagem inovadora contribui para superar desafios computacionais, permitindo um entendimento mais profundo e abrangente das propriedades específicas dos filmes finos magnéticos. Ao potencializar a técnica seletiva de ressonância ferromagnética, este trabalho não apenas aprimora os métodos de análise, mas também destaca a aplicabilidade e a relevância do Machine Learning no contexto da pesquisa em materiais magnéticos avançados.

Palavras-chaves: Filmes Finos. Ressonância Ferromagnética. Python. Aprendizado de Máquinas. Inteligencia Artificial.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo geral de uma curva de histerese, onde M_s , M_r e M_c simbolizam a magnetização de saturação, a magnetização remanente e o campo coercitivo.	13
Figura 2 – Espectro de FMR (linha azul) de um filme de 200 nm de Gd depositado por sputtering à temperatura ambiente sobre um substrato de Si com o H orientado a 135° para fora do plano do filme e o respectivo ajuste realizado (curva vermelha).	23
Figura 3 – Comportamento de θ em função de θ_H para a multicamada [NiFe(4nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas obtido com o código de ajuste utilizando a equação 6.	24
Figura 4 – Ajuste da varredura angular dos espectros de FMR fora do plano do modo acústico da multicamada [NiFe(4nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas.	24
Figura 5 – Ajuste da varredura angular dos espectros de FMR fora do plano do modo óptico da multicamada [NiFe(4 nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas.	25
Figura 6 – Ajuste de um espectro de FMR com múltiplos modos de ressonância realizado com código em Python elaborado pelo autor com a ajuda de IA e técnicas de Aprendizado de Maquinas.	25
Figura 7 – Ajuste de um espectro de FMR com múltiplas ressonâncias suaves realizado com código em Python elaborado pelo autor com a ajuda de IA e técnicas de AM.	26

Lista de abreviaturas e siglas

RFM	Ressonância Ferromagnética
IA	Inteligência Artificial
AM	Aprendizado de Máquinas

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Magnetismo na Matéria	12
2.1.1	Ferromagnetismo	12
2.1.2	Anisotropia Magnética	13
2.1.2.1	Anisotropia magnetocristalina	14
2.1.2.2	Anisotropia de forma	15
2.1.2.3	Anisotropia efetiva	15
2.1.3	Energia de Zeeman	15
2.2	Modelo Teórico	16
2.2.1	A dinâmica de Magnetização	16
2.2.2	A Ressonância Ferromagnética	17
2.3	Aprendizado de Máquinas Aplicado à Análise de Ressonância Ferro-	
	magnética	18
2.3.1	Motivação e Relevância	18
3	METODOLOGIA	19
4	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO E CÓDIGO EM PYTHON	20
4.1	Espectros com Múltiplos Picos	20
4.1.1	Método Clássico	20
4.1.2	Desenvolvimento e Estrutura do Código	20
4.2	Espectros de Varreduras Angulares	21
4.2.1	Desenvolvimento e Estrutura do Código	21
4.3	Solução da Equação de Equilíbrio da Magnetização	21
4.3.1	Desenvolvimento e Estrutura do Código	21
4.4	Implementação de Aprendizado de Máquinas e Redes Neurais	21
4.4.1	Desenvolvimento de Modelos de Aprendizado de Máquinas	21
4.4.2	Complexidade de Exposição	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1	Varredura Angular	23
5.2	Varredura Fora do Plano	23
5.3	Varredura de Multímodos	25

5.4	Aprendizado de Máquinas Aplicado à Análise de Ressonância Ferro-	
	magnética	26
5.4.1	Contribuições e Limitações	26
5.4.2	Perspectivas Futuras	26
6	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29
	APÊNDICES	31

1 Introdução

Os filmes finos magnéticos têm recebido maior atenção nos últimos anos devido às suas propriedades únicas e potenciais aplicações, como dispositivos de armazenamento magnético (SHENG; WANG; LI, 2018);(THOMSON, 2014), dispositivos magneto-ópticos (BALASUBRAMANIAN; MARATHAY; MACLEOD, 1988), sensores magnéticos (MEYER et al., 2021) e dispositivos spintrônicos e fotônicos (YANG et al., 2021). Os sistemas compostos por filmes finos são formados pelo empilhamento de uma ou mais camadas de materiais magnéticos com apenas alguns nanômetros de espessura (NAGHDI, 2021). Podem ser produzidos usando técnicas de deposição químicas ou físicas, como a pulverização catódica e a eletrodeposição (TEMESGEN, 2022). As propriedades magnéticas desses filmes podem depender de vários fatores: composição, estrutura cristalina, configuração da multicamada, atmosfera de deposição, temperatura de deposição, estado das interfaces, entre outras (ANSARI et al., 2022);(BABURIN et al., 2017).

A capacidade de controlar e manipular filmes finos magnéticos os tornou um componente-chave dos dispositivos eletrônicos e spintrônicos modernos (YANG et al., 2021), e sua importância provavelmente continuará a crescer no futuro (SHENG; WANG; LI, 2018). Os filmes finos magnéticos revolucionaram o campo da eletrônica e do armazenamento de dados (SHENG; WANG; LI, 2018) e são essenciais para o desenvolvimento de tecnologias novas e aprimoradas. Eles também estão sendo explorados para aplicações médicas, como imagem por ressonância magnética (FABIAN; NANAI, 2019) e direcionamento de drogas magnéticas (PIECADE et al., 2018).

Dentre as técnicas de caracterização de filmes finos, a ressonância ferromagnética (RFM) emerge como uma técnica poderosa e amplamente utilizada para estudar as propriedades de filmes finos ferromagnéticos (LIU et al., 2022);(THOMSON, 2014). Essa técnica consiste na absorção da radiação eletromagnética pelo material ferromagnético quando exposto a um campo magnético externo, que causa uma precessão da magnetização do material em uma certa direção (THOMSON, 2014). O que chamamos de absorção ressonante, ocorre quando frequência do campo da radiação eletromagnética coincide com a frequência de precessão da magnetização.

A técnica é capaz de obter propriedades fundamentais das multicamadas de filmes finos, tais como: magnetização efetiva, anisotropia magnética no plano e fora do plano de filmes finos, parâmetro de amortecimento da magnetização (LIU et al., 2022);(THOMSON, 2014), transporte polarizado por spin (HORAGUCHI; MATSUO; NOZAKI, 2020) e efeitos magneto-ópticos (GAN'SHINA et al., 1995). Estudos recentes também demonstraram o potencial da RFM para sondar as propriedades dependentes de spin de materiais

bidimensionais ([LIU et al., 2022](#)), como grafeno ([AUGUSTYNIAK-JABLOKOW et al., 2015](#)) e dicalcogenetos de metais de transição ([THIRUVENGADAM et al., 2021](#)). Além disso, a RFM pode ser usada para estudar a dinâmica de magnetização de nanoestruturas, como válvulas de spin ([TIMOPHEEV et al., 2013](#)) e junções túnel magnéticas ([TYAGI; GOULET, 2019](#)).

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica da RFM, assim como apresentada toda a modelagem teórica contemplada no trabalho. No capítulo 3 será discutida a metodologia utilizada. Ao longo do capítulo 4 serão abordadas as contribuições originais do trabalho, assim como o código em Python confeccionado. No capítulo 5 serão abordados e discutidos os resultados do trabalho. Por fim, no capítulo 6 uma conclusão final.

