

ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE NANOELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES.

Amannda Laís Faheina Agra¹, Idalmir de Souza Queiroz Júnior², Stefany Kariny dos Santos de Souza Queiroz³

¹Graduanda do Curso Bacharelado em Ciência e Tecnologia, UFRSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: amanndaagra@gmail.com

²Professor, Departamento de Engenharia e Tecnologia - UFRSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: idalmir@ufersa.edu.br

³Bacharel em Ciência e Tecnologia, Graduanda de Engenharia Elétrica, UFRSA, Mossoró – Rio Grande do Norte. E-mail: st_queiroz@hotmail.com

Resumo: Em meio a ascensão do magnetismo aplicado à tecnologia, o nanomagnetismo surge para inovar neste campo de atuação, trazendo consigo um melhor desempenho para tecnologias como a Spintrônica, nanotecnologia, dispositivos nanomagnéticos, novos dispositivos de armazenamento magnético, etc. A grande qualidade por trás do uso desses materiais tão pequenos é que, além de seu desempenho superior, ocupa um menor espaço físico, já que suas dimensões são de uma escala nanométrica (10^{-9} m), sendo assim uma tecnologia de crescente estudo e desenvolvimento. Por meio de conceitos sobre o magnetismo e o nanomagnetismo, o trabalho estuda o comportamento dos domínios magnéticos de nanocilindros de Ferro e Permalloy com 60nm de diâmetro e espessura variando entre 3nm e 21nm sob a influência de um campo magnético externo. Essas simulações resultam em situações de monodomínio, que é de grande importância para a gravação magnética, e vórtice, que é bastante aplicado em mecanismos sensores.

Palavras-chave: nanomagnetismo; spintrônica; histerese magnética; momentos magnéticos; nanocilindro magnético.

1.INTRODUÇÃO

O magnetismo é um fenômeno de atração e repulsão entre materiais. Este fato está diretamente relacionado à interação entre os campos magnéticos de elementos que possuem propriedades especiais, como por exemplo o ferro e a magnetita, que por serem materiais ferromagnéticos, têm essa característica mais facilmente notada [1,2].

Devido a interação entre estes elementos ser dada de forma curiosa que, até então, acontecia por meio de forças tidas como misteriosas, a propriedade magnética presente em alguns materiais chamou a atenção da humanidade [3]. Como consequência, passou-se a ter um melhor entendimento deste efeito, fazendo com que o magnetismo trouxesse grandes contribuições. A primeira destas inovações foi a bússola, descoberta na China em 1100 AC [3], que possui uma atuação resultante da influência do campo magnético da Terra em um material magnético, servindo como uma forma de orientação, que foi de grande importância para a navegação e, consequentemente, o comércio [2].

Ao longo dos anos o estudo de materiais com estas propriedades foi aprofundado, e hoje são indispensáveis no campo tecnológico. As aplicações do magnetismo e suas contribuições para o padrão de vida atual da humanidade são muitas, entre eles pode-se destacar seu uso em sistemas de geração e distribuição de energia, conversão eletromecânica, eletrônica, telecomunicações, sensoriamento, medicina e informática [3].

Com o avanço da tecnologia e a busca constante de aprimoramentos em equipamentos, traz à tona a necessidade de obter dispositivos mais sofisticados, que possuem um desempenho superior ao comum e ao mesmo tempo possua uma menor estrutura física. A spintrônica é a grande responsável pela otimização de tecnologias como computadores e discos rígidos neste quesito [4].

Por meio do estudo do nanomagnetismo, é possível analisar estruturas de dimensões nanométricas e trabalhar com a eletrônica baseada no spin do elétron, o que abre um espaço cada vez maior no desenvolvimento tecnológico [4]. Busca-se, por meio deste trabalho, estudar conceitos da spintrônica e seus constituintes físicos envolvidos de forma a compreender a interação magnética existente entre nanoelementos cilíndricos de Ferro e de Permalloy.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente tópico aborda conceitos do magnetismo e nanomagnetismo de forma a embasar discussões presentes no trabalho, trazendo assim uma melhor compreensão do assunto tratado. Ainda, contém definições e fórmulas de grande importância para a obtenção dos resultados.

2.1. TEORIA DO MAGNETISMO

O magnetismo é resultante de um conjunto de fenômenos e conceitos magnéticos que definem a propriedade do material interagir magneticamente entre si ou entre outros elementos, seja de forma atrativa ou repulsiva. Os estudos crescentes desses conceitos têm permitido uma melhor atuação deste efeito na ciência, de forma a transformar positivamente a qualidade de vida da sociedade atual. Assim, para este trabalho a compreensão de propriedades básicas dos materiais magnéticos e as forças envolvidas faz-se de grande necessidade.

2.1.1. ÍMÃS

Os ímãs são materiais com magnetização permanente que interagem com outros materiais por meio das forças magnéticas atuantes no sistema. Esta força, assim como a elétrica e a gravitacional, não pode ser tocada ou vista e atua nos materiais sem precisar necessariamente de contato. Desta forma, esta influência nos elementos pode ser dada de forma atrativa ou repulsiva, dependendo do sentido e direção vetorial da força presente neles, reforçado pelo conceito de dipolo magnético [5].

