

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CAMPUS DE NATAL**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**JOÃO MATHEUS FONSÊCA DOS SANTOS OLIVEIRA**

**EFEITO DE INTERAÇÃO DIPOLAR EM NANOESTRUTURAS  
FERROMAGNÉTICAS RETANGULARES**

**NATAL/RN**

**2022**

JOÃO MATHEUS FONSÊCA DOS SANTOS OLIVEIRA

EFEITO DE INTERAÇÃO DIPOLAR EM NANOESTRUTURAS  
FERROMAGNÉTICAS RETANGULARES

Monografia apresentada ao Departamento de  
Ciência e Tecnologia como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Ciência e  
Tecnologia.

Orientador(a): Profa. Ana Lúcia Dantas

NATAL/RN  
2022

**Catálogo da Publicação na Fonte.**  
**Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

F676e Fonsêca, João Matheus  
EFEITO DE INTERAÇÃO DIPOLAR EM  
NANOESTRUTURAS FERROMAGNÉTICAS  
RETANGULARES. / João Matheus Fonsêca. -  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2022.  
34p.

Orientador(a): Profa. Dra. Ana Lúcia Dantas.  
Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia).  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

1. Ciência e Tecnologia. I. Dantas, Ana Lúcia. II.  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. III.  
Título.

JOÃO MATHEUS FONSÊCA DOS SANTOS OLIVEIRA

**EFEITO DE INTERAÇÃO DIPOLAR EM NANOESTRUTURAS  
FERROMAGNÉTICAS RETANGULARES**

Monografia apresentada ao Departamento de  
Ciência e Tecnologia como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Ciência e  
Tecnologia.

Aprovado(a) em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Lúcia Dantas (Orientadora)

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andréa Jane da Silva

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

---

Prof. Dr. Leonardo Linhares Oliveira

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN

## **AGRADECIMENTOS**

Em momento inicial, agradeço à minha orientadora Profa. Ana Dantas, pelo seu papel fundamental na realização deste trabalho e pela confiança depositada em mim. Sua motivação e dedicação pelo que faz me encorajam a crescer e alcançar meus objetivos.

Agradeço também à professora Andréa Jane pela orientação durante todo o processo de construção dessa monografia.

À UERN – Campus Natal e todo seu corpo docente, em especial, ao departamento de Ciência e Tecnologia, que é composto por professores comprometidos com o ensino e desempenham seus papéis com excelência.

À minha família, em especial, aos meus pais Henrique e Maria da Conceição, que são meus exemplos de vida.

Agradeço a Deus, que é meu refúgio nos dias mais difíceis e que está sempre me guiando da melhor forma, para o caminho certo.

A todos, que contribuíram para a realização deste trabalho, de forma direta ou indiretamente.

## RESUMO

Baseados na spintrônica, a evolução do nanomagnetismo tem sido constante, e tem promovido o desenvolvimento de novos dispositivos de gravação magnética e comunicação. Com isso, é notório o aumento considerável da densidade de conteúdo armazenados em HDs e o tráfego de informações a partir de nano-antenas. As eficiências dos dispositivos estão intimamente ligadas às fases magnéticas dos nanoelementos que compõem esses dispositivos. Os vórtices magnéticos, por exemplo, aparecem como favoritos na busca por nano-antenas cada vez mais eficientes. A sincronização de vórtices magnéticos pode estreitar a largura de linha e aumentar a potência emitida. Nesse trabalho apresentamos o estudo da formação de vórtices magnéticos, em remanência, acoplados por interação dipolar. Consideramos um par de nanoelementos com geometria retangular de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) ou Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) separados por um espaçador não-magnético. Nossos resultados mostram que o nanoelemento de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) isolado, não forma vórtice. Todavia, em um par de nanoelementos de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), com um espaçador não-magnético de espessura menor ou igual a 35 nm, forma-se um par de vórtices magnéticos. No caso do nanoelemento de Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) o vórtice sempre se forma, seja isolado ou aos pares.

**Palavra-chave:** Spintrônica, Nanomagnetismo, Gravação magnética, Vórtices magnéticos.

## ABSTRACT

Based on spintronics, the evolution of nanomagnetism has been constant and has promoted the development of high density magnetic storage; and communication efficient devices. The device's efficiency depends on the magnetic phases of the nanoelements that make up these devices. Magnetic vortices, for example, appear as favorites in the search for increasingly efficient nano-antennas. Since the magnetic vortices synchronization can narrow the line-width and increase the emitted power. In this work, we present the study of the formation of magnetic vortices in remanence coupled with dipolar interaction. We consider a pair of nanoelements of Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) or Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) separated by a non-magnetic spacer, with rectangular geometry. Our results show that the Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) nanoelement alone does not form a vortex. However, a pair of nanoelements of Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), with a non-magnetic spacer of thickness less than or equal to 35 nm, nucleates a magnetic vortex pair. On the other hand, the Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm), isolated or in pairs, always form magnetic vortices.

**Keywords:** Spintronics, Nanomagnetism, magnetic recording, magnetic vortices.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2. ELEMENTOS FERROMAGNÉTICOS E FORMAÇÃO DE VÓRTICES</b>	<b>12</b>
2.1. HISTERESE DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS	13
2.2. NANOMAGNETISMO	18
2.3. ENERGIAS MAGNÉTICAS	20
2.3.1. ENERGIA DE TROCA	20
2.3.2. ENERGIA DE ANISOTROPIA UNIAXIAL	20
2.3.3. ENERGIA DIPOLAR	21
2.3.4. ENERGIA DE ZEEMAN	21
2.3.5. CAMPO EFETIVO	22
<b>3. ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE A FORMAÇÃO DE VÓRTICES FERROMAGNÉTICOS</b>	<b>23</b>
3.1. FORMAÇÃO DE VÓRTICES FERROMAGNÉTICOS	23
<b>4. CONCLUSÕES</b>	<b>32</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b>	<b>33</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O surgimento da nanotecnologia revolucionou o universo da pesquisa científica de forma muito abrangente. Os benefícios vão desde as pesquisas acadêmicas até as aplicações tecnológicas. Isso em razão da viabilização do crescimento de materiais, bem como da caracterização de amostras, com dimensões nanométricas ( $10^{-9}$  m). Como consequência, esse campo, que floresceu entre as décadas de 60 e 80, aumentou nas últimas duas décadas com um mercado global em expansão cujo valor ultrapassará 125 bilhões de dólares nos próximos cinco anos, de acordo com o relatório do Mercado Global de Nanotecnologia da Research&Markets, que apresenta previsões para 2024 (GLOVER, 2018).

Nesse contexto, o nanomagnetismo tem se beneficiado tanto do ponto de vista de pesquisa básica, como do ponto de vista de aplicações tecnológicas.

A investigação científica em nanomagnetismo deu origem a uma nova área de pesquisa conhecida como spintrônica. Enquanto a eletrônica se baseia, exclusivamente, na carga do elétron, a spintrônica se baseia, também, no spin do elétron. Essa tecnologia revolucionou a indústria dos dispositivos eletrônicos, que permitiram o aumento da densidade de gravação magnética, o desenvolvimento de novos dispositivos como emissores em micro-ondas e altas frequências, nanoantenas etc. (ZEGEYE, 2019 e HIROHAT, 2020).

Além disso, novo fenômeno tem despertado especial interesse, em nanomagnetismo, é o torque por transferência de spin (STT). O STT refere-se à manipulação do momento magnético de um material ferromagnético sem aplicar nenhum campo magnético, mas apenas transferindo o momento angular de spin por uma corrente polarizada de spin.

O conceito foi introduzido teoricamente por Slonczewski (SLONCZEWSKI, 1996) e Berger (BERGER, 1996), de formas independentes. A injeção de uma corrente polarizada de spin em um material ferromagnético leva à transferência do componente transversal da corrente de spin, o que cria um torque atuando na magnetização do material ferromagnético. Esse torque de transferência de spin pode ser usado para reverter ou excitar a magnetização, dependendo da intensidade da corrente polarizada de spin.

No caso de excitações da magnetização por corrente polarizada de spin, sensores de magnetorresistência gigante podem ser usados para converter as oscilações da magnetização em uma tensão oscilante na faixa de frequência de micro-ondas, levando ao conceito de nano-oscilador de torque de transferência de spin e que abre um novo cenário para nano-antenas.

As primeiras investigações experimentais de transferência de spin foram realizadas em elementos magnetizados uniformemente. Todavia, o uso de configurações que exibem um padrão de circulação da magnetização no plano, com um núcleo fora do plano, identificados como vórtices magnéticos (SHINJO, 2000), abriu perspectivas interessantes. Em particular, permitiu aumentar consideravelmente a emissão de energia e diminuir a largura de linha dos nano-osciladores de transferência de spin (DUSSAX, 2010).

O que tem sido observado é que o êxito de nanodispositivos magnéticos, sempre está associado às suas fases magnéticas. E está coerente com o fato de que a energia de interação dipolar é parte fundamental da energia total de sistemas magnéticos com dimensões nanométricas. O que implica que a forma geométrica dos nanoelementos magnéticos é primordial para o “design” de nanodispositivos magnéticos.