2 Referencial Teórico

2.1 Magnetismo na Matéria

2.1.1 Ferromagnetismo

O ente físico elementar do magnetismo na matéria é o momento magnético total do átomo \vec{m} oriundo de seus orbitais incompletos na camada de valência, ou mesmo, de camadas completas, devido à Lei de Lenz. O \vec{m} resulta do somatório do momento magnético orbital (devido ao movimento relativo entre o núcleo e os elétrons) e do momento magnético de spin (propriedade relativística intrínseca do elétron). A contribuição do momento magnético nuclear é muito menor que a contribuição eletrônica e geralmente é desprezada. O \vec{m} geralmente é fornecido em unidades de magneton de Bohr μ_B ($9,27 \times 10^{-24}$ J/T).

A magnetização (\vec{M}) é o somatório vetorial dos momentos magnéticos presentes no material por unidade de volume e, é descrito por:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i \quad (2.1)$$

No ferromagnetismo existe uma interação entre os \vec{m} através da interação de troca que tende a alinhar os \vec{m} paralelamente em uma configuração que minimize a energia interna do material. A interação de troca é de origem quântica e se baseia no princípio de Pauli. Aqui trataremos da interação de troca direta onde os íons magnéticos estão próximos o suficiente para que ocorra a suposição entre suas funções de onda. Neste caso, a hamiltoniana de Heisenberg para a interação de troca entre spins vizinhos \vec{S}_i e \vec{S}_j (desconsiderando a contribuição orbital) é dada por (GUIMARÃES, 2009):

$$H = - \sum_{i,j} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2.2)$$

Para os materiais ferromagnéticos onde os spins estão alinhados paralelamente em uma ordem de longo alcance, a constante de troca J é positiva. Em outras palavras esta constante de troca J força os spins a se alinharem paralelamente para minimizar a energia magnética do material ferromagnético. Por este motivo, o material pode possuir uma \vec{M} espontânea mesmo a campos magnéticos \vec{H} nulos. O comportamento de um material ferromagnético sob a influência de um \vec{H} externo é representado graficamente pelo ciclo de histerese. Na figura 1 vemos um ciclo de histerese clássico. Nele estão destacadas propriedades específicas de cada material, tais como: a magnetização de saturação \vec{M}_S (\vec{M}

máxima alcançável quando todos os momentos magnéticos se alinham com o \vec{H} externo), a magnetização remanente (magnetização em \vec{H} nulo após o ciclo retornar do estado de saturação) e o campo coercivo \vec{H}_C (campo \vec{H} em que a \vec{M} se anula após o ciclo retornar do estado de saturação). Acima de uma determinada temperatura de ordenamento magnético, conhecida como temperatura Curie (T_C), em homenagem a Pierre Curie, a energia térmica supera a energia de troca e o material passa do estado ferromagnético para o estado paramagnético.

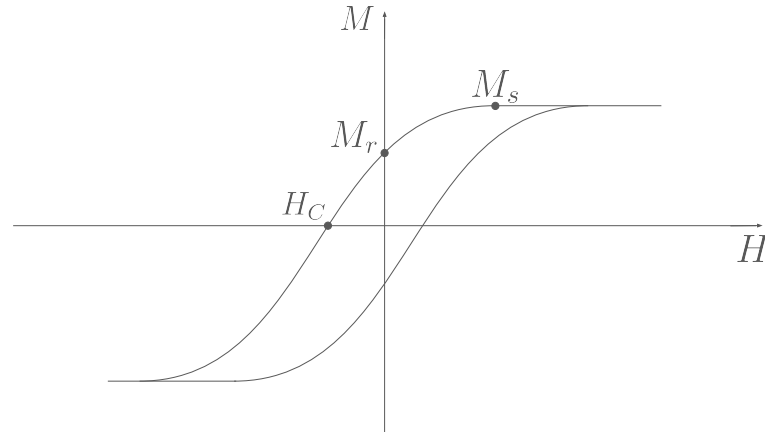


Figura 1 – Exemplo geral de uma curva de histerese, onde M_s , M_r e M_c simbolizam a magnetização de saturação, a magnetização remanente e o campo coercitivo.

Dependendo de sua dimensão, o material ferromagnético pode ainda dividir-se em domínios magnéticos para minimizar a energia magnetoestática (GUIMARÃES, 2009). Em cada domínio todos os \vec{m} estão alinhados resultando em uma \vec{M} local. A \vec{m} total do material do material é a soma vetorial das \vec{m} locais de todos os domínios.

2.1.2 Anisotropia Magnética

A anisotropia magnética é um fenômeno no qual materiais magnéticos exibem propriedades magnéticas diferentes ao longo de direções diferentes da amostra. Essa dependência direcional surge devido a vários fatores, incluindo a estrutura cristalina do material, forma da amostra, efeitos de superfície, tensão cristalográfica, propriedades atômicas dos constituintes, temperatura, entre outros. Em termos simples, significa que os momentos magnéticos num material alinham-se preferencialmente em certas direções. A anisotropia magnética é um conceito fundamental no estudo do magnetismo e desempenha um papel significativo em uma ampla gama de aplicações, desde o armazenamento de dados em discos rígidos magnéticos até a operação de sensores e dispositivos magnéticos como memória magnética e componentes spintrônicos. Compreender e controlar a anisotropia magnética são essenciais para otimizar o desempenho e a eficiência de tais dispositivos. Os pesquisadores continuam a explorar maneiras de projetar e manipular a anisotropia magnética para desenvolver novos materiais com propriedades magnéticas personalizadas para aplicações específicas.

2.1.2.1 Anisotropia magnetocristalina

A anisotropia magnetocristalina K_{mc} representa um aspecto fundamental e intrínscado do magnetismo, governando a dependência direcional das propriedades magnéticas de um material. Este fenômeno surge das características únicas da rede cristalina, especificamente em sua assimetria estrutural intrínseca, que resulta em uma preferência no alinhamento dos \vec{m} ao longo de eixos ou planos cristalográficos específicos. Mais especificamente, a K_{mc} surge da interação elétrica da distribuição de carga que envolve o íon magnético e o campo cristalino criado por todos os íons da rede. Através do acoplamento spin-órbita, a K_{mc} favorece uma direção preferencial para a magnetização.

A manifestação da anisotropia magnetocristalina pode ser quantificada em termos de sua energia (E_u), que representa a energia necessária para girar a \vec{M} a partir de sua direção cristalográfica preferida. Essa energia pode ser elucidada pela interação quântica entre os elétrons e a rede atômica, com contribuições do acoplamento spin-órbita e da simetria da estrutura cristalina. A densidade de energia de anisotropia magnetocristalina uniaxial é normalmente descrita como uma expansão em série de potências de $\sin^2\theta$.

$$E_u = K_{u0} + K_{u1} \sin^2\theta + K_{u2} \sin^4\theta + \dots \quad (2.3)$$

Onde K_{u0} é o termo isotrópico e K_{u1} e K_{u2} são as constantes da anisotropia de primeira e segunda ordem. Quando a magnetização sofre pequenas rotações afastando-se do eixo de fácil alinhamento, a anisotropia magnetocristalina age de maneira comparável a um campo magnético aplicado na direção do eixo de fácil alinhamento, procurando preservar a orientação da magnetização nessa direção. Isso é conhecido como campo de anisotropia. Em materiais com anisotropia uniaxial, o campo de anisotropia assume uma forma específica.

$$H_k = 2 \frac{K_{u1}}{M_s} \quad (2.4)$$

A extensão da anisotropia magnetocristalina está intrinsecamente ligada à simetria cristalográfica do material; estruturas cristalinas com menor simetria geralmente exibem efeitos de anisotropia magnetocristalina mais pronunciados. Pesquisadores e engenheiros muitas vezes procuram manipular e controlar essa anisotropia para melhorar o desempenho de materiais magnéticos em diversas aplicações. Isto pode envolver o ajuste da orientação cristalográfica do material ou a introdução de fatores externos, como deformação mecânica ou campos magnéticos, para modificar a direção de magnetização preferida. Ao fazer isso, eles podem adaptar os materiais para alcançar as propriedades magnéticas desejadas, incluindo maior coercividade, magnetização e remanência, levando a uma melhor funcionalidade e eficiência do dispositivo. Na busca por dispositivos magnéticos cada vez menores e mais poderosos, a compreensão e controle da anisotropia magnetocristalina é fundamental.

