



# Simpósio de Integração Acadêmica

“Bicentenário da Independência: 200 anos de ciência, tecnologia e inovação no Brasil e 96 anos de contribuição da UFV”

SIA UFV 2022



## Correntes de spin em redes não-convencionais

Fillipe M. Guedes,\* Antônio R. Moura †

Departamento de Física, Universidade Federal de Viçosa  
Ciências Exatas e Tecnológicas – Física da Matéria Condensada – Pesquisa

\* fillipe.guedes@ufv.br

† antoniormoura@ufv.br

Palavras-Chave: magnônica, spintrônica, magnetismo

### Introdução

Nos últimos anos, a spintrônica tem atraído muita atenção por se apresentar como alternativa à eletrônica. A corrente de spin é definida como o fluxo líquido de momento angular, podendo se propagar em materiais magnéticos isolantes. Portanto, é possível obter correntes de spin sem a necessidade de correntes de carga, chamada corrente de spin pura. O estudo da propagação de correntes de spin em diversos materiais é extremamente importante, pois contribui para o desenvolvimento de novos dispositivos spintrônicos.

### Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi estudar a propagação de correntes de spin em redes com geometrias não-convencionais, mais especificamente, investigamos o papel da geometria da rede na injeção de spin na interface entre um metal normal (condutor) e um ferromagneto isolante. Estudamos a injeção de spin na interface entre um material condutor e ferromagneto isolante, cuja estrutura é formada por várias camadas empilhadas de rede hexagonal. Consideramos que a injeção da corrente foi feita do meio condutor para o meio magnético (processo no qual é chamado *spin-transfer torque*), por meio de uma diferença de potencial químico entre os elétrons de spin *up* e *down*.

### O Modelo

A junção MN/FMI é descrita pela hamiltoniana  $H = H_0^{(mag)} + H_0^{(e)} + H_{sd}$ .

- O meio ferromagnético é descrito pela hamiltoniana de Heisenberg, no formalismo da segunda quantização. Adotamos a representação linear de Holstein-Primakoff para os operadores de spin. No limite de longos comprimentos de onda, trabalhamos com a hamiltoniana:

$$H_0^{(mag)} = \sum_q \hbar\omega_q b_q^\dagger b_q,$$

sendo  $\hbar\omega_q = 6JS(1 - \gamma_q)$  o espectro de excitação dos mágnons e  $\gamma_q$  o fator de estrutura da rede dado por  $\gamma_q = (1/4)[2 \cos(q_x/2) \cos(\sqrt{3}q_y/2) + \cos(q_x) + \cos(q_z)]$ .