Todo material magnetizado, de forma permanente ou não, possui dois polos magnéticos, o Norte e o Sul. É possível identificar estes polos por meio de uma soma vetorial entre os domínios magnéticos, assim, pela definição, o sentido de saída das linhas de força é tido como o Norte e o de entrada, o Sul [3]. Desta forma, quando dois ímãs se aproximam com polos opostos, ocorre uma atração, e com polos iguais obtêm-se uma repulsão [5]. Na Figura 1, é possível obter uma melhor observação dos polos magnéticos e suas forças magnéticas atuantes.

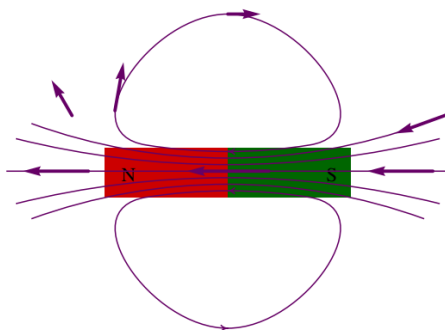


Figura 1: Polos magnéticos e linhas de força de um ímã [5].

2.1.2. DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

O elemento sob o efeito de magnetização é constituído por pequenas regiões onde a magnetização é dada de forma uniforme, ou seja, os spins estão alinhados sob um mesmo padrão. Essas pequenas divisões são chamadas de domínios magnéticos e, por mais que possam obter sentidos de magnetização diferentes, definem, por meio de suas interações, a magnetização do material como um todo. A mudança de orientação dos spins ocorre de domínio para domínio e esta área de transição é chamada parede de domínio, que é uma região onde ocorre uma pequena perturbação no sistema, de forma a trazer essa mudança de magnetização [6]. Sua visualização é possível por meio da Figura 2.

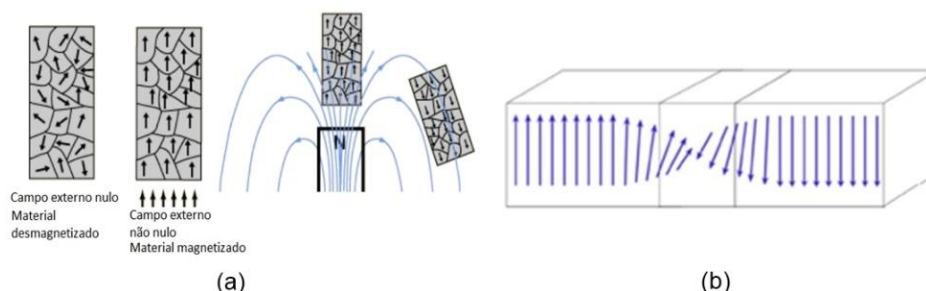


Figura 2: (a) Representação dos domínios magnéticos separados por parede de domínio [9].
(b) Visão ampliada da parede de domínio [6]

Como é possível observar na imagem, os spins orientados para cima fazem parte de um domínio até chegar a uma região de transição onde os spins estão se reorganizando para se ajustar ao domínio vizinho, representado por spins orientados para baixo. Um material pode ser considerado desmagnetizado a partir do momento que todos os domínios magnéticos se cancelam, ou seja, sua soma vetorial será igual a zero [7].

2.1.3. CAMPO MAGNÉTICO

Um ímã ou um material magnetizado temporariamente gera um campo magnético, que é a região de influência onde a interação magnética vai ocorrer. Sua representação pode ser dada por meio de um conjunto de linhas de força originadas pela influência dos dipolos magnéticos [5, 3]. A Terra, por exemplo, possui seu próprio campo magnético, com linhas de força saindo do polo sul geográfico para o polo norte geográfico. Desta forma, o polo norte geográfico é o polo sul magnético, e o sul geográfico, o norte magnético [5].

A intensidade do campo magnético ($\vec{H}$) é proporcional à força magnética ($\vec{F}$), da seguinte forma:

$$\vec{F} = m \vec{H} \quad (1)$$

Onde, H é medido em A/m.

A densidade do fluxo magnético ($\vec{B}$) é a magnitude da força no campo interno do elemento sujeito a um campo H [7]. Essa densidade é proporcional ao campo externo ($\vec{H}$) e possui a seguinte equação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2)$$

Onde μ é medido em (H/m) ou (Wb/A.m) e representa a permeabilidade magnética, que é a propriedade do meio específico onde ocorre essa interação do campo externo com o interno [7]. A permeabilidade relativa (μ_r) representa a facilidade com que um material pode ser magnetizado e é uma grandeza adimensional dada por:

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (3)$$

Onde a permeabilidade no vácuo (μ_0) possui um valor tabelado de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

2.1.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS

Materiais podem ser magnetizados sob a influência de um campo magnético externo e, dependendo de suas propriedades, estão sujeitos a responder à esta interferência do campo aplicado de formas diferentes. A susceptibilidade magnética (χ_m) informa as características magnéticas de um material de acordo com a influência de um campo magnético externo [7]. Esta grandeza adimensional pode ser dada por meio de sua relação com a permeabilidade relativa, da seguinte forma:

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (4)$$

Os seguintes tópicos, abordam três tipos diferentes de respostas de materiais sob efeito da aplicação de um campo no sistema.

2.1.4.1. DIAMAGNETISMO

Possuindo uma susceptibilidade magnética negativa (da ordem de -10^{-5}), um material diamagnético não sofre influência pela aplicação de um campo magnético de baixa intensidade, mantendo-se íntegro. Porém, se aplicado um campo de grande intensidade, o material tende a responder com uma repulsão, ou seja, será magnetizado no sentido contrário do campo externo, assim como mostra a Figura 3 [7].