2.1.2.2 Anisotropia de forma

A anisotropia de forma K_f depende da geometria da amostra e é observada em materiais magnéticos com simetrias não esféricas. K_f tende a alinhar os momentos magnéticos paralelamente à dimensão mais longa da amostra para minimizar a energia magnetostática. Para um filme fino a densidade de energia de forma pode ser escrita como:

$$E_f = K_f \sin^2 \theta = -2\pi M_s^2 \sin^2 \theta \quad (2.5)$$

onde θ é o ângulo entre a magnetização e a normal ao plano do filme.

Como a K_f emerge da forma física do sólido, ela é particularmente relevante no design e funcionalidade de materiais e dispositivos magnéticos em nanoescala. Por exemplo, em discos rígidos magnéticos, nanoestruturas não esféricas (nanodiscos) são usados para armazenar informações binárias. A K_f garante que os momentos magnéticos se alinhem predominantemente ao longo de um eixo, permitindo o armazenamento estável de dados. Além disso, no desenvolvimento de nanopartículas magnéticas para aplicações biomédicas ou meios de gravação magnética, a K_f é manipulada intencionalmente para alcançar as propriedades magnéticas desejadas, como coercividade e remanência. Generalizando, a capacidade de projetar e controlar a K_f em nanomateriais magnéticos é um elemento-chave na adaptação do desempenho de dispositivos, tornando-se essencial para o avanço contínuo das tecnologias magnéticas.

2.1.2.3 Anisotropia efetiva

A anisotropia efetiva K_{ef} é definida pela ação resultante de todas as anisotropias presentes na amostra e define o eixo de fácil magnetização. Se, por exemplo, K_{ef} possuir um caráter uniaxial, a densidade de energia anisotrópica efetiva pode ser escrita como:

$$E_{ef} = K_{ef} \sin^2 \phi \quad (2.6)$$

2.1.3 Energia de Zeeman

A energia de Zeeman (E_Z) está associada à interação dos \vec{m} dos elétrons individuais com uma indução magnética \vec{B} que age sobre eles. Ela leva a uma divisão dos níveis de energia, causando transições entre diferentes estados quânticos dos elétrons. O termo Zeeman pode ser expresso pela seguinte equação:

$$E_Z = - \int_V \vec{m} \cdot \vec{B} dV \quad (2.7)$$

O efeito Zeeman é observado quando os níveis de energia de um átomo ou de um material magnético são deslocados na presença de um campo magnético externo. A

magnitude e a direção desse deslocamento de energia dependem da orientação do momento magnético em relação ao campo. Esse efeito tem implicações importantes em áreas como espectroscopia atômica e no comportamento de materiais magnéticos em \vec{H} externos.

2.2 Modelo Teórico

2.2.1 A dinâmica de Magnetização

A análise começa com a equação de movimento de um vetor de magnetização na presença de um campo magnético aplicado \vec{H} (Landau; Lifshitz, 1935). Essa análise é então estendida ao caso do limite contínuo de uma rede de spins, com a adição de um termo de amortecimento fenomenológico, a fim de obter a equação Landau-Lifshitz-Gilbert (Gilbert, 1955).

Consideremos a dinâmica do operador de momento angular de spin \vec{S} de um elétron livre sob a ação de um campo magnético externo dependente do tempo, com o termo de Zeeman dado pelo hamiltoniano abaixo:

$$\mathcal{H}_s = -\frac{g\mu_B}{\hbar} \vec{S} \cdot \vec{B} \quad (2.8)$$

Onde g é a razão giromagnética, μ_B é o magneton de Bohr, e μ_0 é a permeabilidade no vácuo. A partir da equação de Schrödinger, o valor esperado do operador de spin satisfaz a equação, usando as relações de comutação do momento angular, como:

$$\frac{d}{dt} \langle \vec{S} \rangle = \frac{g\mu_B}{\hbar} \langle \vec{S} \rangle \times \vec{B} \quad (2.9)$$

Agora, consideremos a relação entre o momento angular clássico \vec{L} de um elétron em movimento e o momento de dipolo orbital $\vec{\mu}_l$ de um circuito de corrente imerso em um campo magnético uniforme, $\vec{\mu}_l = \frac{e}{2m} \vec{L}$, onde e é a carga e m é a massa do elétron. Analogamente, podemos definir a magnetização $\vec{M} = \frac{g\mu_B}{\hbar} \langle \vec{S} \rangle = \gamma \langle \vec{S} \rangle$, onde $\gamma = \frac{g\mu_B}{\hbar}$. Considerando a magnetização \vec{M} , a partir de (2), podemos escrever a equação de movimento da magnetização como:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma_0 [\vec{M}(t) \times \vec{H}_{ef}] \quad (2.10)$$

Onde \vec{H}_{ef} é o campo magnético efetivo sentido pela amostra, incluindo os campos externo e interno. $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_{ef}$ e $\gamma_0 = \mu_0 \gamma$. Na equação (2.9), é notável que $\vec{M} \cdot \vec{M}$ e $\vec{M} \cdot \vec{H}$ são constantes, resultando na manutenção da magnitude do vetor de magnetização constante no tempo, enquanto ele precessa em torno do campo magnético \vec{H} , formando um ângulo constante com o campo.

2.2.2 A Ressonância Ferromagnética

É bem sabido que as curvas experimentais de histerese de substâncias ferromagnéticas mostram claramente que, além de certos valores críticos do campo magnético aplicado, a magnetização satura, torna-se uniforme e alinha-se paralelamente ao campo magnético. Para incorporar esse fato experimental, a partir de bases fenomenológicas, podemos adicionar um termo de amortecimento sugerido por Gilbert (Gilbert, 1955) à equação de movimento, resultando na equação:

$$\frac{d\vec{M}(t)}{dt} = -\gamma_0 [\vec{M}(t) \times \vec{H}_{ef}] - \lambda\gamma_0 \left[\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \right] \quad (2.11)$$

Onde λ é o termo de amortecimento.

Considerando um caso de um filme fino confinado em um plano XY com densidade de energia livre que tem contribuições da energia Zeeman, energia desmagnetizante e anisotropia magnetocristalina, as condições de equilíbrio da magnetização durante a ressonância no plano e fora do plano podem ser escritas como:

Para o caso fora do plano:

$$\phi = \frac{\pi}{2} \quad \text{e} \quad H \sin(\theta - \theta_H) = M_{ef} \sin \theta \cos \theta \quad (2.12)$$

E para o caso no plano:

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad \text{e} \quad H \sin(\phi - \phi_H) = -H_U \sin \phi \cos \phi \quad (2.13)$$

Onde θ é o ângulo polar de \vec{M} , θ_H é o ângulo polar de \vec{H} , ϕ é o ângulo azimutal de \vec{M} , ϕ_H é o ângulo azimutal de \vec{H} , M_{ef} é a magnetização efetiva, e H_U é o campo de anisotropia uniaxial planar.

Ao derivar a densidade de energia livre do filme em relação a θ e ϕ e aplicar as condições de equilíbrio da magnetização (Smit; Beljers, 1955), obtemos as relações de dispersão no plano e fora do plano.