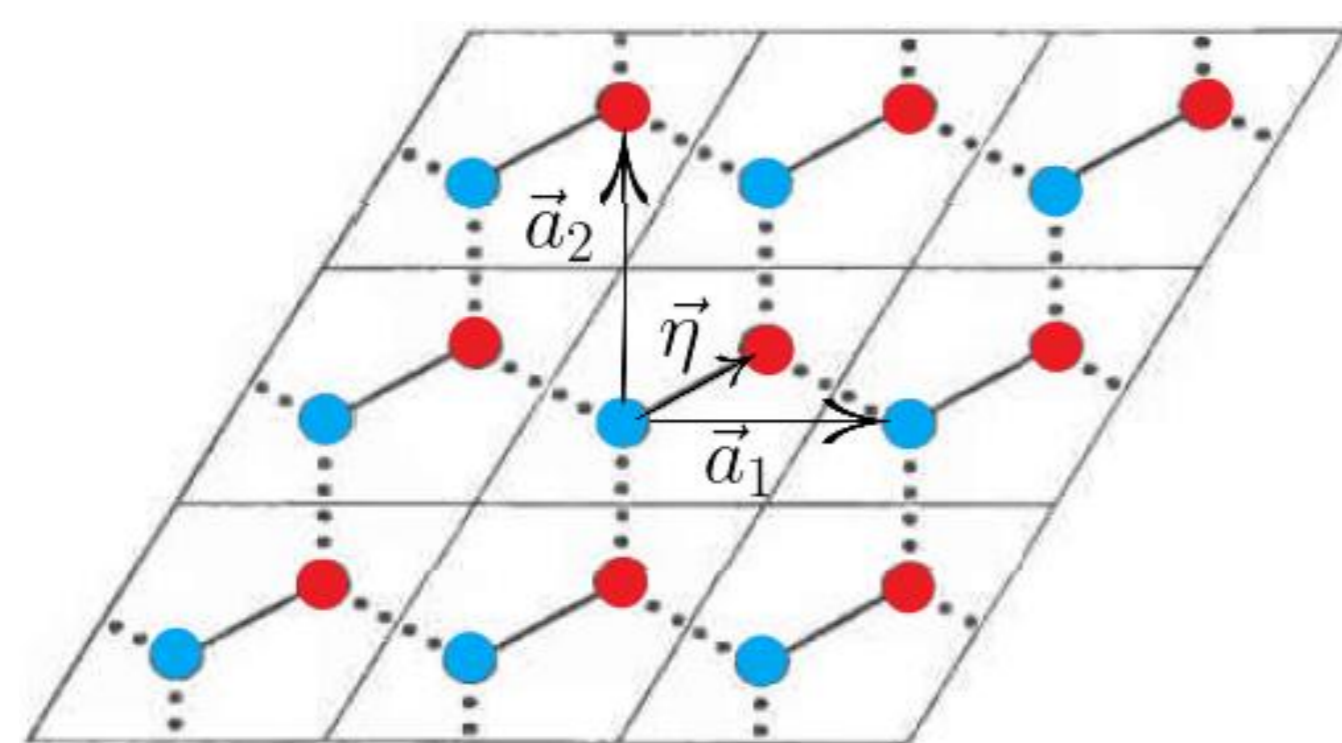


Figura 1: Rede hexagonal desenhada de forma a enfatizar que é uma rede de Bravais com base de dois pontos. Os vetores  $\vec{a}_i$  são os vetores primitivos da rede.

- O meio condutor é descrito pela hamiltoniana de elétrons livres, em termos de operadores fermiônicos de criação e aniquilação:  $H_0^{(e)} = \sum_k (\epsilon_k + \delta\mu) c_{k\sigma}^\dagger c_{k\sigma}$ , onde  $\epsilon_k = \hbar^2 k^2 / 2m$ .
- Na interface, a interação ocorre via acoplamento tipo-*sd*. Essa interação é descrita pela seguinte hamiltoniana no espaço dos momentos:

$$H_{sd} = J_{eff} \sum_{kk'q} (S_q^- c_{k\uparrow}^\dagger c_{k'\downarrow} + S_q^+ c_{k'\downarrow} c_{k\uparrow}^\dagger),$$

sendo  $J_{eff}$  uma constante de troca efetiva.

### Apoio Financeiro



### Resultados e Discussão

Por meio do formalismo de interação e utilizando a teoria de resposta linear, obtemos o valor esperado do operador corrente de spin na interface:

$$\langle J_s(t) \rangle = 2J_{eff}^2 \Im[U_{ret}(\delta\mu)],$$

onde  $\delta\mu$  é a diferença de potencial e  $U_{ret}(\delta\mu)$  a transformada de Fourier da função de Green retardada. Sua função de Green de Matsubara equivalente  $\mathcal{U}(\tau)$  é o produto dos propagadores do mágnon e dos elétrons. Tomamos a transformada de Fourier da função  $\mathcal{U}(\tau)$  e obtemos a função de Green de Matsubara no espaço das frequências bosônicas  $\mathcal{U}(i\Omega_l)$ . Em seguida, realizamos as somas de Matsubara e retornamos à uma expressão para  $\Im[U_{ret}(\delta\mu)]$ , por meio da continuação analítica  $i\Omega_l \rightarrow \delta\mu + i\epsilon$ .

Após os processos descritos acima, obtivemos o seguinte resultado:

$$\langle J_s \rangle = \frac{1}{(2\pi^3)} J_0 \int_{BZ} d^3q \left( \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega_q} e^{\beta\delta\mu} - 1} - \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega_q} - 1} \right) (\hbar\omega_q + \delta\mu).$$

É possível observar, pela expressão anterior, que a corrente de spin é nula se não existir diferença de potencial químico entre os elétrons de spin *up* e *down*. Isso acontece porque, nesse caso, não há reflexão efetiva de elétrons polarizados na interface.

O comportamento da corrente de spin em termos do potencial químico e da temperatura é mostrado abaixo.