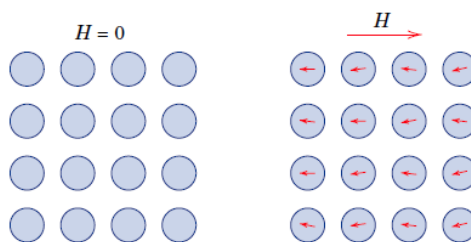


Figura 3: Domínios de um material diamagnético antes e depois da aplicação de um campo magnético externo [7].

Este efeito é muito fraco e não age de forma permanente, assim, só existe enquanto há influência de um campo externo [5, 7]. Este efeito é encontrado na maioria dos materiais, porém, por ser muito fraco, essa forma de magnetismo não possui uma importância prática [7].

2.1.4.2. PARAMAGNETISMO

Os materiais paramagnéticos, possuem uma magnetização inicial dada de forma aleatória, consequentemente não possuem magnetização macroscópica resultante. Porém sob a influência de um campo externo, os spins, antes arbitrários, tendem a seguir a mesma direção do campo aplicado, mesmo que em pequena intensidade [7]. O efeito pode ser observado por meio da Figura 4.

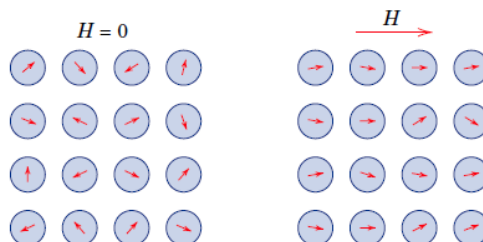


Figura 4: Domínios de um material paramagnético antes e depois da aplicação de um campo magnético externo [7].

Como a magnetização do material e o campo externo estão no mesmo sentido, eles se somam, resultando em uma permeabilidade relativa maior que a unidade e uma susceptibilidade pequena, mas positiva. Porém, assim como o diamagnetismo, o paramagnetismo só possui magnetização sob o efeito de um campo externo [5, 3, 7].

2.1.4.3. FERROMAGNETISMO

Sob a influência de um campo magnéticos externo, os domínios do material ferromagnético se alinham de forma uniforme ao do campo aplicado, resultando no seu estado de magnetização de saturação. Assim, diferentemente dos demais, o material ferromagnético possui uma magnetização muito forte e permanente, ou seja, ela ainda existe, mesmo sem a influência de um campo externo [7]. O comportamento deste tipo de material imediatamente após sua magnetização, pode ser visto por meio da Figura 5.

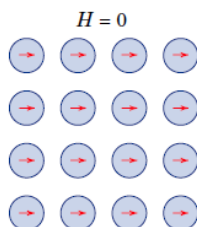


Figura 5: Domínios de um material ferromagnético imediatamente após aplicação de um campo magnético externo [7].

De susceptibilidade magnética positiva e relativamente grande quanto 10^6 , elementos com características ferromagnéticas tendem a se alinhar ao campo magnético externo [5, 7]. Assim, apresentam as melhores propriedades específicas para a spintrônica, se tornando o material de estudo para este trabalho.

2.2.HISTERESE MAGNÉTICA

Abaixo de uma temperatura crítica, chamada de Temperatura de Curie (T_c), observa-se uma magnetização espontânea em materiais ferromagnéticos (M_s) com a aplicação de um campo externo (H), conforme discutido anteriormente [4].

A histerese magnética mostra, de forma gráfica, a relação entre um campo externo aplicado e a magnetização de um material ferromagnético. Desta forma, também pode-se definir esta curva como a constante inversão dos domínios magnéticos sob influência e variação de um campo aplicado no sistema, de forma a constituir um ciclo de magnetização e desmagnetização do elemento. Este efeito pode ser visualizado por meio da Figura 6. Salienta-se que a estrutura física, tal como formato e dimensão do material estudado, é significativa para o formato resultante da curva de histerese. [4, 8]

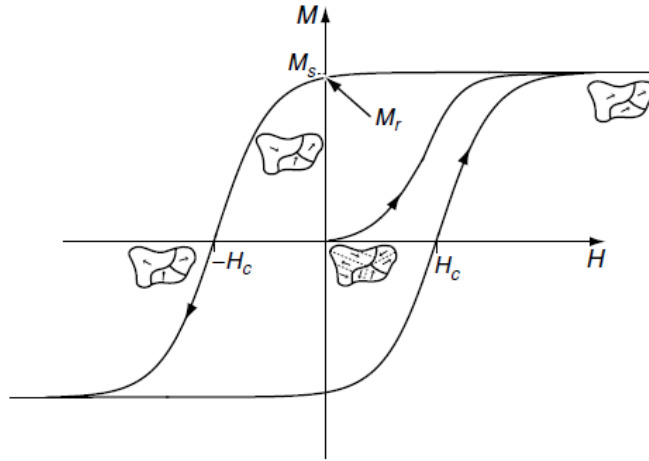


Figura 6: Curva de histerese magnética de um material ferromagnético [2].