Para o caso fora do plano:

$$\frac{\omega^2}{\gamma_0^2} = [H \cos(\theta - \theta_H) - M_{ef} \cos^2 \theta][H \cos(\theta - \theta_H) - M_{ef} \cos 2\theta] \quad (2.14)$$

E para o caso no plano:

$$\frac{\omega^2}{\gamma_0^2} = [H \cos(\phi - \phi_H) + H_U \cos^2 \phi + M_{ef}][H \cos(\phi - \phi_H) - H_U \cos 2\phi] \quad (2.15)$$

Se a varredura do campo de ressonância fora do plano apresentar um modo óptico, no caso de uma multicamada, a relação de dispersão correspondente será:

$$\frac{\omega^2}{\gamma_0^2} = [H \cos(\theta - \theta_H) - (M_{ef} - \frac{J}{\mu_0 M_S t} \cos^2 \theta)][H \cos(\theta - \theta_H) - (M_{ef} - \frac{J}{\mu_0 M_S t} \cos 2\theta)] \quad (2.16)$$

Onde t é a espessura do espaçador não magnético, e J a constante de troca.

2.3 Aprendizado de Máquinas Aplicado à Análise de Ressonância Ferromagnética

O emprego de técnicas de aprendizado de máquinas (AM) representa uma abordagem inovadora e eficiente na análise de dados complexos, como os provenientes de experimentos de RFM. Nesta seção, discutiremos como a integração de métodos de AM amplia a capacidade de extrair informações valiosas e otimizar processos analíticos.

2.3.1 Motivação e Relevância

A análise de espectros de RFM, especialmente em sistemas com múltiplos picos de ressonância e varreduras angulares, pode ser desafiadora devido à complexidade e à diversidade dos dados envolvidos. A aplicação de algoritmos de AM surge como uma solução promissora para superar obstáculos associados à variabilidade dos espectros, tornando possível a identificação automática de parâmetros relevantes.

Além disso, a implementação de AM nesse contexto não apenas aprimora a precisão e eficiência da análise, mas também proporciona uma compreensão mais profunda dos padrões e correlações presentes nos dados, contribuindo para insights significativos sobre o comportamento magnético dos materiais estudados.

3 Metodologia

Uma abrangente revisão bibliográfica foi conduzida com o propósito de aprimorar a compreensão do formalismo proposto por Landau e Lifshitz ([LANDAU; LIFSHITZ, 1935](#)) e Gilbert ([GILBERT, 1955](#)), visando assimilar a teoria fundamental da RFM em filmes finos. Acompanhando publicações recentes, reconstituições de demonstrações clássicas foram realizadas para montar o referencial teórico do trabalho.

Além disso, foram exploradas ferramentas matemáticas e computacionais com o intuito de aprofundar a compreensão dos sistemas físicos em estudo. O software Mathematica foi empregado para antecipar o comportamento experimental de fenômenos previamente identificados na revisão bibliográfica. Paralelamente, o Python foi utilizado para desenvolver um código destinado ao ajuste de espectros de RFM. Esses espectros foram ajustados por meio de uma função lorentziana, permitindo a extração dos campos de ressonância e das respectivas larguras de linha. Com base nesses dados, os códigos, fundamentados na teoria apresentada neste trabalho, resolveram numericamente as equações [2.12](#) e [2.14](#) para varreduras fora do plano, assim como as equações [2.13](#) e [2.15](#) para varreduras no plano. Isso proporcionou a obtenção dos valores de M_{ef} e H_U . Todos os espectros foram adquiridos a temperatura ambiente sob uma frequência de microondas de 9,79 GHz, exceto nos casos referentes às Figuras 5 e 6, nos quais a frequência foi de 4 GHz.

Para a condução do processo de programação e revisão bibliográfica, recorreu-se a inteligências artificiais (AI), como o ChatGPT, não apenas para a correção de eventuais erros de código, mas também para uma compreensão mais aprofundada do funcionamento dessas aplicações e de suas limitações.

Todos os resultados foram apresentados em reuniões semanais junto ao orientador e, alguma delas, também com a presença de outros professores.

4 Contribuição do Trabalho e Código em Python

Diversos métodos para ajustar espectros de RFM têm sido propostos, muitos dos quais dependem significativamente de operadores humanos e de softwares com custos elevados. Neste estudo, desenvolvemos um código capaz de extrair parâmetros magnéticos de amostras medidas, utilizando exclusivamente softwares gratuitos e automatizando, na medida do possível, o processo.

4.1 Espectros com Múltiplos Picos

4.1.1 Método Clássico

Determinados espectros de RFM exibem múltiplos modos de ressonância. Tradicionalmente, o operador responsável por extrair os valores dos campos de ressonância seria obrigado a ajustar manualmente modo a modo em um software, frequentemente o Origin, um software pago. Este processo, além de ser moroso, é propenso a erros, uma vez que o operador humano pode não identificar picos com larguras de linha significativamente amplas e intensidades reduzidas. Portanto, um software capaz de realizar ajustes automáticos desses picos revela-se uma abordagem interessante.

4.1.2 Desenvolvimento e Estrutura do Código

O código apresentado nos apêndices, conforme mostrado na listagem [1](#), foi concebido com o propósito de ajustar espectros que exibem múltiplos modos de ressonância, sendo cada um destes ajustado pela derivada de uma lorentziana, expressa pela equação [4.1](#).

$$L'(x) = -\frac{16(x - x_0)\Gamma}{\pi [4(x - x_0)^2 + \Gamma^2]^2} \quad (4.1)$$

Em linhas gerais, o código realiza a leitura dos dados, assegurando a conformidade com as expectativas, define o número de modos, os parâmetros iniciais e ajusta o espectro, executando todos os cálculos estatísticos necessários, incluindo o cálculo do valor de R^2 . Por fim, o ajuste é feito e os parâmetros encontrados são apresentados na tela.

4.2 Espectros de Varreduras Angulares

4.2.1 Desenvolvimento e Estrutura do Código

O código descrito nos apêndices, na listagem 2, foi elaborado com o objetivo de ajustar vários espectros simultaneamente em uma varredura angular, utilizando a equação 4.1 ou a soma de duas funções lorentzianas com o mesmo centro (espectro assimétrico). O código é capaz de ajustar todos os modos de maneira simultânea, oferecendo ao operador a opção de acompanhar individualmente ou apenas receber os resultados finais. Por fim, o código gera e ajusta a variação do campo de ressonância em função do ângulo de aplicação do campo, dentro ou fora do plano, conforme o modelo escolhido e apresentado neste trabalho.

Os parâmetros estatísticos que conferem a confiabilidade do ajuste são calculados e podem ser apresentados em conjunto com os parâmetros ajustados.

4.3 Solução da Equação de Equilíbrio da Magnetização

4.3.1 Desenvolvimento e Estrutura do Código

O código exposto nos apêndices, conforme mostrado na listagem 3, foi desenvolvido com o propósito de determinar os valores do ângulo da \vec{M} (θ) em função do ângulo de \vec{H} (θ_H), ambos em relação à normal ao plano do filme, utilizando a equação de equilíbrio da magnetização presente nas equações 2.12 e 2.13. Por fim, os resultados são armazenados em uma pasta externa.

Os parâmetros estatísticos que conferem a confiabilidade do ajuste são calculados e podem ser apresentados em conjunto com os parâmetros ajustados.

4.4 Implementação de Aprendizado de Máquinas e Redes Neurais

4.4.1 Desenvolvimento de Modelos de Aprendizado de Máquinas

No âmbito da RFM, a aplicação de AM envolve o desenvolvimento de modelos capazes de aprender padrões complexos nos espectros. Para o ajuste automático de espectros com múltiplos modos de ressonância, implementamos modelos que utilizam técnicas de aprendizado supervisionado. Esses modelos são treinados com conjuntos de dados simulados teoricamente com base em diversas funções matemáticas que, posteriormente, são ajustados pelo código, permitindo que a máquina generalize e ajuste automaticamente novos espectros.