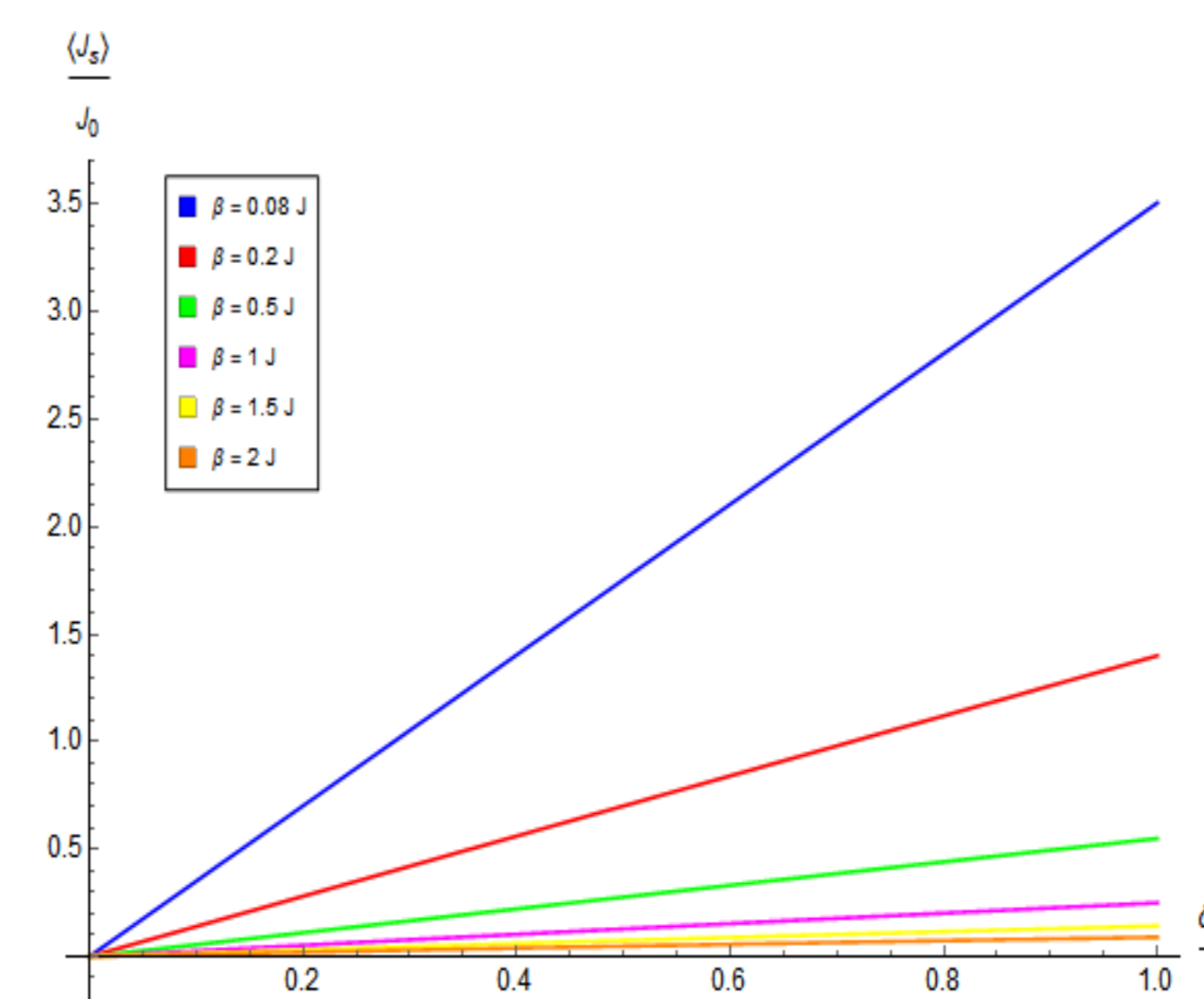


Figura 2: Comportamento de  $\langle J_s \rangle$  em função da diferença de potencial químico  $\delta\mu$ .