Entretanto, a grande vantagem dos nano-osciladores por transferência de spin é que eles são ajustáveis em uma ampla faixa de frequência, variando a intensidade da corrente contínua aplicada ou do campo magnético. Sua desvantagem é a baixa potência de micro-ondas de um nano-oscilador individual.

Até o momento, as excitações de vórtices magnéticos encabeçam a corrida no caminho das aplicações práticas, à medida que possuem largura de linha estreita (DUSSAX, 2010 e KAKA, 2005). Além disso, resultados experimentais mostram que a sincronização de vórtices aumenta a potência emitida (KAKA, 2005).

Assim, os tipos de sistemas magnéticos mais promissores para alcançar o desafio tecnológico de nanoantenas são sistemas que exibam vórtices e de preferência que possam ser sincronizados, para garantir a emissão em frequência bem definida e alta potência.

Há, portanto, grande expectativa no controle de sistemas nanoestruturados de materiais ferromagnéticos para o desenho de nano-antenas de micro-ondas. Dois fatores justificam o interesse atual: o espectro de excitações magnéticas de materiais

ferromagnéticos que é na banda de micro-ondas (GHz), e a possibilidade de manter precessão da magnetização por corrente polarizada constante.

Atualmente, o grande desafio é o desenho de nano-osciladores por transferência de spins com alta potência de emissão e estreita largura de linha. É importante dizer que os nano-osciladores ferromagnéticos têm grande chance de se tornar alternativas novas para dispositivos como radares e celulares.

Portanto, considerando o potencial tecnológico dos vórtices magnéticos para o design de nano-osciladores, também conhecidos como nanoantenas, faremos o estudo da nucleação de vórtices em nanoelementos ferromagnéticos acoplados. Nesse contexto, nosso estudo busca identificar circunstâncias em que há a estabilização de vórtices magnéticos acoplados.

As fases magnéticas de sistemas nanoestruturados são fortemente correlacionadas com a geometria dos nanoelementos envolvidos. Nesse contexto, limitaremos nosso estudo à geometria retangular. Serão avaliadas as fases magnéticas como função de um campo magnético externo aplicado, bem como a forma da histerese magnética como função dos parâmetros geométricos e os materiais magnéticos envolvidos.

Nosso principal objetivo é identificar nanoestruturas de dois nanoelementos ferromagnéticos, separados por um espaçador não magnético, que apresentem a formação de pelo menos um vórtice em cada nanoelemento, na ausência de um campo magnético externo.

Dado o exposto, a pesquisa foi desenvolvida de forma explicativa e experimental. Dessa forma, analisamos as curvas de histerese magnética de pares de nanoelementos ferromagnéticos (Fe ou Py) retangulares, identificamos o campo de nucleação de vórtices magnéticos em pares de nanoelementos ferromagnéticos, definimos parâmetros geométricos ( $L_x, L_y, t$  e  $\delta$ ) que permitem a formação de vórtices magnéticos em pares, interpretamos a intensidade da interação dipolar a partir dos parâmetros geométricos.

Contudo, nosso estudo contempla a descrição das fases magnéticas de nanoestruturas ferromagnéticas retangulares. Em particular, iremos investigar os efeitos de interação dipolar entre dois nanoelementos ferromagnéticos retangulares, um sobre o outro, separados por um material não-magnético. A modelagem teórica é baseada na teoria micromagnética, o cálculo numérico é feito na linguagem Fortran e

os gráficos são feitos no software Origin 9.0. À vista disso, a partir dos nossos resultados, construiremos diagramas de fase magnéticas, como função dos parâmetros geométricos para cada material de ferro e permalói.

Logo, o presente trabalho está dividido em quatro partes: a primeira parte é a introdução, que está constituída pela problemática, justificativa, objetivo (geral e específicos) e a metodologia sobre o estudo de interação dipolar em nanoestruturas ferromagnéticas retangulares. Na segunda parte, temos o referencial teórico, que consiste em apresentar as propriedades fundamentais que irão ser importantes e utilizadas como fonte para o estudo em nanoestruturas. Na terceira parte, apresentamos os aspectos construídos e as análises dos resultados obtidos por meio de testes computacionais. Em suma, na quarta parte, apresentamos a conclusão dos resultados que foram atingidos.

## 2. ELEMENTOS FERROMAGNÉTICOS E FORMAÇÃO DE VÓRTICES

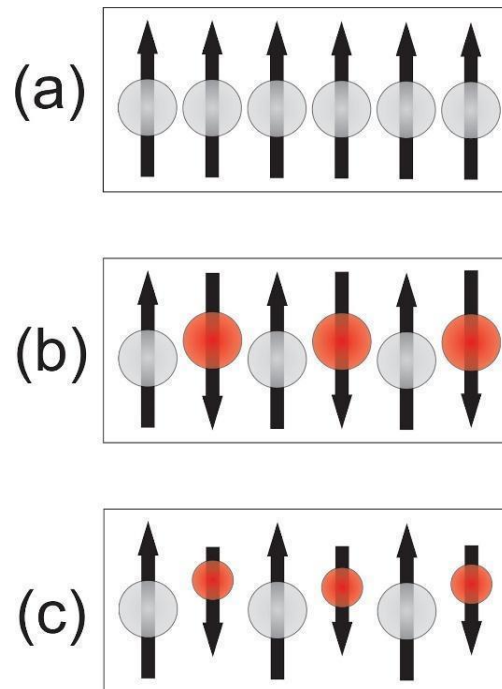
Os materiais magnéticos são classificados segundo a sua ordem magnética. Nesse contexto, podem ser ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos. A ordem magnética é garantida a partir da energia de interação entre os momentos magnéticos de átomos vizinhos.

Nos materiais ferromagnéticos a energia de interação entre os momentos magnéticos de átomos vizinhos é tal que favorece um ordenamento paralelo entre os momentos magnéticos de átomos vizinhos, conforme Fig.1(a).

Nesse caso, os materiais ferromagnéticos possuem um momento magnético espontâneo, isto é, um momento magnético que existe mesmo na ausência de campo magnético aplicado. Esse fato pode ser compreendido se imaginarmos uma interação entre os momentos magnéticos cuja tendência natural seja alinhá-los em uma direção específica.

Como pode ser visto da Figura 1(b), os materiais antiferromagnéticos são caracterizados por terem momentos magnéticos de mesmo módulo. Todavia, a energia de interação entre os momentos magnéticos de átomos vizinhos favorece um ordenamento antiparalelo entre os momentos magnéticos vizinhos. Nesse caso, há uma total compensação dos momentos magnéticos e, portanto, na ausência de um campo magnético externo a magnetização de um material antiferromagnético, é nula.

Figura 1: Ordenamento magnético: (a) materiais ferromagnéticos; (b) materiais antiferromagnéticos; e (c) materiais ferrimagnéticos.



Fonte: Autor (2022)

Por outro lado, como mostrado na Figura 1(c), embora os momentos magnéticos dos materiais ferrimagnéticos também se organizem antiparalelos entre si, o módulo dos momentos magnéticos é diferente e, portanto, não há a compensação dos momentos magnéticos, podendo exibir uma magnetização efetiva diferente de zero, na ausência de um campo magnético externo.

Neste trabalho, nos concentramos em materiais ferromagnéticos.

## 2.1. HISTERESE DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS

Além da ordem magnética, os materiais magnéticos podem ser caracterizados a partir de outras propriedades. Como por exemplo, magnetização como função do campo magnético, magnetização como função da temperatura, susceptibilidade magnética etc.

No contexto da magnetização como função do campo magnético externo, os materiais magnéticos, em geral, apresentam o que chamamos de histerese magnética. A histerese magnética é caracterizada pelo fato de que a magnetização apresenta um

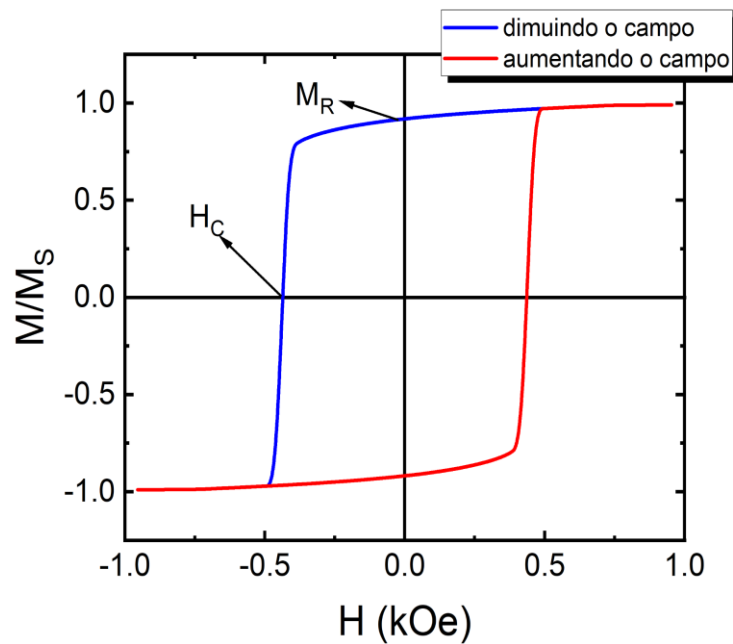
atraso em relação ao campo magnético. Na Figura 2, apresentamos uma histerese típica de materiais ferromagnéticos. Em particular consideramos uma amostra de ferro (Fe) macroscópica, onde os efeitos dipolares não são relevantes. Nesse caso, para um campo magnético externo de 1,0 kOe os momentos magnéticos se alinham na direção do campo e a magnetização é saturada (curva azul). No processo de remoção do campo magnético, para  $H=0$ , a amostra exibe uma magnetização remanescente ( $M_R$ ). Como pode ser visto, existe um atraso na resposta da magnetização, já que se espera que na ausência de campo aplicado a magnetização seja nula. Assim, para o processo de desmagnetização é aplicado um campo magnético no sentido contrário a magnetização remanescente. Nesse caso, a magnetização só é zero para a uma certa intensidade de campo que chamamos de campo coercivo ( $H_C$ ), no caso do Fe  $H_C=0,55$  kOe, que mede essencialmente o campo de anisotropia do material.