Além disso, para varreduras angulares e resolução de equações complexas, introdu-

zimos abordagens de aprendizado não supervisionado. Aqui, algoritmos de agrupamento e redes neurais foram empregados para identificar padrões sem a necessidade de treinamento prévio, possibilitando a análise automatizada de conjuntos extensos de dados.

4.4.2 Complexidade de Exposição

Devido à natureza complexa deste trabalho, a divulgação de detalhes mais intrincados dos códigos desenvolvidos torna-se inviável. Foram empregadas técnicas de AM para automatizar ainda mais o processo de ajuste. No primeiro código, a IA treinada é capaz de determinar autonomamente parâmetros iniciais suficientemente precisos e a quantidade de modos presentes no espectro. No segundo código, a IA é habilidosa para definir automaticamente todos os parâmetros que, no código apresentado, são inseridos manualmente, como os ângulos das varreduras e as escolhas dos modelos, além da rotina de iterações do código. Os arquivos de treinamento podem alcançar tamanhos de vários gigabytes, tornando impraticável sua apresentação aqui.

5 Resultados e Discussão

5.1 Varredura Angular

Um exemplo de ajuste de espectro com a derivada de uma função lorentziana é mostrada na Figura 2 para um filme de 200 nm de Gd depositado por sputtering à temperatura ambiente sobre um substrato de Si, onde a direção de H foi girada de 135° fora do plano do filme. O valor do campo de ressonância do espectro é 2222 Oe, enquanto que a largura de linha é 2857 Oe.

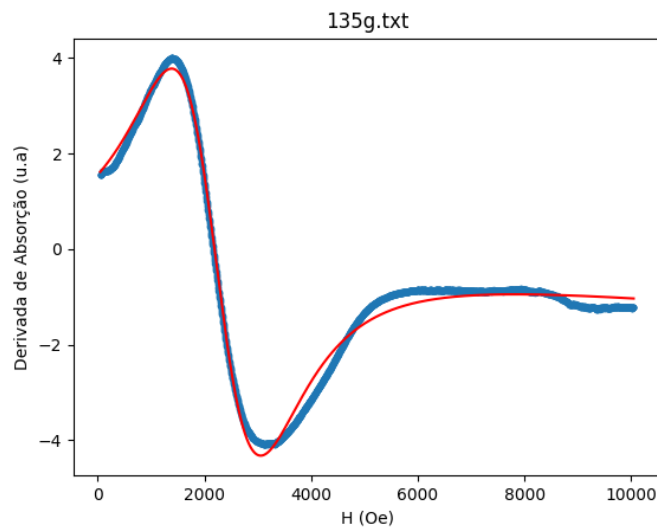


Figura 2 – Espectro de FMR (linha azul) de um filme de 200 nm de Gd depositado por sputtering à temperatura ambiente sobre um substrato de Si com o H orientado a 135° para fora do plano do filme e o respectivo ajuste realizado (curva vermelha).

5.2 Varredura Fora do Plano

Para este exemplo, utilizaremos os dados de FMR da multicamada $[\text{NiFe}(4\text{nm})/\text{WTi}(0,9\text{nm})]$ com 25 repetições periódicas. Com os campos de ressonância obtidos dos vários espectros da varredura angular fora do plano, é dado início ao processo de ajuste da magnetização efetiva M_{eff} da amostra utilizando as equações 2.12 e 2.14. Como o modelo apresentado prevê três variáveis, o campo de ressonância H_r , seu ângulo θ_H , e o ângulo da magnetização θ , fez-se o uso de um profundo processo de “Aprendizado de Maquinas”, onde os valores do campo são constantemente alterados junto com os valores das variáveis θ a cada iteração, a fim de encontrar os valores que forneçam o menor R^2 possível. No final desse processo, uma tabela de valores de θ em função de θ_H é gerada, cujo comportamento pode ser visto

na Figura 3. Depois, recorreremos à equação 8 para o ajuste da variação angular do modo uniforme acústico (Figura 4). Esse é um resultado significativo, pois graças ao Aprendizado de Maquinas, rapidamente obtemos resultados precisos.

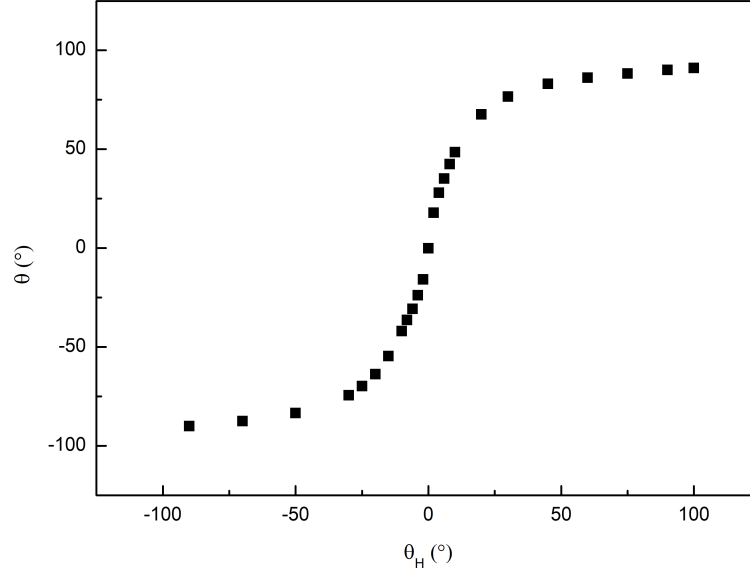


Figura 3 – Comportamento de θ em função de θ_H para a multicamada [NiFe(4nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas obtido com o código de ajuste utilizando a equação 6.

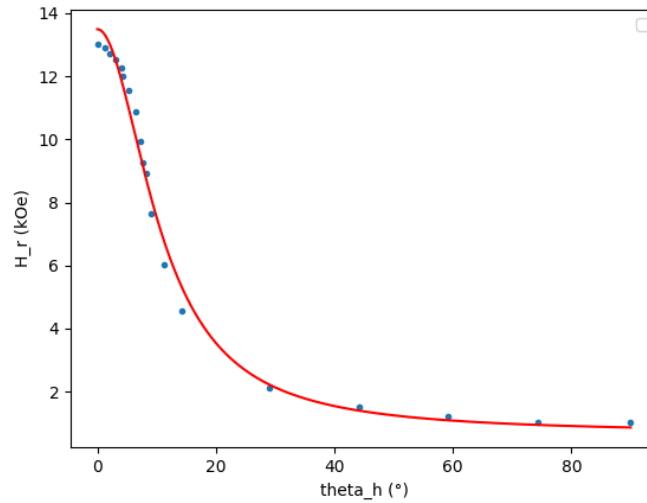


Figura 4 – Ajuste da varredura angular dos espectros de FMR fora do plano do modo acústico da multicamada [NiFe(4nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas.

Com o valor da magnetização efetiva obtido do ajuste da Figura 4 ($\mu_0 \vec{M}_{eff} = 0,966T$) é possível encontrar o valor da constante de troca $\vec{J} = 5,19.10^{-12} J/m^2$ através do ajuste do modo óptico (Figura 5), mostrando que o acoplamento é ferromagnético.