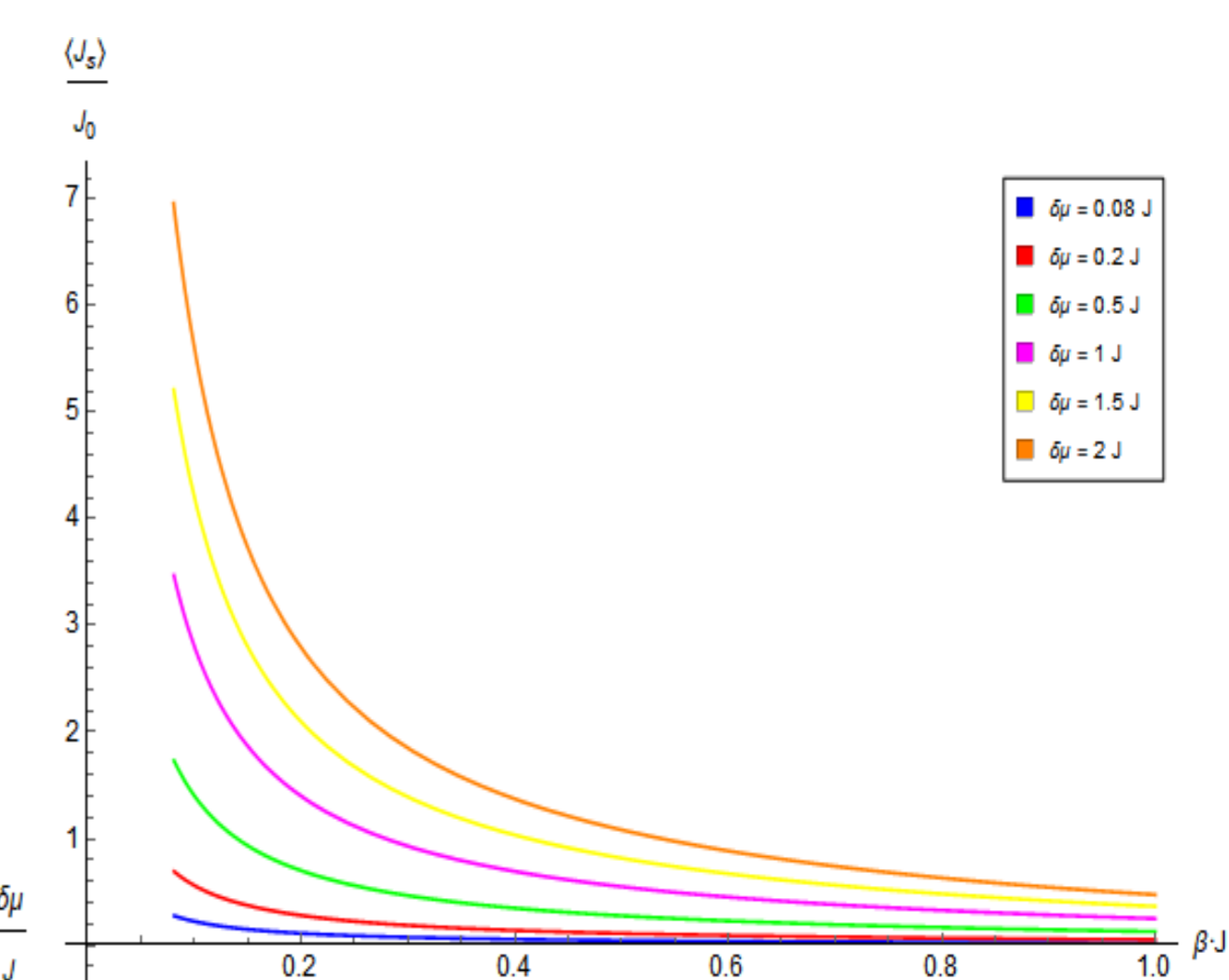


Figura 3: Comportamento de  $\langle J_s \rangle$  em função de  $\beta = T^{-1}$ .

Podemos observar na Figura (2) que a corrente de spin cresce conforme o aumento da diferença de potencial químico no sistema e possui valores maiores quando  $\beta \rightarrow 0$ , pois grandes flutuações térmicas facilitam as excitações de mágnons na rede. O comportamento qualitativo é bem semelhante ao caso da rede cúbica. Na Figura (3) é possível ver que a corrente diminui rapidamente conforme  $\beta \rightarrow 1$ . Também vemos que, quanto maior for a diferença de potencial químico, maior será a corrente, como já observado na Figura (2).

### Conclusões

Observamos que a corrente de spin é proporcional ao acúmulo de spin, devido à diferença de potencial químico. Portanto, a diferença de potencial químico faz um papel de voltagem de spin, gerando mágnons no ferromagneto isolante.

Embora o comportamento da corrente de spin seja qualitativamente semelhante ao caso da rede cúbica, a magnitude da corrente é menor. Dessa forma, verificamos que a rede hexagonal é menos eficiente no transporte de corrente de spin.

Além do caso estudado neste trabalho, podemos analisar a propagação de correntes de spin em redes com geometria triangular. Outra proposta em aberto é fazer o estudo da injeção de corrente na junção entre um condutor e um antiferromagneto isolante, com geometrias não-convencionais.

### Bibliografia

- Takahashi, S., Saitoh, E., and Maekawa, S.; Spin current through a normal-metal/insulating-ferromagnet junction. *Journal of Physics: Conference Series*, 200(6), 062030, 2010.
- Mahan, Gerald D.; *Many-particle physics 2nd ed.* Plenum Press; New York, New York, United States; 1990.