Assim, com o aumento da intensidade do campo magnético aplicado a magnetização satura novamente, no sentido oposto ( $-M_S$ ). A Figura 2 mostra que no ciclo fechado do campo magnético que vai de 1,0 kOe até -1,0 kOe (curva azul) e, depois, volta de  $H=-1,0$  kOe para 1,0 kOe (curva vermelha) a magnetização vai e volta por caminhos diferentes. A largura entre essas curvas é o que chamamos de histerese magnética. Como pode ser visto, ao longo da histerese, a magnetização se apresenta, praticamente, entre os dois estados de saturação ( $M/M_S$  e  $-M/M_S$ ).

Para materiais magnéticos com dimensões nanométricas, as curvas da histerese de materiais ferromagnéticos podem ser completamente diferentes do que se apresenta na figura 2.

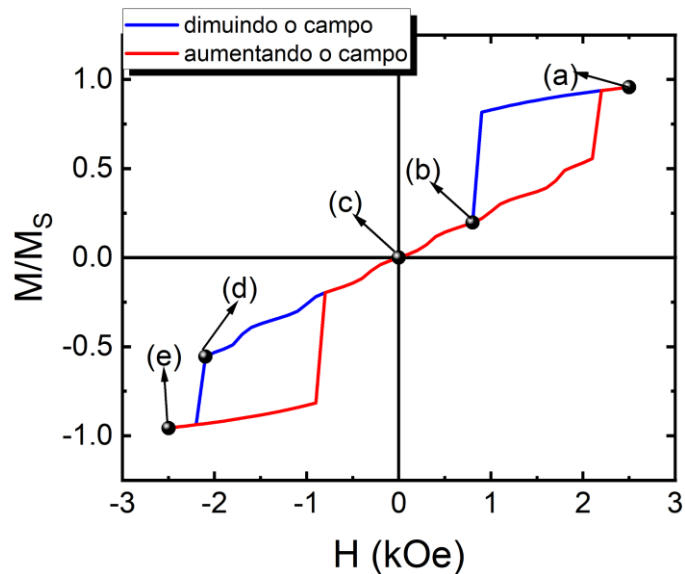
A exemplo disso, a Figura 3 mostra as curvas de histerese de um nanoelemento retangular de Fe com dimensões de 50 nm x 50 nm x 20nm. Nesse caso, a histerese se apresenta em laço duplo e não há magnetização remanescente para  $H=0$ . À vista disso, selecionamos alguns pontos na figura 3 para compreendermos a razão dessas diferenças. Essencialmente, as diferenças aparecem devido a relevância da energia de interação dipolar, que em estruturas macroscópicas são pouco relevantes.

Figura 2: Histerese típica de materiais ferromagnéticos.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3: Histerese de um nanoelemento retangular de Fe com dimensões de 50 nm x 50 nm x 20nm. Os pontos seleccionados correspondem aos seguintes valores de campo magnético aplicado: (a)  $H= 2.5$  kOe; (b)  $H=0.8$  kOe; (c)  $H=0.0$ ; (d)  $H=-2.1$  kOe; e (e)  $H= -2.5$  kOe.



Fonte: Autor (2022)

A presença da energia de interação dipolar dá origem à novas fases magnéticas, que são evidenciadas ao longo das curvas de magnetização *versus* campo magnético.

A figura 4, apresenta as respectivas fases magnéticas correspondentes aos pontos seleccionados na figura 3. Como pode ser visto, a figura 4(a), para  $H=2.5$  kOe,

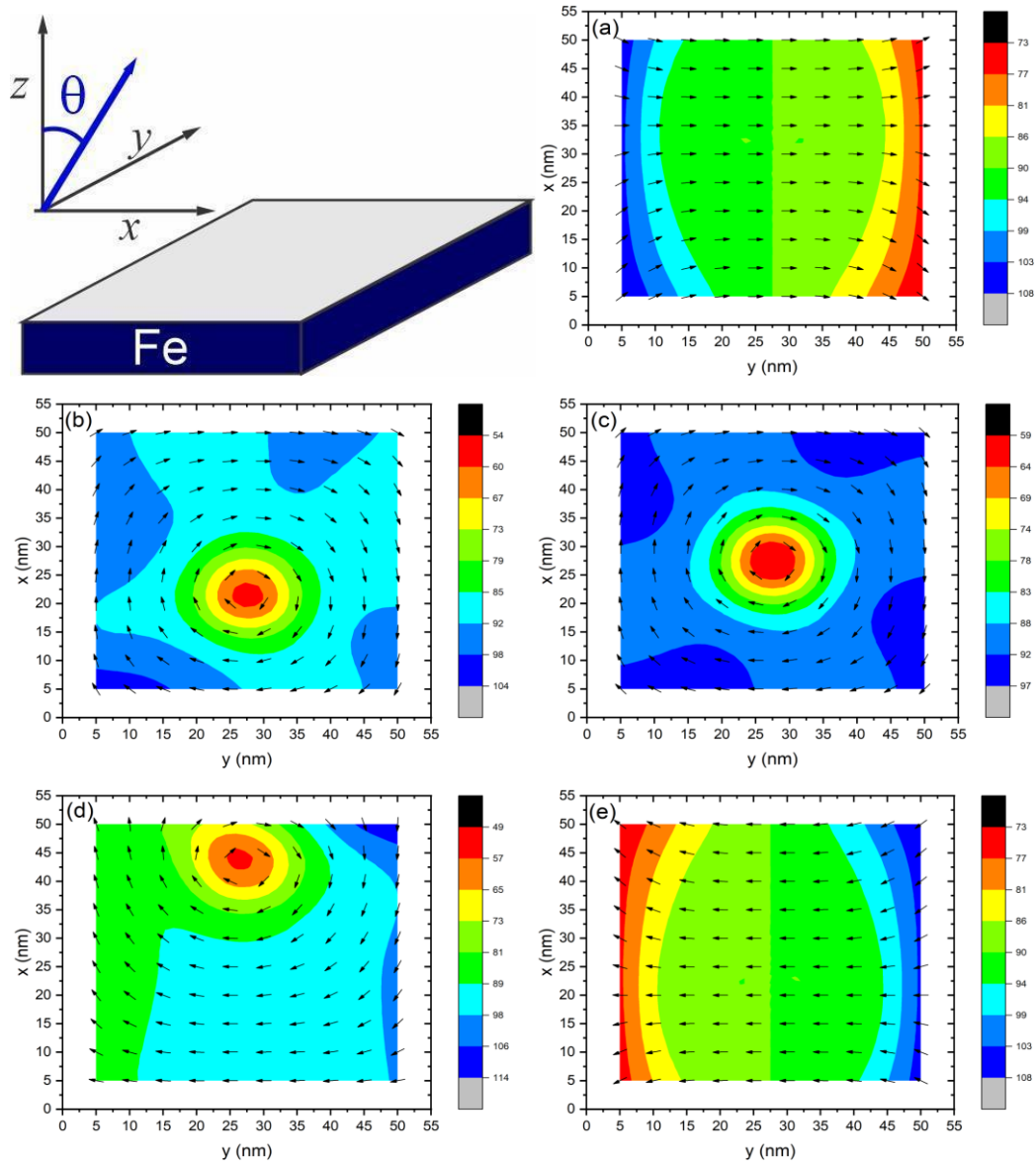


apresenta uma fase em que os momentos magnéticos, representados pelas setas pretas, estão praticamente alinhados com o campo magnético externo, isto é, a fase magnética é praticamente uniforme ou saturada com o campo magnético. Os momentos magnéticos apresentam uma pequena componente que sai do plano da amostra. Como podemos observar, em nanoelementos onde a energia de interação dipolar é relevante, a saturação na direção do campo magnético torna-se muito mais difícil e, nesse caso, mesmo para campo de 2.5 kOe, a amostra não é saturada.