Um campo magnético externo fará efeito no material até atingir a saturação magnética (M_s), a partir deste momento o material estará magnetizado e seus domínios magnéticos estarão alinhados uniformemente [2, 3]. Após a remoção do campo externo do sistema, ou seja, no instante que $H = 0$ A/m, a magnetização restante no material é chamada de magnetismo remanente (M_r). Assim, os domínios magnéticos ainda estarão alinhados, porém ligeiramente menos uniformes que a Magnetização de saturação (M_s) [2, 8, 4]. O campo coercivo (H_c) é o campo que possui uma intensidade capaz de desmagnetizar o material, resultando em domínios magnéticos dados de forma aleatória.

2.3. NANOMAGNETISMO

O nanomagnetismo estuda os fenômenos magnéticos em materiais de dimensões nanométricas (10^{-9} m). Com o passar do tempo esse campo de estudo veio ganhando cada vez mais atenção, por ser uma opção viável do uso do magnetismo em tecnologias, trazendo um melhor desempenho e ocupando menos espaço físico [6].

A spintrônica é a aplicação do nanomagnetismo na engenharia, ou seja, é a eletrônica realizada por spins e não fluxo de elétrons. Esta nova área, traz consigo desafios, já que seu tamanho reduzido influencia em algumas propriedades físicas e traz à tona novos conceitos, entre eles, pode-se destacar as energias magnéticas atuantes [6].

2.3.1. ENERGIAS MAGNÉTICAS

As energias magnéticas presentes no nanoelemento são importantes para a determinação da composição física da estrutura [4]. Neste trabalho, as energias estudadas serão: A Energia de Troca, Energia de Zeeman, Energia de Anisotropia e Energia Dipolar.

2.3.1.1. ENERGIA DE TROCA

A Energia de Troca de um átomo e seus vizinhos imediatos é dada pela seguinte equação:

$$E_{exch} = - \sum_{i,j} J_{i,j} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (5)$$

onde S representa os spins, i e j referem-se a posição dos átomos e $J_{i,j}$ é a constante de troca.

2.3.1.2. ENERGIA DE ZEEMAN

A Energia de Zeeman refere-se à relação do campo magnético externo com os momentos magnéticos. Assim, pode-se afirmar que seu mínimo ocorrerá quando essas duas grandezas vetoriais estiverem alinhadas [4,8]. Essa energia é dada pela equação:

$$E_{Zeeman} = -\vec{H} \cdot M_s V \sum_i \vec{S}_i \quad (6)$$

onde M_s é a magnetização de saturação, $\vec{H}$ é o campo magnético externo e V representa o volume.

2.3.1.3. ENERGIA DE ANISOTROPIA

A anisotropia magnética é a preferência que os momentos magnéticos têm de se alinharem em certas direções de um eixo cristalino, chamadas de direções de fácil magnetização. Para outras direções é necessária uma energia maior para girar esses momentos para incentivá-los à magnetização [4]. Essa energia é dada pela equação:

$$E_a = -KV \sum_i (\vec{S}_i)^2 \quad (7)$$

onde K é a constante de anisotropia e depende do material.

2.3.1.4. ENERGIA DIPOLAR

A energia dipolar por átomo é dada pela equação a seguir:

$$E_d = \frac{M_s^2 V^2}{2} \sum_{i,k} \left(\frac{\vec{S}_i \cdot \vec{S}_k}{r_{ik}^3} - \frac{3(\vec{S}_i \cdot \vec{r}_{ik})(\vec{S}_k \cdot \vec{r}_{ik})}{r_{ik}^5} \right) \quad (8)$$

onde M_s é a magnetização de saturação, V o volume e $\vec{r}_{ik}$ é o vetor distância entre os momentos magnéticos nas posições i e k.

2.3.2. CAMPOS RESULTANTES

Segundo Rebouças (2010), o campo resultante de uma célula de simulação é obtido por meio do divergente de cada célula, com relação a seu momento. Dada na seguinte fórmula:

$$\vec{H}_i^p = - \frac{1}{M_s} \frac{\partial E_T}{\partial \hat{m}_i^p} \quad (9)$$

onde $\hat{m}$ é a magnetização, E_T a soma de todas as energias envolvidas no trabalho e p representa a direção x, y e z do campo local. Essa equação será aplicada nas energias já descritas para se obter o campo resultante de cada uma [8]. A Figura 7 apresenta uma visão geral dos campos resultantes.

