

Dinâmica dos Skyrmions em Nanofitas Magnéticas

Emivaldo Alves da Silva Filho¹ – UNIFESSPA
e.fillho@gmail.com

Erico Raimundo Pereira de Novais² - UNIFESSPA
ericonovais@unifesspa.edu.br

Agência Financiadora: FAPESPA

Eixo Temático/Área de Conhecimento: Nanomagnetismo com ênfase em skyrmions magnéticos.

1. INTRODUÇÃO

O nanomagnetismo trata de fenômenos magnéticos na escala nano (10^{-9} m), é uma das áreas da física mais próxima dos novos desafios tecnológicos. Nas proporções nanométricas surgem efeitos de tamanho, confinamento e/ou de superfície que podem ser indesejados, como exemplo, nos discos rígidos que ao longo dos últimos anos tornou-se cada vez menor o espaço necessário para gravar um bit de informação, tais efeitos passaram a ser considerados, aumentando o grau de complexidade para implementação tecnológica.

Para diminuir os custos com os experimentos, passou-se a usar simulação computacional para estudar esses efeitos, porém as soluções quânticas das equações do eletromagnetismo necessitam de um custo computacional elevado, adotou-se então a teoria do micromagnetismo desenvolvida entre 1930 e 1940 onde o meio magnético é tratado como contínuo e dividido em tamanhos finitos menores que a amostra abrangendo escalas mesoscópicas e sendo uma aproximação entre a teoria de Maxwell e a teoria quântica².

As soluções das equações serão obtidas por meio do MuMax3, software livre sob licença GPLv3, que é um programa de simulação micromagnética acelerado por GPU. Ele calcula o espaço e a dinâmica da magnetização dependente do tempo na escala mesoscópica utilizando o conceito de discretização da diferença finita⁵.

A primeira observação de skyrmions foi em 2009 e desde então estão sendo intensivamente observados, pois sua configuração de spin lhe conferi uma proteção topológica, que o torna interessante para implementação tecnológica principalmente na eletrônica onde já estão sendo desenvolvidas memórias do tipo racetrack, onde o skyrmion é a entidade que representa um bit. Eles surgem a partir da quebra de simetria de inversão dos momentos magnéticos na interface de multicamadas, e como esses momentos giram para formar-lo determinam o tipo de skyrmion. Existem dois tipos básicos de skyrmion, o do tipo Bloch, em que a anisotropia uniaxial é dominante, e o do tipo Néel, em que há a presença da interação de Dzyaloshinskii-Moriya induzindo quiralidade nos momentos magnéticos¹.

Os skyrmions magnéticos, além de sua proteção topológica, também podem ser manipulados por densidade de corrente^{1, 4} ou gradiente de campo⁶. O objetivo deste trabalho, é estudar a dinâmica desses skyrmions em nanofitas magnéticas, com ou sem defeitos nas mesmas.

2. MATERIAS E MÉTODOS

A dinâmica dos skyrmions nas nanofitas foi obtida pelo MuMax3 que calcula a evolução da magnetização reduzida $\vec{m}(\vec{r}, t)$ ⁵, assim:

$$\frac{\partial \vec{m}}{\partial t} = \vec{\tau} \quad (1)$$

¹Graduando em Física - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

²Doutor em Física - Professor da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (FAFIS/ICE/UNIFESSPA).
Coordenador do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física(MNPEF/UNIFESSPA).

em que $\vec{\tau}$ têm três contribuições:

Landau-Lifshitz torque

$$\vec{\tau}_{LL} = \gamma_{LL} \frac{1}{1+\alpha} \left(\vec{m} \times \vec{B}_{eff} + \alpha \left(\vec{m} \times \left(\vec{m} \times \vec{B}_{eff} \right) \right) \right) \quad (2)$$

onde γ_{LL} é a taxa giromagnética, α é o parâmetro de amortecimento adimensional e \vec{B}_{eff} é o campo efetivo (T). O campo efetivo \vec{B}_{eff} também têm suas contribuições como o campo aplicado externamente \vec{B}_{ext} , o campo magnetostático \vec{B}_{demag} , o campo de troca de Heisenberg \vec{B}_{exch} , o campo de troca de Dzyalonshinskii-Moriya \vec{B}_{dm} , o campo de anisotropia magneto-cristalina \vec{B}_{anis} e o campo termal \vec{B}_{therm} .

Zhang-li Spin-transfer torque

$$\vec{\tau}_{ZL} = \frac{1}{1+\alpha} \left((1+\epsilon\alpha) \vec{m} \times (\vec{m} \times (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{m}) + (\epsilon - \alpha) \vec{m} \times (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{m} \right) \quad (3)$$

$$\vec{u} = \frac{\mu_B \mu_0}{2e \gamma_0 B_{sat} (1+\epsilon^2)} \vec{j} \quad (4)$$

onde \vec{j} é a densidade de corrente, ϵ o nível de não-adiabacidade, μ_B o magneton de Bohr e B_{sat} a magnetização de saturação.