No processo de diminuição na intensidade do campo, a curva de magnetização (curva azul) mostra uma transição de fase para  $H=0.8$  kOe. A figura 4(b) mostra o surgimento de um vórtice magnético. Nesse caso, devido à energia Zeeman associada ao campo aplicado o vórtice está deslocado do centro, favorecendo uma região onde os domínios estão orientados com o campo magnético externo. Contudo, no estado de remanência quando o campo magnético é totalmente removido o vórtice se desloca para o centro, como mostra a figura 4(c). O vórtice é caracterizado pela circulação da magnetização em torno do centro. Sendo assim, esse sistema não apresenta magnetização remanescente. Invertendo o sentido do campo aplicado, o vórtice se desloca do centro, figura 4(d) para  $H=-2.1$  kOe, dando origem a uma região orientada com o campo aplicado. Aumentando ainda mais a intensidade do campo aplicado na direção de  $-x$ , a amostra é praticamente saturada na direção do campo aplicado, como mostra a figura 4(e).

Assim, podemos concluir que as dimensões nanométricas dão origem a uma grande variedade de fases magnéticas. Essa diversidade de fases magnéticas ampliou significativamente o potencial tecnológico desses sistemas, consolidando a linha de pesquisa em nanomagnetismo.

Figura 4: Esquema do nanoelemento de Fe(50 nm, 50 nm, 20 nm), correspondente a histerese da figura 3. Fases magnéticas correspondentes aos pontos seleccionados na figura 3: (a)  $H= 2.5$  kOe; (b)  $H=0.8$  kOe; (c)  $H=0.0$ ; (d)  $H=-2.1$  kOe; e (e)  $H= -2.5$  kOe. As barras de cores mostram o ângulo  $\theta$  com o eixo z.



Fonte: Autor (2022)

## 2.2. NANOMAGNETISMO

O nanomagnetismo é a extensão de pesquisa em Física que trata das propriedades magnéticas dos objetos na escala nanoscópica e mesoscópica. Entretanto, uma das aplicações mais bem sucedida do nanomagnetismo tem sido a gravação magnética, o que levou esta tecnologia a uma evolução vertiginosa nas últimas cinco décadas. Possibilitou o aumento da densidade dos circuitos de chips utilizados em aparelhos eletrônicos e aumento da densidade de gravação magnética nos discos rígidos.

Essa evolução da gravação magnética se deu, principalmente, devido à descoberta de um efeito muito importante na área do magnetismo e nanomagnetismo, que foi o de magnetoresistência gigante (GMR) (BAIBICH et al., 1988). Esse efeito permitiu que a corrente polarizada de spin fosse gerada e que também fosse detectada, por meio de um dispositivo que ficou conhecido como válvula de spin (DIENY, B. et al, 1991). Nesse dispositivo há uma sobreposição de materiais ferromagnéticos e antiferromagnéticos que, como consequência da orientação da magnetização desses materiais, promove uma enorme variação na resistência elétrica diante da ação de um campo magnético. Se os materiais ferromagnéticos estão paralelos, a resistência é baixa, se eles se encontram antiparalelos, a resistência é alta. Devido à evolução, em dispositivos de memória e leituras magnéticas, causada pela descoberta do efeito de GMR, é que foi propiciada a abertura de um novo campo, denominado Spintrônica, ou eletrônica do spin.

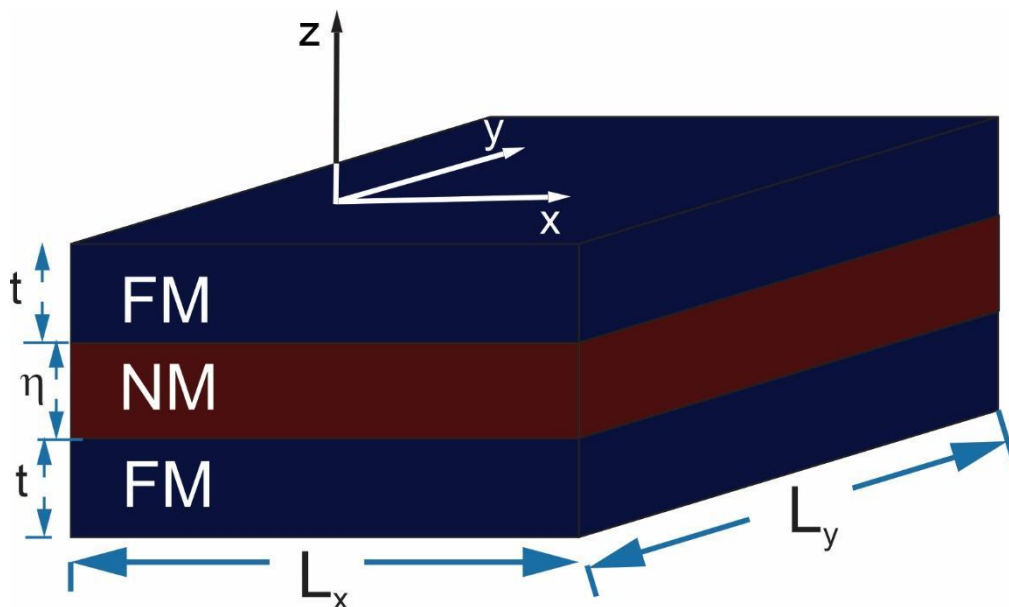
Contudo, segundo Zutic (2004), a Spintrônica é a eletrônica que se fundamenta no spin do elétron. Os estudos nesse campo são impulsionados pelas aplicações que estão ligadas ao controle do transporte de spin, e como exemplo, temos o controle de correntes de spin polarizadas. Nesse tipo de corrente, diferentemente da corrente elétrica convencional, os elétrons possuem a maioria dos spins com orientação “up” ou “down”. Na corrente de spin polarizada, a informação é transportada por meio do spin do elétron. Esse efeito de corrente de spin polarizada é base para entendimento da Spintrônica.

Diante do exposto, essa área é de grande importância para o desenvolvimento de memórias magnéticas mais eficientes, tendo em vista que as tecnologias que utilizam a corrente elétrica convencional estão chegando a um limite magnético fundamental, que é dito como superparamagnetismo, e se define como um limite para a

miniaturização de um sistema magnético (KNOBEL, 2000). Um exemplo disso são os processadores, que contém em sua estrutura bilhões de transistores em um único chip, além desse fenômeno ainda existe também o problema de dissipação de calor, que inviabiliza mais ainda o aumento da quantidade de transistores que cabem em um processador. Dessa forma, os estudos na área de spintrônica se tornaram fundamentais e direcionados a suprir a necessidade de aumento de memória e capacidade de processamento. Além disso, a possibilidade de excitações dos momentos magnéticos por corrente polarizada de spin ampliou as possibilidades de novos dispositivos spintrônicos, como por exemplo, os nano-osciladores ou nano-antenas.

Nesse contexto, resultados recentes (DUSSAUX, 2010) indicam que os vórtices magnéticos sincronizados são os sistemas mais promissores, por emitirem em maior potência e largura de linha mais estreitas. Portanto, apresentaremos um estudo sobre a estabilização de vórtices em nanoelementos ferromagnéticos (FM)  $\text{Py}^{\text{TM}}$  ou  $\text{Fe}$  retangulares acoplados por interação dipolar via um espaçador não magnético (NM), na ausência de campo aplicado, conforme esquema na figura 5.

Figura 5: Esquema de dois nanoelementos ferromagnéticos (FM) separados por um material não-magnético (NM), com dimensões  $(L_x, L_y, t, \eta)$ .



Fonte: Autor (2022)

## 2.3. ENERGIAS MAGNÉTICAS

As energias magnéticas são responsáveis por estabelecer uma configuração favorável ao estado da mais baixa energia do sistema e a descrição delas auxilia para entender a configuração de equilíbrio do nanoelemento magnético. Para a descrição da configuração de equilíbrio de um nanoelemento ferromagnético, consideraremos as seguintes magnéticas: energia de troca, energia de anisotropia, energia de interação dipolar e energia de Zeeman. Além disso, faremos uso da teoria micromagnética, que consiste em descrevermos os materiais a partir do conceito de unidades básicas constituídas de células cúbicas de volume  $\delta^3$ .

### 2.3.1. Energia de Troca

É de extrema importância entender que a energia de troca é caracterizada pela relação entre os estados magnéticos de primeiros vizinhos de cada célula. É uma relação forte e de curto alcance. Contudo, a densidade da energia de troca é dada por:

$$\frac{E_{troca}}{\delta^3} = \frac{A}{\delta^2} \sum_{ij} (1 - \hat{m}_i \cdot \hat{m}_j) \quad (1)$$

Tendo em vista a energia de troca acima, os índices  $i$  e  $j$  representam respectivamente a  $i$ -ésima célula de simulação e  $j$  suas células primeiras vizinhas.