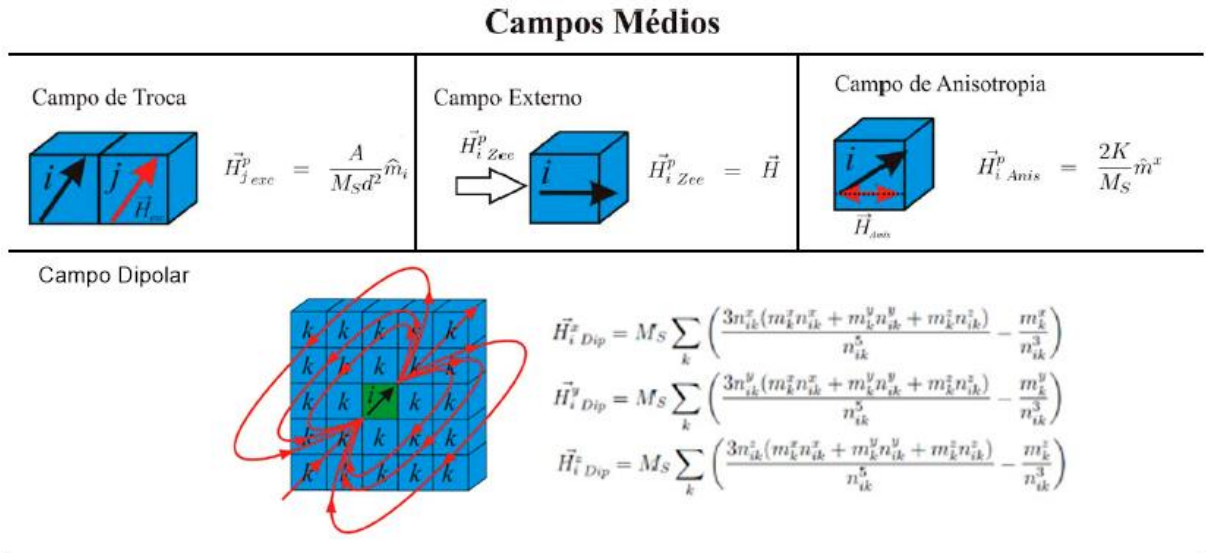


Figura 7: Representação dos Campos Resultantes (Adaptada) [8].

2.3.2.1 CAMPO DE TROCA

O Campo de Troca será representado pela seguinte equação:

$$\vec{H}_{exch}^p = \frac{A}{M_s d^2} \sum_j \hat{m}_j^p \quad (10)$$

onde j representa as células vizinhas à célula i.

2.3.2.2 CAMPO ZEEMAN

Para o Campo de Zeeman, têm-se:

$$\vec{H}_{i \text{ Zeeman}}^p = \vec{H} \quad (11)$$

Este campo, é igual em todas as células do sistema.

2.3.2.3 CAMPO DE ANISOTROPIA

O campo de anisotropia em cada célula pode ser representado pela seguinte equação:

$$\vec{H}_{i \text{ Anisotropia}}^p = \frac{2K}{M_s} \hat{m}^x \quad (12)$$

Ainda segundo Rebouças (2010), o campo de anisotropia pode ser considerado uma aproximação do campo coercivo [8].

2.3.2.4 CAMPO DIPOLAR

Para encontrar o campo dipolar, e considerando-se $p = x$, da seguinte forma:

$$\vec{H}_i^x = M_s \sum_k \left(\frac{3 n_{ik}^x (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^x}{n_{ik}^3} \right) \quad (13)$$

Da mesma forma é possível encontrar as relações para $p = y$ e $p = z$:

$$\vec{H}_i^y = M_s \sum_k \left(\frac{3 n_{ik}^y (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^y}{n_{ik}^3} \right) \quad (14)$$

$$\vec{H}_i^z = M_s \sum_k \left(\frac{3 n_{ik}^z (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^z}{n_{ik}^3} \right) \quad (15)$$

2.3.3 TORQUE MAGNÉTICO

O torque magnético é o esforço feito sob os momentos magnéticos para girá-los em direção ao campo local, assim, quando os momentos magnéticos estão alinhados e o sistema em equilíbrio, o torque será o mais próximo de zero [4]. A seguinte equação, chamada de equação de ginzburg-landau, representa esse esforço:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{local} \quad (16)$$

Percebe-se que haverá equilíbrio quando a derivada da magnetização em função do tempo for igual a zero, assim, resultando em um valor constante para a magnetização [4].

2.3.4 CÉLULA DE SIMULAÇÃO

Por mais que as dimensões dos materiais trabalhados na simulação micromagnética sejam extremamente pequenas, ainda existe uma quantidade exorbitante de átomos em sua composição. Assim, todo o cálculo levando em consideração cada átomo presente e suas interações seria inviável. Então, de modo a facilitar as simulações computacionais, existem as células de simulação de tamanho d que contemplam um grande número de átomos [4].

Para a utilização da célula de simulação agir de forma consistente, sem apresentar erros consideráveis, separa-se uma parte do material onde os momentos magnéticos estão situados de forma uniforme ou quase uniforme, assim, esse volume será representado pela média desses momentos [4,8]. Um conceito importante que limita o tamanho máximo da célula é o comprimento de troca (l_{exch}) que delimita o volume onde os momentos magnéticos possuem uma variação angular muito pequena, assim representando a seção [4]. A seguinte equação expressa essa delimitação:

$$l_{exch} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}} \quad (17)$$

onde A é a rigidez de troca.

A Figura 8 apresenta um esquema da célula de simulação que facilita o entendimento do decorrido.

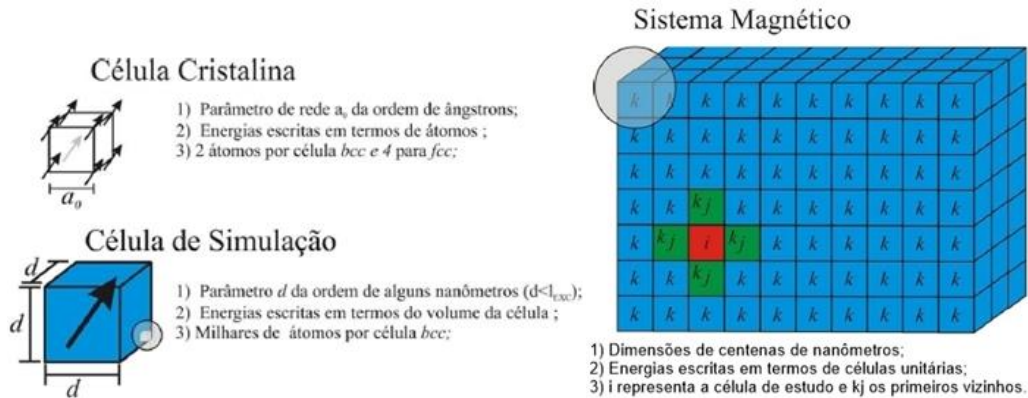


Figura 8: Esquema da Célula de Simulação (Adaptada) [8].

