

Modos Magnetoestáticos em Filmes de YIG: Uma Abordagem via Python

Thiago F. Oliveira,¹ Wibson W. G. Silva,² Luana M. C. S. Hildever,³ Adrielson A. Dias,⁴ André J.C. Silva,⁵ José H. S. Júnior⁶

UFRPE, Cabo de Santo Agostinho, PE

A teoria dos modos magnetostáticos e suas excitações elementares está bem estabelecida na literatura [2–5]. Walker [5] apresentou a primeira teoria para esferas, introduzindo os "modos de Walker". Damon e Eshbach [2] posteriormente desenvolveram a teoria para filmes ferromagnéticos. Neste trabalho, analisamos os possíveis modos para a granada de ítrio e ferro (do inglês, Yttrium Iron Garnet - YIG), mediante o método de Müller [1], ao resolver a equação fundamental que descreve os possíveis modos em um filme ferro(ferri)magnético (Equação (1)):

$$2 \cdot (1 + \kappa) \cdot \sqrt{-\delta} \cdot \cot(k_x t) + \delta \cdot (1 + \kappa)^2 - \nu^2 \cdot \operatorname{sen}^2(\theta_k) + 1 = 0. \quad (1)$$

Entre os modos existentes estão os modos de superfície e de volume. Vamos analisar agora esses dois regimes de espectro separadamente. Primeiro para $\delta \geq 0$ onde k_x é imaginário, resultando em modos de superfície. Em seguida, para $\delta \geq 0$ onde todas as componentes do vetor de onda são reais, correspondendo ao modo de volume.

Para o modo de superfície, temos, $\theta_k = \pi/2$. Logo, $\delta = 1$ e $k_x = (-1)^{1/2}k = \pm ik$, sendo $\cot(k_x t) = \coth(kt)/i$, com $k_x = +ik$. Com isso, podemos reescrever (1) como:

$$2 \cdot (1 + \kappa) \cdot \coth(k_x t) + \delta \cdot (1 + \kappa)^2 - \nu^2 \cdot \operatorname{sen}^2(\theta_k) + 1 = 0. \quad (2)$$

A solução para a Equação (2) é obtida analiticamente a partir da seguinte relação de dispersão:

$$\Omega^2 = \Omega_H^2 + \Omega_H + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1 + \coth(kt)} \right), \quad \text{onde } \Omega_H = \frac{H}{4\pi M}, \quad \Omega = \frac{\omega}{4\pi M\gamma}. \quad (3)$$

Agora, usando as expressões obtidas, reescrevemos a Equação (3):

$$\omega^2 = \gamma^2 (H^2 + 4\pi MH + (2\pi M)^2 (1 - e^{-2tk})). \quad (4)$$

Para o modo de volume, temos $\theta_k = 0$. Logo a Equação (1) se escreve:

$$2(1 + \kappa)\sqrt{-\delta} \cot(k_x t) + \delta(1 + \kappa)^2 + 1 = 0, \quad \text{com } \delta = 1/(1 + \kappa). \quad (5)$$

A Equação (5) pode ser resolvida apenas numericamente, com exceção para $k_y = 0$, onde a propagação da onda de spin ocorre na direção de k_z e tem-se, $k_x = k_x + \sqrt{-\delta}k_z = +\sqrt{-\delta}k$. Dito isso, podemos reescrever a Equação (6) como:

¹thiago.ferro@ufrpe.br

²wibson.wagner@ufrpe.br

³luana.hildever@ufrpe.br

⁴adrielson.dias@ufrpe.br

⁵andre.carvalhosilva@ufrpe.br

⁶joseholanda.silvajunior@ufrpe.br

$$2 \coth\left(\frac{kt}{\sqrt{1+\kappa}}\right) + \frac{1}{\sqrt{1+\kappa}} + \sqrt{1+\kappa} = 0, \quad \text{onde } \kappa = \frac{\Omega_H}{\Omega_H^2 - \Omega^2}, \quad \nu = \frac{\Omega}{\Omega_H^2 - \Omega^2}. \quad (6)$$

Isto é,

$$\Omega_H^2 + 4\Omega_H(\Omega_H^2 - \Omega^2) \left(\frac{1}{2} - \coth\left(\frac{kt}{\sqrt{1+\kappa}}\right)\right) + 4(\Omega_H^2 - \Omega^2) \left(1 - \coth\left(\frac{kt}{\sqrt{1+\kappa}}\right)\right) = 0. \quad (7)$$

A Equação (7) é denominada de equação característica de Damon-Esbach. Resolvendo-a para k próximo de zero, obtém-se a relação de dispersão. Apesar dessa equação ter sido desenvolvida originalmente para o caso de uma placa infinita, neste trabalho a aplicamos para o caso de filmes de dimensões finitas. Para que essa aproximação seja válida consideramos as variáveis $k_x = n_x\pi/L_x$ e $k_z = n_z\pi/L_z$, como $L_x, L_z \gg L_y = d$, onde d é a espessura do filme.

Para obter raízes da Equação (7), que determinam a frequência de ressonância ferromagnética (ω_k) para os modos de superfície (k_x) e volume (k_z), apresentados na Figura 1, usou-se a linguagem Python e a função `findroot` da biblioteca `mpmath`, que possui implementado o método de Müller.

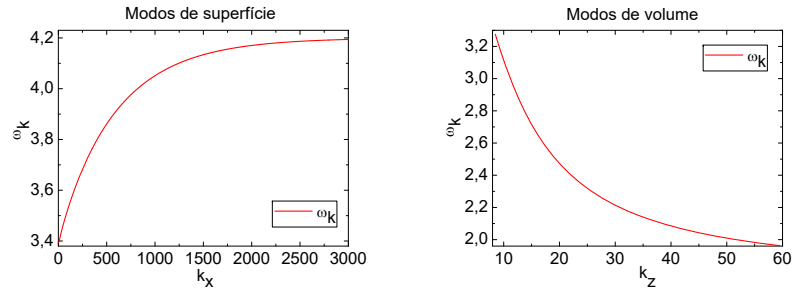


Figura 1: Relações de dispersão. Fonte: Autor

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo CNPq, CAPES, FINEP e FACEPE.

Referências

- [1] S. C. Chapra e R. P. Canale. **Métodos Numéricos para Engenharia-7ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- [2] R. W. Damon e J. R. Eshbach. “Magnetostatic modes of a ferromagnet slab”. Em: **Journal of Physics and Chemistry of Solids** 19.3-4 (1961), pp. 308–320.
- [3] J. Holanda. “Analyzing the magnetic interactions in nanostructures that are candidates for applications in spintronics”. Em: **Journal of Physics D: Applied Physics** 54.24 (2021), pp. 245004–245011.
- [4] J. Holanda, C. L. A. V. Campos, C. A. Franca e E. Padrón-Hernández. “Effective surface anisotropy in polycrystalline ferromagnetic nanowires”. Em: **Journal of Alloys and Compounds** 617 (2014), pp. 639–641.
- [5] L. R. Walker. “Magnetostatic modes in ferromagnetic resonance”. Em: **Physical Review** 105.2 (1957), pp. 390–399.