### 2.3.2. Energia de Anisotropia Uniaxial

Entretanto, a energia de anisotropia está relacionada a um favorecimento na orientação dos momentos magnéticos em um determinado material magnético, ou seja, os momentos magnéticos tendem a se orientar em uma direção preferencial. Em uma célula de simulação, a energia de anisotropia pode ser calculada, no eixo  $x$ , por:

$$\frac{E_{anis}}{\delta^3} = -K \sum_i (\hat{m}_{i2})^2 \quad (2)$$

### 2.3.3. Energia Dipolar

Agora, tratando-se de uma outra energia não menos importante, temos a energia dipolar, que é um tipo de interação que acontece entre os dipolos magnéticos. Assim sendo, é uma interação que é dita de longo alcance e dentre as outras energias é a que envolve mais complexidade na hora dos cálculos. Ademais, essa energia representa o alinhamento de um dipolo com o campo magnético total produzido por todos os dipolos vizinhos (JUNIOR, 2019). A energia dipolar referente a interação entre dois dipolos magnéticos é dada por:

$$\frac{E_{dip}}{\delta^3} = \frac{M_s^2}{2} \sum_i \sum_k \left( \frac{\hat{m}_i \cdot \hat{m}_k}{n_{ik}^3} - \frac{3(\hat{m}_i \cdot \vec{n}_{ik})(\hat{m}_k \cdot \vec{n}_{ik})}{n_{ik}^5} \right). \quad (3)$$

Como poderemos ver, no capítulo de análise dos resultados, a energia é uma função intrínseca dos parâmetros geométricos e, como consequência, as fases magnéticas dependem das dimensões físicas da nanoestrutura, bem como dos parâmetros magnéticos.

### 2.3.4. Energia de Zeeman

Na perspectiva de Zeeman, precisamos ter em mente que o estado de mais baixa energia é encontrado quando a orientação dos momentos magnéticos está no mesmo sentido do campo externo aplicado (COEY; J. M. D. 2010). A energia de Zeeman é dada por:

$$\frac{E_{Zeeman}}{\delta^3} = \vec{H} \cdot M_s \sum_i \hat{m}_i \quad (4)$$

Diante desta equação, temos que o versor  $\hat{m}$  representa a orientação do momento magnético local,  $M_s$  é a magnetização do material, enquanto  $H$  é o campo magnético externo.

### 2.3.5. Campo Efetivo

O campo efetivo  $\vec{H}_{eff}$  sobre i-ésima célula é calculado a partir de:

$$\vec{H}_{eff}(i) = -\frac{1}{M_s} \vec{\nabla}_{\hat{m}_i} E \quad (5)$$

Onde  $E$  a densidade de energia magnética total, que contempla as energias de troca, de anisotropia, Zeeman e de interação dipolar.

O cálculo da configuração de equilíbrio é baseado na teoria de campo médio, que garante que o momento magnético está na direção do campo efetivo local. Do ponto de vista numérico, é requerido que a condição de torque  $\hat{m}_i \times \vec{H}_{eff}(i) \approx 0$ , onde  $\vec{H}_{eff}(i)$  é o campo efetivo local com as contribuições do campo de troca, do campo de anisotropia, do campo externo e do campo dipolar.

Apresentaremos um estudo das fases magnéticas no estado de remanência de nanoelementos retangulares de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) e de Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm).

### 3. ANÁLISES E RESULTADOS SOBRE A FORMAÇÃO DE VÓRTICES FERROMAGNÉTICOS

No presente capítulo, serão apresentadas análises e discussões acerca dos resultados obtidos por meio de simulações feitas em algoritmo, desenvolvidas em linguagem de programação Fortran e do software Origin para a elaboração dos gráficos e figuras.

#### 3.1. FORMAÇÃO DE VÓRTICES FERROMAGNÉTICOS

Nosso estudo contempla a descrição das fases magnéticas de nanoestruturas ferromagnéticas. Em particular, iremos investigar os efeitos de interação dipolar entre dois nanoelementos ferromagnéticos retangulares, um sobre o outro, separados por um material não-magnético.

No algoritmo utilizado para analisar a formação de vórtices, há um arquivo de entrada, que chamamos de “INPUTHEX.DAT”, que foi usado para indicar os parâmetros geométricos e magnéticos do sistema considerado.

Na Figura 6, é possível visualizar a interface do arquivo “INPUTHEX.DAT”, assim como as variáveis que os compõem. Tendo em vista o sequenciamento das variáveis, podemos observar os valores que foram determinados a cada uma delas, em uma condição inicial. Sendo assim, analisando a primeira variável, temos “HI” que equivale ao campo inicial, que no caso, representa o valor inicial para o campo, e como valor final para o campo, temos o “HF”, o valor limite; “NH” refere-se à quantidade de vezes que o programa investiga os efeitos de interação dipolar; “NCHECK” está relacionado à quantidade máxima de checagens que o algoritmo faz; “DELTETA” corresponde a parte de inicialização do momento magnético, “TOLTETA” é o limite de tolerância utilizado na configuração de equilíbrio. “PHIH” está relacionado ao ângulo do campo com o eixo x; “TETAH” representa a direção do campo aplicado; “D(nano)” corresponde a variável que indica o tamanho da aresta da célula de simulação. As variáveis “NX e NY” representam as dimensões, em número de células, ao longo dos eixos x e y, respectivamente. Enquanto “NZ1 e NZ2” representam as espessuras, em números de células, dos dois nanoelementos ferromagnéticos. Além disso, “eta” representa a espessura do material não-magnético e como também podemos



observar “fm1” representa o tipo de material a ser analisado, que no caso da Figura 6, é o permaloi.

Figura 6: Interface do arquivo de entrada “INPUTHEX.DAT” no programa “retangular.for”

```

INPUTHEX.DAT*
hi= 5.5000000000
hf= 0.0000000000
nh = 101
ncheck= 99999
nx = 15
ny = 15
nz1 = 4
nz2 = 4
delteta= 0.0010000000
toltdeta= 0.0000010000
phih = 0.0000000000
tetah = 90.0000000000
d(nano)= 5.0000000000
eta= 0.2000000000
fm1= py
  
```

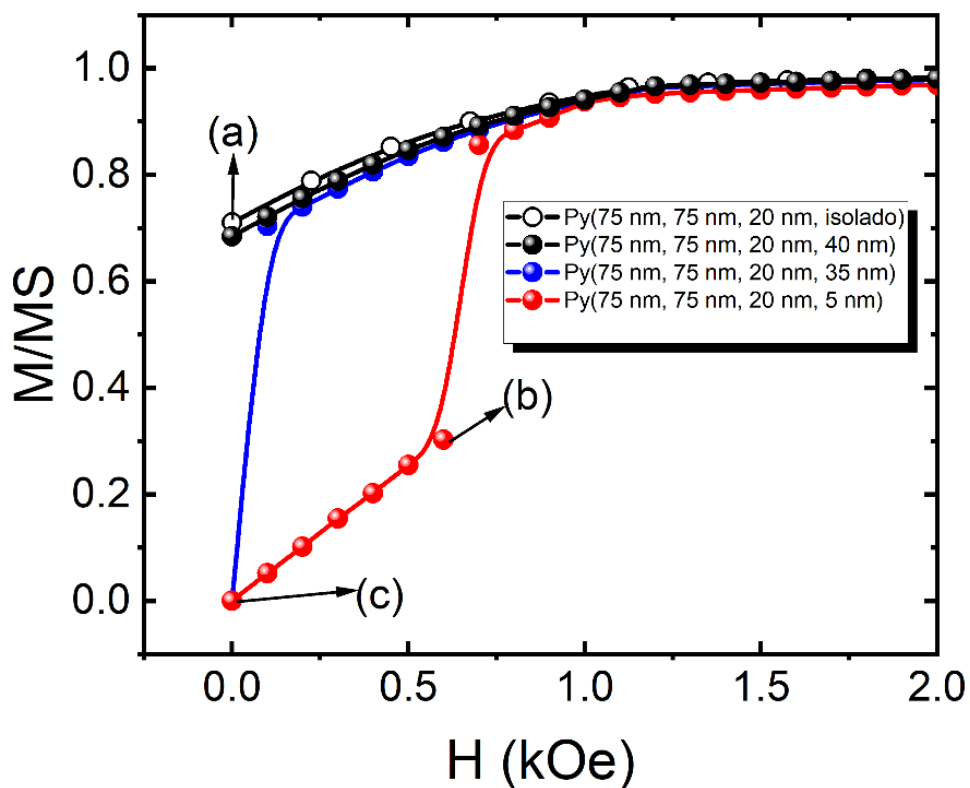
Fonte: Autor (2022)

Como mostraremos a seguir, nossos resultados indicam que a fase magnética de um nanoelemento ferromagnético pode ser alterada pela interação dipolar com um segundo nanoelemento. A conclusão pode ser feita a partir da comparação entre os padrões das fases magnéticas de nanoelementos isolados e nanoelementos aos pares.

Na Figura 7, apresentamos as curvas de magnetização *versus* campo externo para nanoestruturas com nanoelementos retangulares de Py com dimensões  $L_x = L_y = 75$  nm e 20 nm de espessura. O estado de remanência é avaliado a partir de um processo, conforme se expressa a seguir: Primeiramente, as nanoestruturas magnéticas são saturadas em um campo magnético intenso,  $H=2.0$  kOe, e em seguida o campo magnético externo é retirado. Vale ressaltar que o campo magnético foi aplicado ao longo na direção x.

Nossos resultados mostram que o nanoelemento Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado) tem remanência alta, a magnetização possui 70% da saturação. Nesse caso, a fase magnética que se forma é um ordenamento que representa um “c”, apresentado na Figura 8. A partir da barra de cores da Figura 8, observamos que a magnetização se encontra praticamente no plano xy ( $\theta = 90^\circ$ ) com pequenos desvios de  $\pm 16^\circ$  nos cantos.