3. METODOLOGIA

Por meio de conceitos abordados em tópicos anteriores aplicados por métodos computacionais, este trabalho pretende analisar o comportamento de nanoelementos ferromagnéticos sob a influência de um campo magnético externo de -10 a 10 A/m, para garantir sua saturação. Assim, foram utilizadas células de simulação com dimensões fixas de 3nm x 3nm x 3nm de forma a construir materiais nanocilíndricos de diferentes dimensões.

Desta forma, foram simulados materiais de Ferro e Permalloy com o diâmetro de 60nm fixado para analisar a reação do nanoelemento acordo com a variação de sua espessura de 3nm, 6nm, 12nm, 18nm e 21nm. Espera-se então, observar e discorrer o comportamento da curva de histerese e do mapa de spins obtidos pelo resultado das simulações, assim como o domínio predominante nos materiais de estudo.

4. RESULTADOS

Os seguintes resultados apresentam uma curva de histerese para cada simulação, localizada no canto esquerdo de cada figura, onde o eixo H se refere à intensidade do campo magnético externo aplicado e o eixo M, a magnetização do material. A representação dos pontos da histerese em vermelho demonstra a sua descida e a representação em azul demonstra a subida.

Os pontos selecionados de cada gráfico da histerese estão distribuídos do lado direito das figuras, onde os domínios podem possuir uma angulação que são representadas por um gradiente de cor onde a cor avermelhada significa uma saída do plano com angulação para cima e azulada para baixo.

4.1. FERRO

Para o nanocilindro de ferro de diâmetro 60nm e espessura 3nm, os dados mostrados graficamente na Figura 9 representam os resultados obtidos:

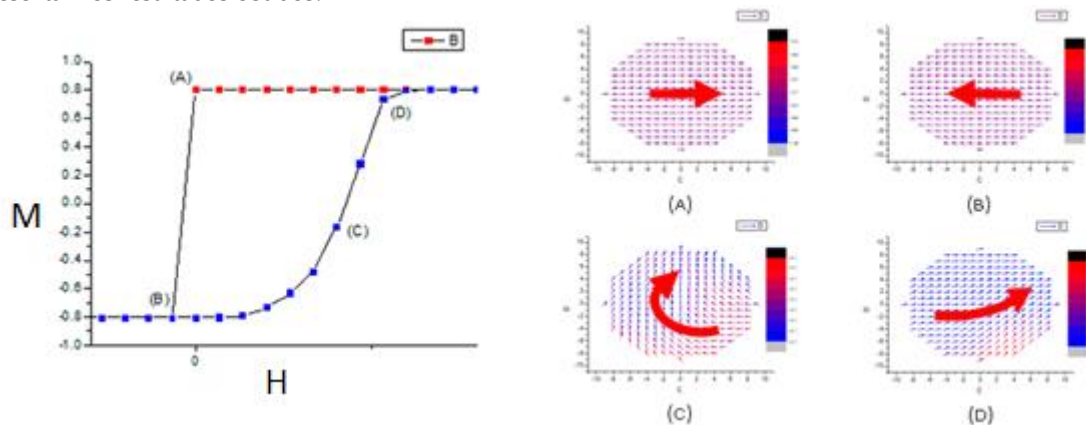


Figura 9: Resultados obtidos para o nanocilindro de Ferro de 60nm de diâmetro e 3nm de espessura.

No início da histerese da Figura 9, após a magnetização de saturação os momentos magnéticos continuam estáveis e uniformes, como mostra o Ponto A. Um pouco após da aplicação de um campo magnético negativo, os momentos se invertem quase imediatamente, resultando na magnetização de saturação vista pelo Ponto B. Mantendo-se assim até a influência de um campo externo positivo, fazendo com que o material volte a sua magnetização de saturação de forma compassada. O Ponto C mostra a perturbação dos domínios para se alinharem ao campo externo e o Ponto D o quase alinhamento deles.

A Figura 10 mostra o comportamento de um nanocilindro de ferro de diâmetro 60nm e espessura 6nm:

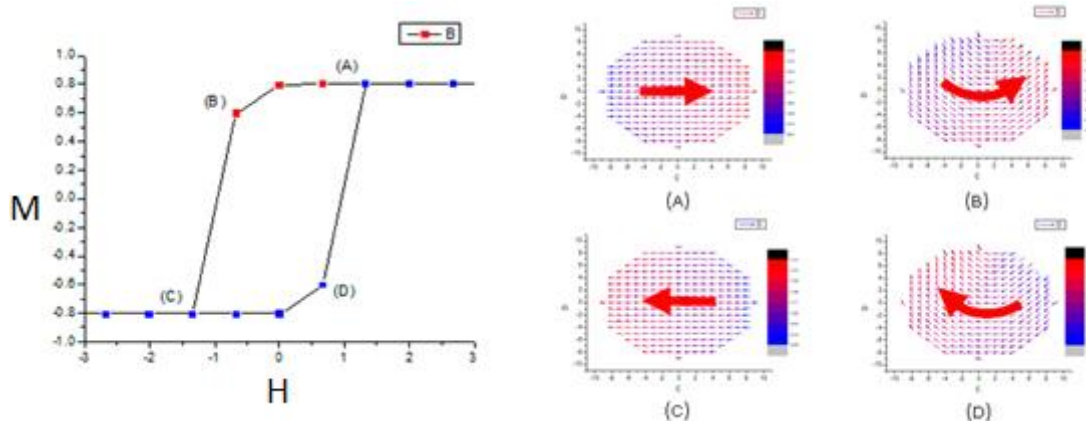


Figura 10: Resultados obtidos para o nanocilindro de Ferro de 60nm de diâmetro e 6nm de espessura.

Para a Figura 10, o Ponto A representa a magnetização de saturação do material de ferro de espessura de 6nm, que apresenta uma pequena elevação dos domínios para fora do plano na área vermelhada gráfico referente ao Ponto A e um declive na área azul. Assim, após a influência de um campo externo negativo uma pequena desordem da forma do gráfico referente ao Ponto B ocorre, até ela imediatamente se alinhar no Ponto C, mesmo que com alguns momentos elevados do plano. O mesmo que ocorre no Ponto B ocorre no Ponto D, porém de forma inversa, no sentido horário, até atingir novamente sua magnetização de saturação.

Para o mesmo diâmetro que o anterior e uma espessura de 12nm, a histerese e os spins de um nanocilindro de ferro se comportam da maneira apresentada pela Figura 11:

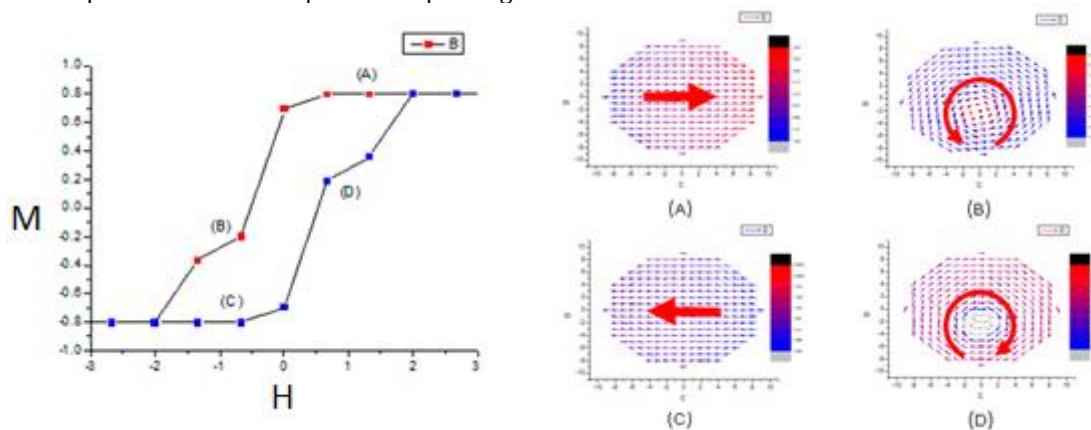


Figura 11: Resultados obtidos para o nanocilindro de Ferro de 60nm de diâmetro e 12nm de espessura.

Na figura 11, o Ponto A representa a magnetização de saturação, voltada para a direita com pequenos declives e elevações, nas áreas azuis e vermelhas, respectivamente. Após a perturbação do campo negativo para a inversão dos momentos, forma-se um vórtice na região do Ponto B, fora do centro do gráfico, com uma pequena elevação no centro do vórtice. Assim, os domínios voltam a se organizar até atingir a magnetização de saturação, que é a mesma do Ponto C. Até a influência novamente de um campo externo que irá repetir o processo, apresentando um vórtice no Ponto D no sentido inverso ao do Ponto B, até atingir novamente sua saturação. Pelo observado no gráfico de histerese a magnetização remanente é um pouco desuniforme que a de saturação, tanto na descida como na subida.

O nanocilindro de ferro de 60nm de diâmetro e 18nm de espessura se comporta da seguinte forma, mostrada pela Figura 12:

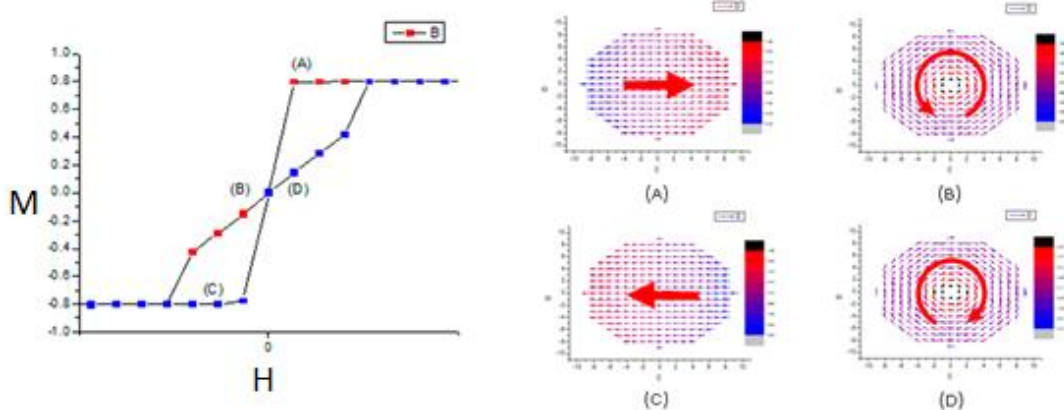


Figura 12: Resultados obtidos para o nanocilindro de Ferro de 60nm de diâmetro e 18nm de espessura.