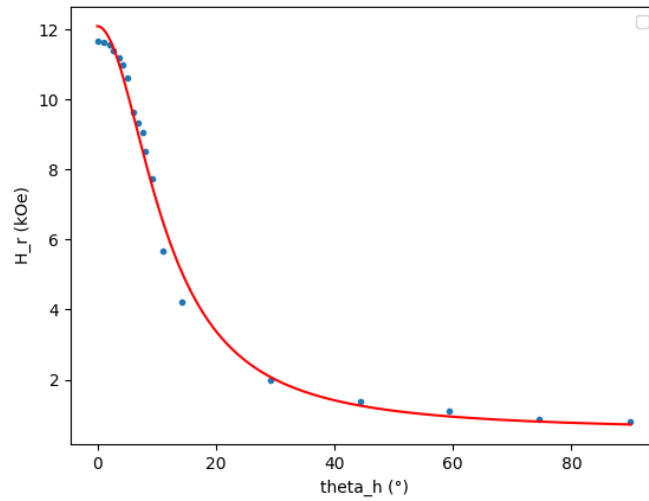


Figura 5 – Ajuste da varredura angular dos espectros de FMR fora do plano do modo óptico da multicamada [NiFe(4 nm)/WTi(0,9nm)] com 25 repetições periódicas.

5.3 Varredura de Multimodos

Outro tipo de ajuste altamente impactado pela implementação de “Aprendizado de Maquinas” em Python é a identificação de múltiplos modos de ressonância em espectros de RFM. Treinando um algoritmo para prever os valores iniciais de parâmetros e o número de modos no espectro, retiramos a necessidade de análises manuais por operadores do software. Uma análise que poderia levar horas ou dias, com o código utilizado é feita em segundos, encontrando muitas vezes mais modos que um operador humano. Na Figura 6, vemos como o código é capaz de facilmente identificar os modos e ajustá-los. Na Figura 7 observamos como modos de difícil detecção podem ser observados pelo operador. Em uma comparação, o código obteve 16 picos, enquanto um operador humano 12.

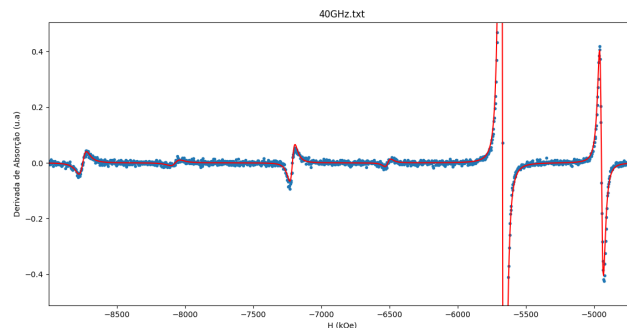


Figura 6 – Ajuste de um espectro de FMR com múltiplos modos de ressonância realizado com código em Python elaborado pelo autor com a ajuda de IA e técnicas de Aprendizado de Maquinas.

Com esses resultados podemos com maior facilidade e precisão analisar espectros de FMR e obter parâmetros magnéticos das amostras, um avanço significativo e fundamental

para disseminação da técnica. Além do desenvolvimento de novas aplicações para métodos de AM, mostrando não apenas as capacidades de tais métodos, mas também suas limitações.

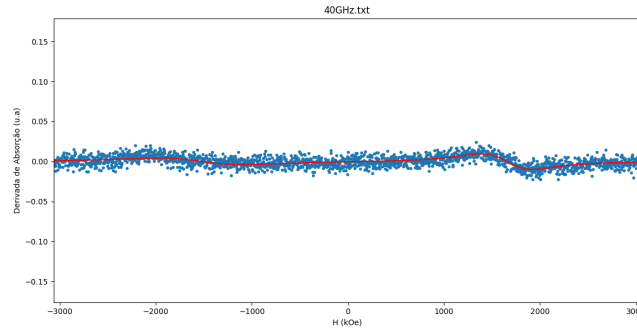


Figura 7 – Ajuste de um espectro de FMR com múltiplas ressonâncias suaves realizado com código em Python elaborado pelo autor com a ajuda de IA e técnicas de AM.

5.4 Aprendizado de Máquinas Aplicado à Análise de Ressonância Ferromagnética

5.4.1 Contribuições e Limitações

A implementação de AM nesta pesquisa proporcionou diversas contribuições significativas. Primeiramente, permitiu a automação de tarefas e a aceleração do processo de análise que, de outra forma, seriam intensivas em trabalho manual. Além disso, a capacidade de adaptação dos modelos de AM a novos conjuntos de dados confere robustez à análise, mesmo diante de variações nas características dos espectros.

Contudo, é essencial reconhecer as limitações associadas ao uso de AM. A qualidade dos resultados depende da disponibilidade e qualidade dos conjuntos de treinamento, e a interpretação dos modelos pode ser desafiadora devido à sua natureza muitas vezes "caixa preta". Além disso, a complexidade computacional de certos algoritmos pode impor restrições em ambientes de recursos limitados.

5.4.2 Perspectivas Futuras

O avanço contínuo das técnicas de aprendizado de máquinas oferece perspectivas animadoras para o campo da RFM. A exploração de métodos mais avançados, como redes neurais profundas e técnicas de aprendizado por reforço, promete ampliar ainda mais as capacidades de análise automatizada, possibilitando a extração de informações mais sutis e aprimorando a compreensão dos fenômenos magnéticos em materiais complexos.

À medida que a área de AM evolui, a integração dessas abordagens nas análises

de RFM continuará a desempenhar um papel crucial no avanço da pesquisa em materiais magnéticos, fornecendo novas ferramentas para explorar e controlar propriedades magnéticas em escalas nanométricas.

6 Conclusão

Neste estudo, apresentamos a teoria da ressonância ferromagnética e verificamos que o movimento de precessão da magnetização em torno do eixo do campo magnético aplicado, está intrinsecamente vinculado a diversos fatores internos da amostra, como sua geometria, estrutura, composição, ambiente químico, entre outros parâmetros.

Ao explorar as nuances desse fenômeno, identificamos a complexidade inerente ao comportamento dos filmes finos, ressaltando a influência significativa desses fatores nas propriedades magnéticas da amostra. Neste contexto, a ressonância ferromagnética emerge como uma poderosa técnica material seletiva para caracterização de materiais ferromagnéticos. Em última análise, nosso trabalho buscou ir além da simples exposição teórica, utilizando abordagens práticas para a análise e interpretação de alguns sistemas magnéticos complexos (filmes de Gd e multicamadas NiFe/FeMn).

Empregando técnicas avançadas de aprendizado de máquinas, desenvolvemos uma série de códigos em Python, os quais, de maneira acessível e gratuita, têm a capacidade de extrair parâmetros cruciais, como os campos de ressonância e larguras de linha dos espectros, a magnetização efetiva de filmes finos e a constante de troca em multicamadas. Esses códigos não apenas simplificam o processo de análise, mas também representam uma contribuição significativa para a eficiência e acessibilidade das técnicas utilizadas.

A compreensão mais aprofundada do comportamento de filmes finos, bem como das implicações derivadas desses padrões, abre perspectivas promissoras para uma variedade de aplicações. Em particular, tais conhecimentos desempenham um papel crucial no desenvolvimento de métodos avançados de controle das propriedades magnéticas de nanoestruturas, desempenhando um papel vital no avanço contínuo da tecnologia spintrônica e em suas aplicações práticas.

Referências

ANSARI, S. M. et al. Temperature dependence of capacitance–voltage characteristics of germanium telluride thin films. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 18, p. 2631–2640, 2022. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422004586>>. Citado na página 10.

AUGUSTYNIAK-JABLOKOW, M. et al. Fmr evidence of stable ferromagnetic correlations at zigzag edge states in graphene. In: . [S.l.: s.n.], 2015. v. 127. Citado na página 11.

BABURIN, A. et al. Crystalline structure dependence on optical properties of silver thin film over time. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 1497–1502. Citado na página 10.

BALASUBRAMANIAN, K.; MARATHAY, A.; MACLEOD, H. Modeling magneto-optical thin film media for optical data storage. *Thin Solid Films*, v. 164, p. 391–403, 1988. ISSN 0040-6090. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004060908890168X>>. Citado na página 10.