Figura 7: Curvas de magnetização como função do campo externo aplicado. Símbolos abertos para Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado); símbolos pretos para Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 40 nm); símbolos azuis Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 35 nm); e símbolos vermelhos Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm).

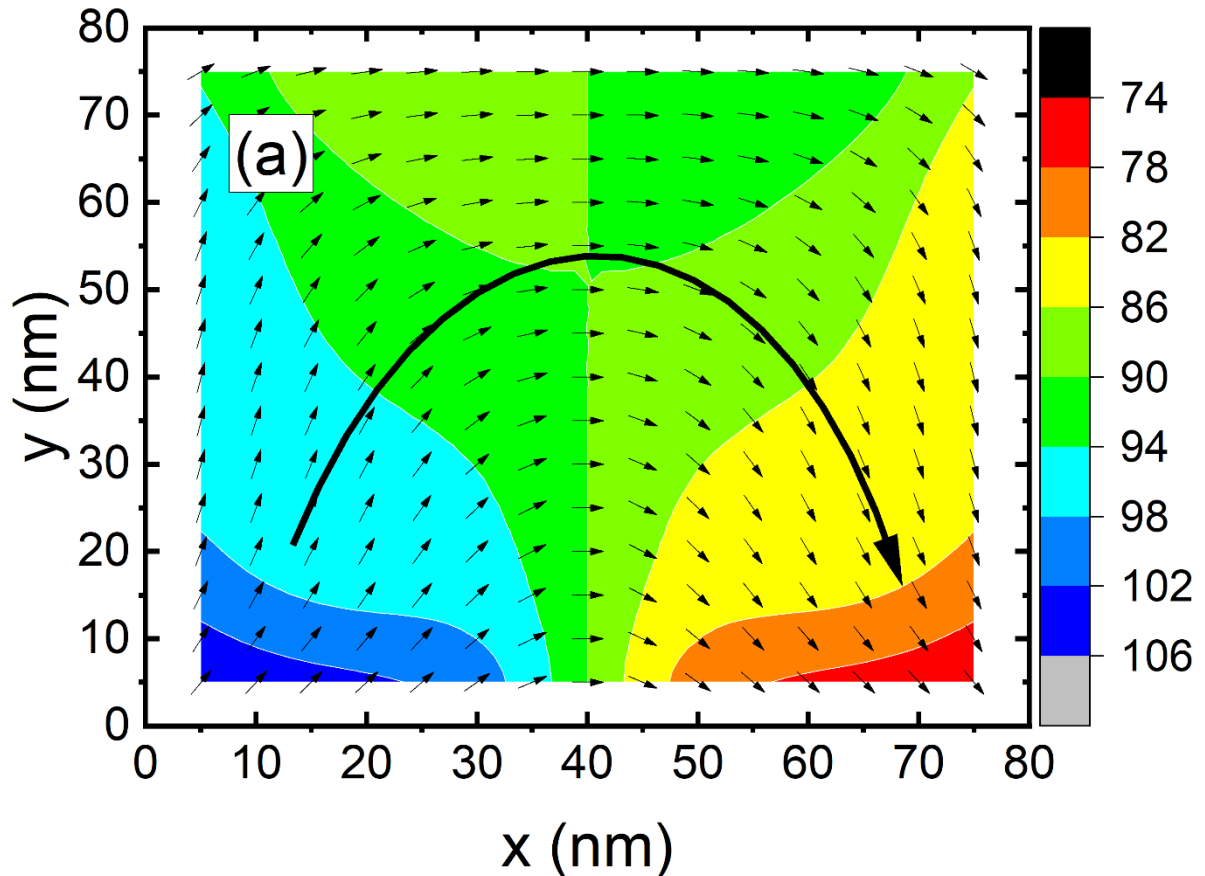


Fonte: Autor (2022)

Devido a energia de interação dipolar entre nanoelementos ferromagnéticos, ao se colocar dois nanoelementos de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), conforme esquema da Figura 5, separados por uma material não-magnético, o padrão de magnetização pode ser alterado, dependendo da espessura do espaçador não-magnético. Se a espessura do espaçador não-magnético é grande, a interação entre os nanoelementos magnéticos é fraca e não provoca relevantes alterações no padrão de magnetização. Como por exemplo, se o espaçador não-magnético possui uma espessura  $\eta=40\text{nm}$ , curva com símbolos pretos na Figura 7, a magnetização do sistema Py(75 nm, 75 nm,

20 nm, 40 nm), ainda é alta e representa 68% da saturação. Assim, a fase magnética possui o mesmo padrão de “c” (conforme Figura 8) em ambos os nanoelementos. Na Figura 8, as setas representam o ordenamento dos momentos magnéticos e o código de cores representa o ângulo dos momentos magnéticos com o eixo z.

Figura 8: Perfil de magnetização do nanoelemento retangular Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado) associado ao ponto (a) da Figura 7.



Fonte: Autor (2022)

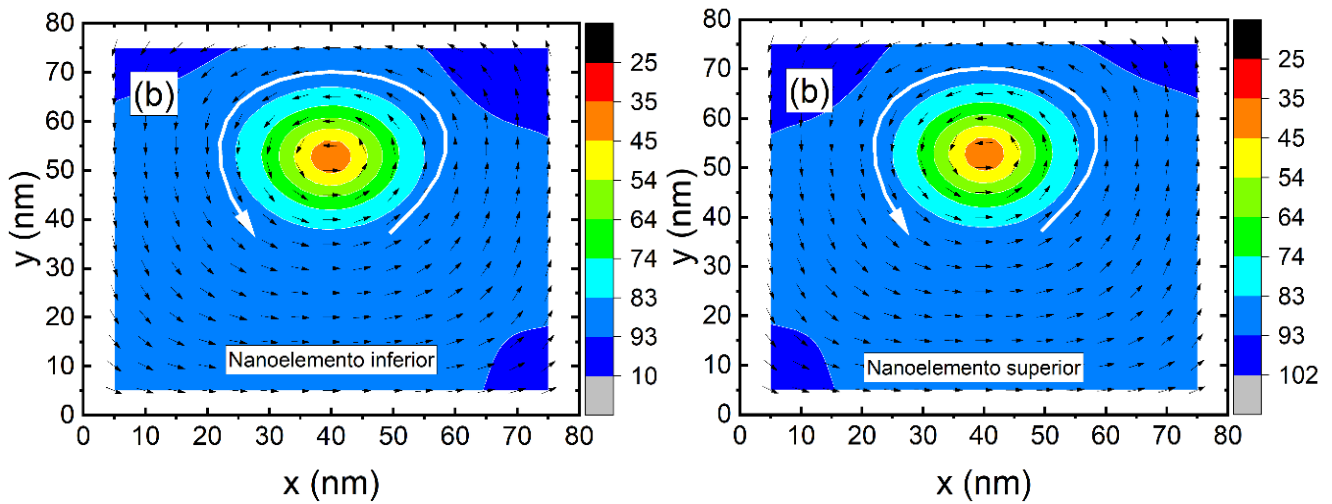
Todavia, nossos resultados mostram que há um limite na espessura da camada não-magnética, abaixo do qual sempre se forma um vórtice magnético em cada nanoelemento. Para o caso da nanoestrutura Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), esse limiar é  $\eta=35$  nm. Nesse caso, durante todo o processo de retirada do campo externo, a magnetização se mantém relativamente alta e somente para  $H=0$  a magnetização, na direção do campo aplicado, é nula, como mostra a curva azul da Figura 7. Nesse caso, para  $H=0$  é formado um par de vórtices magnéticos no centro de cada nanoelemento Py(75 nm, 75 nm, 20 nm).

À medida que os nanoelementos são colocados mais próximos, como por exemplo para  $\eta=5\text{nm}$ , os pares de vórtices se formam mais facilmente, ainda na presença de campo externo relativamente alto,  $H=0,7\text{ kOe}$ . Como pode ser visto na Figura 7, a magnetização da nanoestrutura Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm) apresenta uma queda para  $H=0,6\text{ kOe}$ . A Figura 9 apresenta os perfis de magnetização para  $H=0,6\text{ kOe}$ , correspondentes ao ponto (b) da Figura 7. O painel do lado esquerdo (direito) representa o perfil de magnetização do nanoelemento Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) superior (inferior), as setas pretas representam o ordenamento dos momentos magnéticos e o código de cores representa o ângulo dos momentos magnéticos com o eixo z. As setas brancas são um guia visual.

Podemos observar também que, à medida que o campo diminui, os centros dos vórtices se deslocam para os centros dos nanoelementos Py(75 nm, 75 nm, 20 nm).