Slonczewski Spin-transfer torque

$$\tau_{SL} = \beta \frac{\epsilon - \alpha \epsilon'}{1+\alpha^2} \left(\vec{m} \times (\vec{m}_p \times \vec{m}) \right) - \beta \frac{\epsilon' - \alpha \epsilon}{1+\alpha^2} \vec{m} \times \vec{m}_p \quad (5)$$

$$\beta = \frac{j_z \hbar}{M_{sat} e d} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{P(\vec{r}, t) \Lambda^2}{(\Lambda^2 + 1) + (\Lambda^2 - 1)(\vec{m} \cdot \vec{m}_p)} \quad (6)$$

onde j_z é a densidade de corrente no eixo z, d é a espessura da camada livre, \vec{m}_p é a magnetização da camada fixa, P é a polarização de spin, Λ caracteriza a camada espaçadora, e ϵ' é o parâmetro de spin-torque secundário.

O skyrmion pode ser caracterizado pelo número de skyrmion³ definido por:

$$n = \frac{1}{4\pi} \int d^2 r \left(\frac{\partial \vec{m}}{\partial x} \times \frac{\partial \vec{m}}{\partial y} \right) \cdot \vec{m} \quad (7)$$

Basicamente, existem dois tipos de Skyrmion, o de Bloch (Figura 1), onde a anisotropia é dominante e o de Néel (Figura 2), onde as interações de Dzyalonshinskii-Moriya orientam os domínios magnéticos.

Figura 1 - Skyrmion do tipo Bloch



Fonte: Fert, (2013).

Figura 2 - Skyrmion do tipo Néel



Fonte: Fert, (2013).

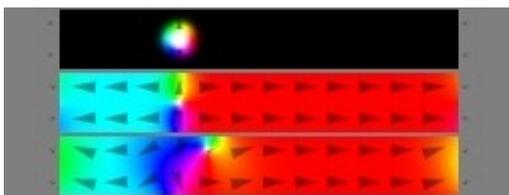
Os parâmetros dos materiais foram magnetização de saturação $M_{sat}=1 \cdot 10^6$, constante de troca $A_{ex}=15 \cdot 10^{-12}$, constante de amortecimento $\alpha=0,25$, constante de Dzyalonskii-Moriya $D_{ind}=0,25 \cdot 10^{-3}$.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Até então, foi realizado simulações preliminares, nas quais foram baseadas na literatura sendo feita algumas modificações, como exemplo, a simulação de um skyrmion numa nanofita⁴ de dimensões (600x90x3) nm, onde é feito algumas análises dos defeitos topológicos (notches) na fita magnética.

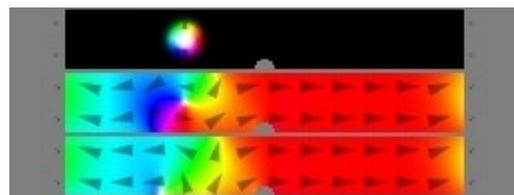
Na Figura 3 têm-se uma nanofita sem defeitos com magnetização inicial de um skyrmion de Néel que em seguida têm magnetização relaxada, logo é então aplicada uma densidade de corrente $\vec{j}=0,5 \cdot 10^{11}$ de polaridade $P=1$. Já na figura 4, temos uma nanofita com um notch circular de raio 30nm localizado em seu centro, a magnetização inicial também é um skyrmion do tipo Néel, e também é relaxada logo em seguida, ao tentar manipular o skyrmion com a mesma intensidade de corrente que na fita sem defeito, temos o skyrmion se aniquilando borda inferior. Em ambas as simulações, foram usados os mesmos parâmetros de materiais, portanto, o defeito já modificou o comportamento do skyrmion em movimento.

Figura 3 - Nanofita sem defeito



Fonte: Autor.

Figura 4 - Nanofita com defeito



Fonte: Autor.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho ainda não está concluído, mas é importante notar, com o que já foi feito até agora, como os notches nas nanofitas influenciam na dinâmica dos skyrmions, pois na Figura 3 a estrutura magnética é aniquilada na borda superior enquanto na Figura 4 com a presença de um notch, ele é aniquilado na borda inferior. É importante destacar que o seu movimento não é retilíneo na fita, e isso é um dos desafios a serem solucionados, e é esperado que seja posicionando outros defeitos na geometria da fita que se chegará a uma solução.

REFERÊNCIAS

1. Fert, Albert, Vincent Cros, and Joao Sampaio. "Skyrmions on the track." *Nature nanotechnology* v. 8, n. 3, p. 152, 2013.

2. Kronmüller, Helmut. "General micromagnetic theory." **Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials**, 2007.
3. Nagaosa, Naoto, and Yoshinori Tokura. "Topological properties and dynamics of magnetic skyrmions." **Nature nanotechnology** v. 8, n. 12, p. 899, 2013.
4. Suess, Dieter, et al. "Spin torque efficiency and analytic error rate estimates of skyrmion racetrack memory." **Scientific reports** v. 9, n. 1, p. 4827, 2019.
5. Vansteenkiste, Arne, et al. "The design and verification of MuMax3." **AIP advances** v. 4, n. 10, p. 107133 2014.
6. Zhang, S. L., et al. "Manipulation of skyrmion motion by magnetic field gradients." **Nature communications** v. 9, n. 1, p. 2115, 2018.