FABIAN, L.; NANAI, L. Prologue: Thin-film synthesis and application for medical and biological use. In: NÂNAI, L. et al. (Ed.). *Methods for Film Synthesis and Coating Procedures*. Rijeka: IntechOpen, 2019. cap. 6. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.84968>>. Citado na página 10.

GAN'SHINA, E. et al. Optical, magneto-optical and fmr investigations of multilayer co/zr films. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 146, n. 1, p. 143–148, 1995. ISSN 0304-8853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304885394016747>>. Citado na página 10.

GILBERT, T. L. A lagrangian formulation of the gyromagnetic equation of the magnetization field. *Physical Review D*, v. 100, p. 1243, 1955. Citado na página 19.

GUIMARÃES, A. *Magnetismo e Ressonância Magnética em Sólidos (tradução de Magnetism and Magnetic...(Wiley (1998)))*. first edition. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 978-85-314-0946-2. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

HORAGUCHI, T.; MATSUO, M.; NOZAKI, Y. Highly accurate evaluation of spin-torque efficiency by measuring in-plane angular dependence of spin-torque ferromagnetic resonance. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 505, p. 166727, 2020. ISSN 0304-8853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885320301098>>. Citado na página 10.

LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. On the theory of the dispersion of magnetic permeability in ferromagnetic bodies. *Phys. Z. Sowjet.*, v. 8, p. 153, 1935. Disponível em: <<http://cds.cern.ch/record/437299>>. Citado na página 19.

LIU, C. et al. Ferromagnetic resonance in fept thin films at elevated temperatures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 563, p. 169988, 2022. ISSN 0304-8853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885322008733>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

MEYER, J. M. et al. Thin-film-based saw magnetic field sensors. *Sensors*, v. 21, n. 24, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8166>>. Citado na página 10.

NAGHDI, S. Thin films- definition, deposition techniques, and applications. 02 2021. Citado na página 10.

PIEADADE, A. P. et al. Thin films for medical and environmental applications. In: NÁNAI, L. et al. (Ed.). *Methods for Film Synthesis and Coating Procedures*. Rijeka: IntechOpen, 2018. cap. 8. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.80021>>. Citado na página 10.

SHENG, P.; WANG, B.; LI, R. Flexible magnetic thin films and devices. *Journal of Semiconductors*, v. 39, p. 011006, 01 2018. Citado na página 10.

TEMESGEN, G. Thin film deposition and characterization techniques. *Journal of 3D Printing and Applications*, v. 1, n. 2, p. 1 – 24, 2022. ISSN 2831-8846. Disponível em: <<https://openaccesspub.orgj3dpa/article/1804>>. Citado na página 10.

THIRUVENGADAM, V. et al. *Enhancement of in-plane anisotropy in MoS₂/CoFeB bilayers*. arXiv, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2108.05130>>. Citado na página 11.

THOMSON, T. 10 - magnetic properties of metallic thin films. In: BARMAK, K.; COFFEY, K. (Ed.). *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. Woodhead Publishing, 2014. p. 454–546. ISBN 978-0-85709-057-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090577500103>>. Citado na página 10.

TIMOPHEEV, A. et al. Resonant and non-resonant microwave absorption as a probe of the magnetic dynamics and switching in spin valves. *Journal of Applied Physics*, v. 114, 07 2013. Citado na página 11.

TYAGI, P.; GOULET, T. *Nanoscale Tantalum Layer Controlling the Magnetic Coupling between Two Ferromagnetic Electrodes via Insulator of a Magnetic Tunnel Junction*. 2019. Citado na página 11.

YANG, Y. et al. Recent advances in development of magnetic garnet thin films for applications in spintronics and photonics. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 860, p. 158235, 2021. ISSN 0925-8388. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820345989>>. Citado na página 10.

Apêndices

Listagem 1 – Código para ajuste de Espectros com múltiplos picos de ressonância

```

1 import numpy as np
2 import math
3 from numpy import arange
4 from pandas import read_csv
5 from scipy.optimize import curve_fit
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import os
8 #codigo para instalar bibliotecas
9 #py -m pip install numpy
10 #py -m pip install pandas
11 #py -m pip install scipy
12 #py -m pip install matplotlib
13 #py -m pip install os_sys
14
15 folderpath = r"C:\Users\aldir\Documents\ufes\PYTHON\ajuste multiplo\dados" #note
    que tem um r" antes do caminho do diretorio
16 filepaths = [os.path.join(folderpath, name) for name in os.listdir(folderpath)]
17 all_files = []
18
19 # caminho do diretorio
20 dir_path = r'C:\Users\aldir\Documents\ufes\PYTHON\ajuste multiplo\dados'
21
22 # listas em branco
23 res = []
24 ya=[]
25 #pergunta para adiantar
26 h=-1
27 # conta o numero de arquivos e os lista por nome, Ex: dat.txt
28 for path in os.listdir(dir_path):
29     # checa se é um arquivo
30     if os.path.isfile(os.path.join(dir_path, path)):
31         res.append(path)
32
33 for x in res:
34     data = np.loadtxt(fname = x, delimiter = '\t')
35     x= []
36     y= []
37
38     for i in range(len(data)):
39         for j in range(2):
40             if j == 0:
41                 x.append(data[i][j])
42             else:
43                 y.append(data[i][j])
44
45     def func(x,
46             a1, b1, c1,
47             a2, b2, c2,
48             a3, b3, c3,
49             a4, b4, c4,
50             a5, b5, c5,
51             a6, b6, c6,
52             a7, b7, c7,
53             a8, b8, c8):
54         return (16*c1*(x-a1)*b1)/(math.pi*(4*(x-a1)**2+b1**2)**2)+(16*c2*(x-a2)*

```

```

b2)/(math.pi*(4*(x-a2)**2+b2**2)**2) + (16*c3*(x-a3)*b3)/(math.pi*(4*(
x-a3)**2+b3**2)**2) + (16*c4*(x-a4)*b4)/(math.pi*(4*(x-a4)**2+b4**2)
**2) + (16*c5*(x-a5)*b5)/(math.pi*(4*(x-a5)**2+b5**2)**2) + (16*c6*(x-
a6)*b6)/(math.pi*(4*(x-a6)**2+b6**2)**2) + (16*c7*(x-a7)*b7)/(math.pi
*(4*(x-a7)**2+b7**2)**2) + (16*c8*(x-a8)*b8)/(math.pi*(4*(x-a8)**2+b8
**2)**2)
55
56 popt, pcov = curve_fit(func, x, y, p0=(
57 -6697,-52,-64,
58 -5829,-41,33,
59 -4946,-27,1610,
60 -2626,220,-1116,
61 2729,521,-924,
62 4933,-28,1694,
63 5817,-47,52,
64 6691,-58,-70))
65 #,
66 #6318,72,-29,
67 #7130,-67,-188
68 #))
69
70 print("Resultados da estimativa de parâmetros:")
71 print("centro 1 = ",popt[0], " | largura 1 = ",popt[1], "Amplitude 1 = ",popt
72 [2], "\n",
73 "centro 2 = ",popt[3], " | largura 2 = ",popt[4], "Amplitude 2 = ",popt[5], "\n"
74 ,
75 "centro 3 = ",popt[6], " | largura 3 = ",popt[7], "Amplitude 3 = ",popt[8], "\n"
76 ,
77 "centro 4 = ",popt[9], " | largura 4 = ",popt[10], "Amplitude 4 = ",popt[11], "\n"
78 ,
79 "centro 5 = ",popt[12], " | largura 5 = ",popt[13], "Amplitude 5 = ",popt[14], "\n"
80 ,
81 "centro 6 = ",popt[15], " | largura 6 = ",popt[16], "Amplitude 6 = ",popt[17], "\n"
82 ,
83 "centro 7 = ",popt[18], " | largura 7 = ",popt[19], "Amplitude 7 = ",popt[20], "\n"
84 ,
85 "centro 8 = ",popt[21], " | largura 8 = ",popt[22], "Amplitude 8 = ",popt[23])
86
87 print("-----")
88 #print("Matriz de covariância da estimativa:")
89 #print(pcov)
90
91 a1 = popt[0]
92 b1 = popt[1]
93 c1 = popt[2]
94 a2 = popt[3]
95 b2 = popt[4]
96 c2 = popt[5]
97 a3 = popt[6]
98 b3 = popt[7]
99 c3 = popt[8]
100 a4 = popt[9]
101 b4 = popt[10]
102 c4 = popt[11]
103 a5 = popt[12]
104 b5 = popt[13]
105 c5 = popt[14]