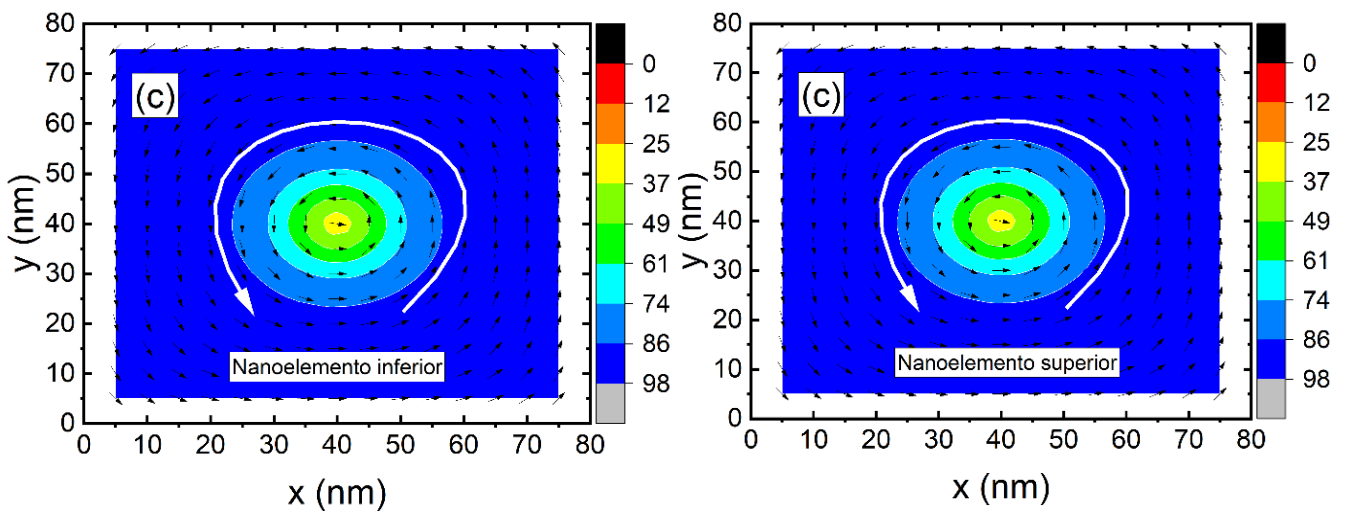
Portanto, para  $H=0,0$ , o estado de remanência mostra que os vórtices estão localizados no centro dos nanoelementos. Os painéis da Figura 10, correspondentes ao ponto (c) da Figura 7, mostram os perfis de magnetização dos nanoelementos Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5nm) e exibem um par de vórtices localizado no centro dos nanoelementos em remanência, em  $H=0,0$ . A magnetização está praticamente no plano xy, com exceção dos centros dos vórtices magnéticos, os painéis da esquerda e direita representam os padrões de magnetização dos nanoelementos inferior e superior, respectivamente. As setas pretas representam o ordenamento dos momentos magnéticos e o código de cores representa o ângulo dos momentos magnéticos com o eixo z. As setas brancas são um guia visual.

Figura 9: Perfis de magnetização da nanoestrutura Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm) associados ao pontos (b)  $H=0,6$  kOe indicado na Figura 7.



Fonte: Autor (2022)

Figura 10: Perfis de magnetização da nanoestrutura Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm) associados ao ponto (c)  $H=0,0$  indicado na Figura 7.



Fonte: Autor (2022)

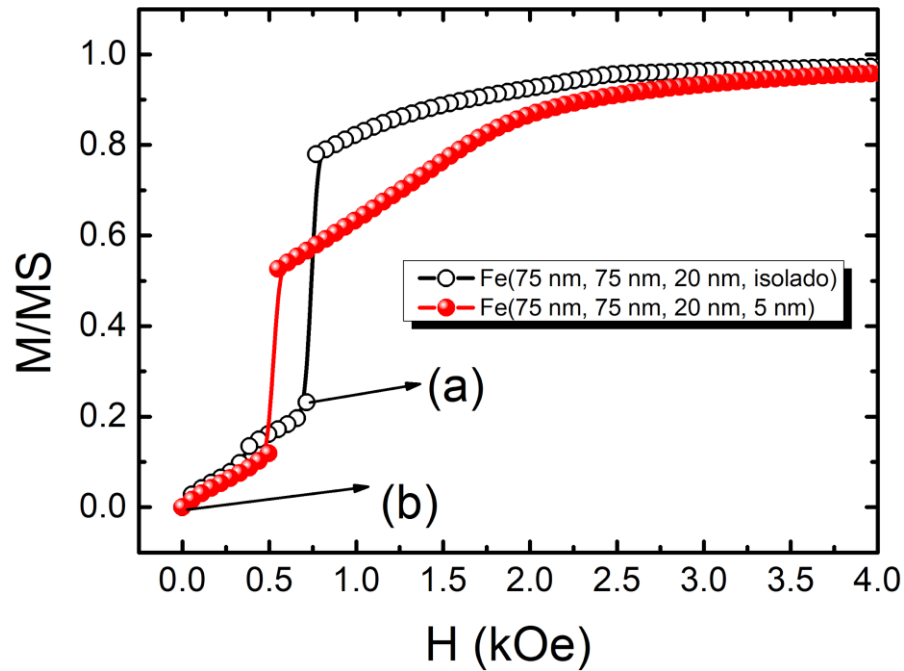
Ao contrário dos nanoelementos de Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), os nanoelementos de Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) sempre formam vórtices magnéticos, em seu estado de remanência. Na Figura 11, apresentamos as curvas de magnetização para os nanoelementos Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) isolado e separados por um espaçador com 5nm de espessura. As diferenças já aparecem na dificuldade de saturação. Enquanto

o nanoelemento de Py é saturado com um campo externo de 2,0 kOe, para o Fe, precisamos de um campo de 4,0 kOe. A energia responsável pela dificuldade de saturação é a energia de interação dipolar, que é proporcional à magnetização de saturação ( $M_s$ ). Como  $M_s(\text{Fe})=1,7$  kOe é maior do que  $M_s(\text{Py})=0,8$  kOe, a saturação do Fe é mais difícil de ser alcançada.

A Figura 11 mostra uma queda da magnetização do nanoelemento Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) isolado no processo de retirada do campo externo para  $H=0,7$  kOe. Essa queda representa a formação de um vórtice magnético no nanoelemento. O vórtice se forma fora do centro do nanoelemento como pode ser visto na Figura 12, o padrão de magnetização associado ao ponto (a) da Figura 11, onde as setas pretas representam o ordenamento dos momentos magnéticos e o código de cores representa o ângulo dos momentos magnéticos com o eixo z. As setas brancas são um guia visual.

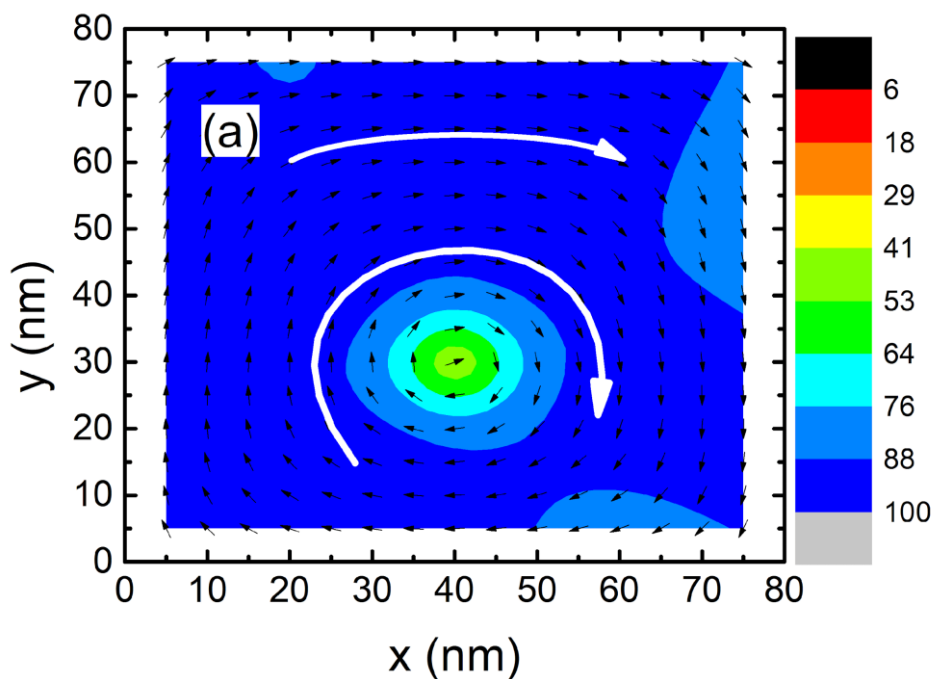
Portanto, nossos resultados mostram que o par de nanoelementos Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) sempre geram um vórtice em cada nanoelemento, independente da espessura do espaçador não magnético. Assim, mostramos os resultados para um par de nanoelementos Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) separados por uma distância de  $\eta=5$  nm. Onde, nesse caso, a Figura 11 mostra uma queda da magnetização já em  $H=2,0$  kOe, que vai até 0,6 kOe devido a pequenas variações dos momentos magnéticos. Todavia, para  $H = 0,5$  kOe, há uma queda abrupta, onde é formado um par de vórtices fora do centro e, à medida que o campo vai diminuindo, os vórtices vão se deslocando para o centro do nanoelemento. A Figura 13 mostra o padrão de magnetização dos nanoelementos Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5nm) para  $H=0,0$ , no estado de remanência, associado ao ponto (b) da Figura 11, onde os painéis representam os padrões de magnetização dos nanoelementos superior e um inferior; as setas pretas representam o ordenamento dos momentos magnéticos e o código de cores representa o ângulo dos momentos magnéticos com o eixo z. As setas brancas são um guia visual.