```

```
99     a6 = popt[15]
100     b6 = popt[16]
101     c6 = popt[17]
102     a7 = popt[18]
103     b7 = popt[19]
104     c7 = popt[20]
105     a8 = popt[21]
106     b8 = popt[22]
107     c8 = popt[23]
108
109     #residuals = y - func(x, a1, b1, c1, a2, b2, c2, a3, b3, c3, a4, b4, c4, a5,
110                          b5, c5, a6, b6, c6, a7, b7, c7, a8, b8, c8, a9, b9, c9, a10, b10, c10)
111     #fres = sum(residuals**2)
112     h=h+1
113
114     #print("Soma dos quadrados dos resíduos:")
115     #print(fres)
116     #print("h=",h)
117
118     curvex=np.linspace(-10000,10000,20000)
119     curvey=func(curvex,a1, b1, c1, a2, b2, c2, a3, b3, c3, a4, b4, c4, a5, b5, c5
120                , a6, b6, c6, a7, b7, c7, a8, b8, c8)
121     plt.plot(x,y, '. ')
122     plt.plot(curvex,curvey, 'r ')
123     plt.title(res[h])
124     plt.xlabel('x')
125     plt.ylabel('y');
126     plt.show()
127
128 fim = input('aperte enter para finalizar o código')
```

Listagem 2 – Código para ajuste de varreduras angulares no plano e fora do plano incluindo a interação intercamadas magnéticas (modo óptico)

```

1 import numpy as np
2 import math
3 from numpy import arange
4 from pandas import read_csv
5 from scipy.optimize import curve_fit
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import os
8 #codigo para instalar bibliotecas
9 #py -m pip install numpy
10 #py -m pip install pandas
11 #py -m pip install scipy
12 #py -m pip install matplotlib
13 #py -m pip install os_sys
14
15 folderpath = r"C:\Users\aldir\Documents\ufes\PYTHON\plot geral\dados" #note que
    tem um r" antes do caminho do diretorio
16 filepaths = [os.path.join(folderpath, name) for name in os.listdir(folderpath)]
17 all_files = []
18
19 # caminho do diretorio
20 dir_path = r'C:\Users\aldir\Documents\ufes\PYTHON\plot geral\dados'
21
22 # listas em branco
23 res = []
24 ya=[]
25 h=0
26 vn1
    =[1634,1825,2384,3855,4564,5388,6477,7694,8111,8380,8618,8655,8625,8419,8102,7767,7243,67
27 vn2
    =[1400,1860,2410,4050,4750,5520,6560,7950,8300,8630,8720,8790,8850,8610,8250,7990,7350,67
28 #pergunta para adiantar
29 ver = input('Deseja ver os graficos de ressonancia 1 a 1? Responda s, ou n')
30 # conta o numero de arquivos e os lista por nome, Ex: dat.txt
31 for path in os.listdir(dir_path):
32     # checa se é um arquivo
33     if os.path.isfile(os.path.join(dir_path, path)):
34         res.append(path)
35
36 for x in res:
37     data = np.loadtxt(fname = x, delimiter = '\t')
38     x= []
39     y= []
40     for i in range(len(data)):
41         for j in range(2):
42             if j == 0:
43                 x.append(data[i][j])
44             else:
45                 y.append(data[i][j])
46
47 def func(x, y0, B, k1, k2, w, xc):
48     return y0+(B*x)+(k1*(4*w*(x-xc))/((4*((x-xc)**2)+(w**2))**2))-(k2*(4*w*(x

```



```
145 plt.plot(curvex,curvey,'r')
146 plt.legend();
147 plt.show()
148
149 print("\n","_____")
150 print("4piMeff = ",a1, "\n", "(w/sigma)^2 =",b1)
151
152 plt.plot(xa,ya,'.', label='Centros dos Ajustes')
153 plt.xlabel('x')
154 plt.ylabel('y')
155 plt.legend();
156 plt.show()
157
158 print("\n","_____")
159
160
161 fim = input('aperte enter para finalizar o codigo')
```

Listagem 3 – Código para encontrar ângulos da magnetização em função do angulo do campo aplicado fora do plano do filme

```

1 import numpy as np
2 import math
3 from numpy import arange
4 from pandas import read_csv
5 from scipy.optimize import curve_fit
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 import os
8 #codigo para instalar bibliotecas
9 #py -m pip install numpy
10 #py -m pip install pandas
11 #py -m pip install scipy
12 #py -m pip install matplotlib
13 #py -m pip install os_sys
14
15 ver = input('Deseja digitar o valor de 4PiMeff? Responda s, ou n (caso resposta
        seja n, ele usara o valor de 7875.95 Oe) ')
16 print("\n")
17 if ver in ["s"]:
18     Meff= float(input("Digite o valor de 4PiMeff "))
19 else:
20     Meff = 5408.1
21 vtheta= []
22 thetah = []
23 hr = []
24 x = -1
25
26 for line in open('thetahXhr.txt', 'r'):
27     values = [float(s) for s in line.split()]
28     thetah.append(values[0])
29     hr.append(values[1])
30
31 def fun(start, end, step):
32     num = np.linspace(start, end,(end-start)
33                     *int(1/step)+1).tolist()
34     return [round(i, 2) for i in num]
35 #theta = fun(-100,110,0.1)
36 #print(theta)
37
38
39 for i in thetah:
40     '''if i==0:
41         a=int(i-10)
42         b=int(i+10)
43     elif i > 0:
44         a=int(-i*(0.1))
45         b=int(i+50)
46     else:
47         a=int(i-50)
48         b=int(i*(0.1))'''
49 a=int(i-50)
50 b=int(i+50)
51 theta = fun(a,b,0.01)
52 x = x + 1

```

```

53     #print(i)
54     fra = [(hr[x] * np.sin(np.radians(j-i)))/( Meff * np.sin(np.radians(j)) * np.
           cos(np.radians(j))) for j in theta]
55     item = min(fra, key=lambda x:abs(x-1))
56     print(item)
57     index = fra.index(item)
58     print(theta[index])
59     print(theta[0])
60     print(theta[-1])
61     print("\n")
62     vtheta.append(theta[index])
63
64
65
66     print(*vtheta, sep="\n")
67     #print("\n","-----||-----")
68     #print(*thetah, sep="\n")
69
70     file = open("Resultados.txt", "w")
71     for index in range(len(vtheta)):
72         file.write(str(thetah[index]) + " " + str(vtheta[index]) + "\n")
73     file.close()
74     print("\n")
75     x= (6734.475877 * np.sin(np.radians(38.5)))- ( Meff * np.sin(np.radians(48.5) *
           np.cos(np.radians(48.5))))
76     print(x)
77
78     print("\n")
79     fim = input('aperte enter para finalizar o código')
```