Figura 11: Curvas de magnetização como função do campo externo aplicado. Símbolos abertos para Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado); símbolos vermelhos Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm).



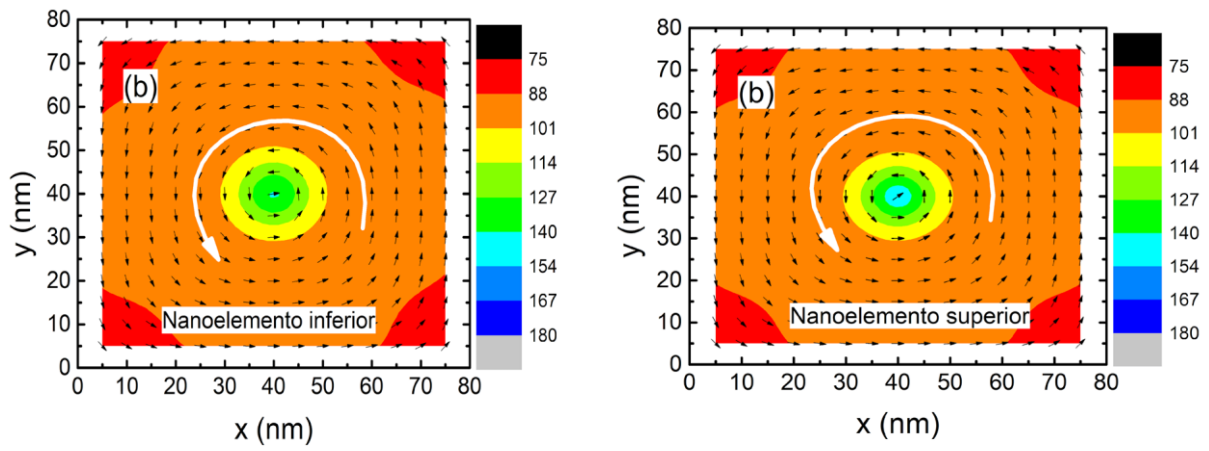
Fonte: Autor (2022)

Figura 12: Perfil de magnetização da nanoestrutura Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado), associado ao ponto (a)  $H = 0,7$  kOe indicado na Figura 11.



Fonte: Autor (2022)

Figura 13: Os perfis de magnetização da nanoestrutura Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, 5 nm), associados ao ponto (b)  $H = 0,0$  kOe indicado na Figura 11.



Fonte: Autor (2022)

Portanto, nossos resultados mostram que a energia de interação dipolar pode ser responsável por formar vórtices magnéticos empilhados, em seu estado de remanência,  $H=0$ .



## 4. CONCLUSÕES

Realizamos a pesquisa que teve como objetivo identificar nanoestruturas ferromagnéticas, separados por um espaçador não magnético, que apresentassem a formação de vórtices na ausência de um campo magnético externo. Para tanto, consideramos nanoelementos retangulares, isolados e aos pares separados por um material não magnético, de Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) ou Py(75 nm, 75 nm, 20 nm), Buscando dar conta desse estudo, foram feitas simulações para se obter a configuração de equilíbrio.

Nosso estudo mostrou que as fases magnéticas, em remanência, do nanoelemento Py(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado) apresenta uma fase tipo um “c”, enquanto o Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm, isolado) já apresenta um vórtice, padrão que corresponde a circulação da magnetização em torno de um núcleo com magnetização perpendicular ao plano do vórtice (SHINJO, 2000).

Contudo, o par de nanoelementos Py(75 nm, 75 nm, 20 nm) separados por um material não magnético pode exibir um par de vórtice, em remanência, desde que a espessura do material não magnético seja menor ou igual a 35 nm. Nesse caso, a interação dipolar entre os nanoelementos é responsável pela formação dos vórtices.

Por outro lado, nossos resultados mostram que os nanoelementos de Fe(75 nm, 75 nm, 20 nm) sempre apresentam vórtices, independentemente da espessura do espaçador não magnético. Esse resultado é devido a alta magnetização de saturação do Fe resultando em alto campo de interação dipolar.

Como perspectivas, esse estudo deve ser ampliado para conter uma variação muito maior nas dimensões físicas dos nanoelementos envolvidos. Inclusive, esperamos que, se as faces dos nanoelementos forem alongadas ao longo ou perpendicular à direção do campo aplicado, o estudo poderá exibir uma grande variedade de fases magnéticas, podendo conter pares de vórtices acoplados ou exibir a fase antiferromagnética.

## 5. REFERÊNCIAS

- BAIBICH, M. N. et al. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices. **In Physical Review Letters**, [S.L.], v. 61, n. 21, p. 2472-2475, 21 nov. 1988. American Physical Society (APS). Orsay, France: 1988. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1103/physrevlett.61.2472>>. Acessado em 25 de outubro de 2021.
- BERGER, L. Phys. **In Rev. B**, v. 54, p. 9353, 1996. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.54.9353>>. Acessado em 25 de outubro de 2021.
- DUSSAUX, A. et al. Large microwave generation from current-driven magnetic vortex oscillators in magnetic tunnel junctions. **In Nature Communications**, volume 1:8, 2010. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/ncomms1006>>. Acessado em 25 de outubro de 2021.
- DARQUES, M. et al. Bottom-up approach for the fabrication of spin torque nano oscillators. **In Journal of Physics D: Applied Physics**, vol. 44, p. 105003, 2011. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011JPhD...44j5003D/abstract>>. Acessado em 20 de outubro de 2021.
- DANTAS, A. L. et al, "Vortex nucleation in exchange biased magnetic nanoelements". **In IEEE Transactions on Magnetics**, Volume: 46, Issue: 6, June 2010. Washington: DC, 2010. Disponível: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5467495>>. Acessado em 22 de outubro de 2021.
- DIENY, B. et al. Giant magnetoresistive in soft ferromagnetic multilayers. **In Physical Review B**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 1297-1300. American Physical Society (APS), 1991. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.43.1297>>. Acessado em 18 de outubro de 2021.
- GLOVER, R. **Global Nanotechnology Market (by Component and Applications), Funding & Investment, Patent Analysis and 27 Companies Profile & Recent Developments - Forecast to 2024**. [S.I.], Abril 2018.
- GUIMARÃES, A. P. **Magnetismo e ressonância magnética em sólidos**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<https://www.edusp.com.br/livros/magnetismo-e-ressonancia-magnetica-em-solidos/>>. Acessado em 15 de outubro de 2021.
- HUBER, Dale L. Synthesis, Properties, and Applications of Iron. **In Nanoparticles Small**, v.1, n.5, p.482 -501, 2005. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17193474/>>. Acessado em 20 de outubro de 2021.
- HIROHATA, A. et al. Review on spintronics: Principles and device applications. **In Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 509, 166711, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304885320302353?via%3Dihub>>. Acessado em 22 de outubro de 2021.

KAKA, S. et al. Mutual phase-locking of microwave spin torque nano-oscillators. **In Nature Letters**, v. 437, 389, 2005. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature04035>>. Acessado em 12 de outubro de 2021.

MARTINS, S. M. S. B. et al. Excitations of interface pinned domain walls in constrained geometries. **In AIP Advances**, pp. 8, 056004, 2018. Disponível em: <<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5007245>>. Acessado em 14 de outubro de 2021.

MENEZES, Julio C. de A. **Obtenção de Nanopartículas de Níquel Via Processo Aquoso e sua Aplicação na Metalização de Fibras Naturais**. São Cristóvão - SE 2010, 125 p. Tese (Pós Graduação em Física) Faculdade de Física Universidade Federal de Sergipe.

RODRIGUEZ, G. J. B. O porquê de estudarmos os materiais magnéticos. **In Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 20, 1998. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/24813304-O-porque-de-estudarmos-os-materiais-magneticos.html>>. Acessado em 18 de outubro de 2021.

SHINJO, T., Okuno, T., Hassdorf, R., Shigeto, K. & Ono, T. Magnetic vortex core observation in circular dots of permalloy. **In Science** 289, 930–932 (2000).

SLONCZEWSKI, J. Current-driven excitation of magnetic multilayers. **In Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 159(1-2) L1 – L7, 1996. Disponível em: <<https://journal.materialscience.net/wp-content/uploads/2019/03/slonzewski1996.pdf>>. Acessado em 21 de outubro de 2021.

SILVA, A. S. M. et al. Nucleation of vortex pairs in exchange biased nanoelements. **In Journal of Applied Physics**, vol. 109, p. 07D314, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/28675?mode=full>>. Acessado em 17 de outubro de 2021.

ZEGEYE, S. M. A review paper on spintronics and its role to improve electronic devices. **In American Journal of Quantum Chemistry and Molecular Spectroscopy**, v. 3(2): 41-47, 2019. Disponível em: <<http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=398&paperId=10041980>>. Acessado em 18 de outubro de 2021.