O ponto mais notável do gráfico de histerese da Figura 12 é o Ponto B, onde após a saturação, representada pelo Ponto A ocorre uma interseção das duas partes da histerese enquanto o campo aplicado é igual a zero, resultando em um vórtice no centro do gráfico. O vórtice tende a se desfazer até atingir a magnetização de saturação, representada pelo Ponto C. Após a aplicação de um campo externo positivo o mesmo se repete, porém, desta vez o vórtice ocorre no sentido horário, como mostra a representação do mapa de spins do Ponto D.

Mantendo-se o mesmo diâmetro e aumentando a espessura do nanocilindro para 21nm, foram obtidos os resultados mostrados pela Figura 13:

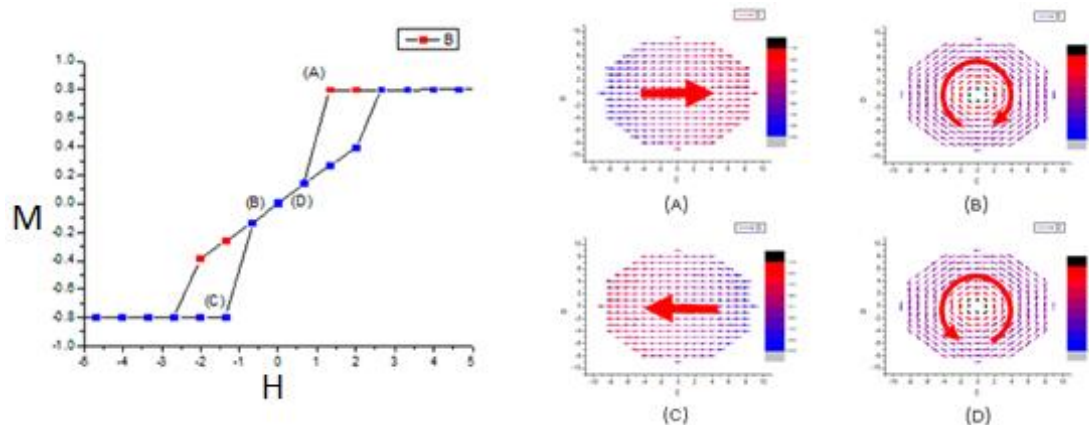


Figura 13: Resultados obtidos para o nanocilindro de Ferro de 60nm de diâmetro e 21nm de espessura.

No gráfico da histerese da Figura 13, nota-se que em comparação ao anterior (Figura 12) as curvas possuem mais pontos em comum. Sendo assim o Ponto B e D vórtices no centro que possuem sentidos contrários devido ao momento da histerese, já que um está sob influência de um campo externo negativo e outro positivo. Sendo o Ponto A e C, ambos representantes da magnetização de saturação do material.

4.2. PERMALLOY

Para o nanocilindro de permalloy de diâmetro 60nm e espessura 3nm, os dados mostrados graficamente na Figura 14 representam os resultados obtidos:

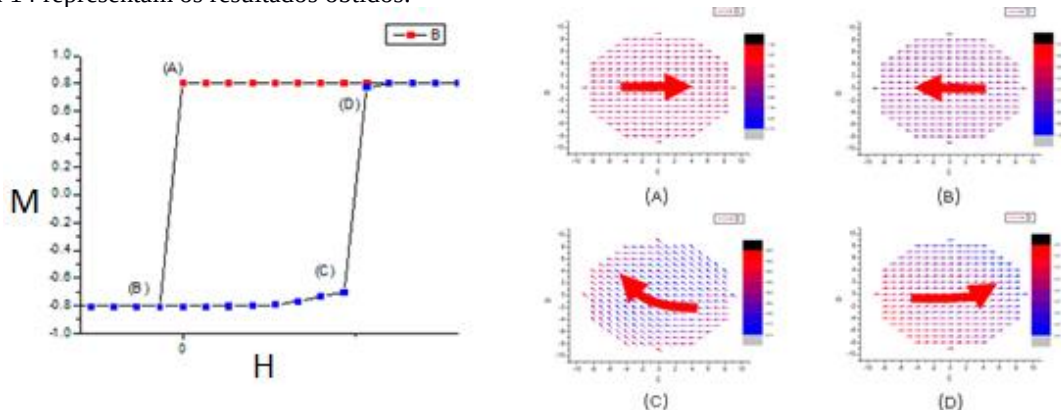


Figura 14: Resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy de 60nm de diâmetro e 3nm de espessura.

Na histerese na Figura 14, percebe-se uma magnetização remanente igual a de saturação, representada pelo Ponto A, que quase imediatamente após a influência de um campo externo tem seus momentos completamente invertidos, como mostra o gráfico referente ao Ponto B. Após a aplicação de um campo positivo, os domínios se perturbam uniformemente até chegar ao Ponto C, de onde irá ocorrer uma inversão imediata até o Ponto D, pouco antes do alinhamento dos momentos magnéticos.

O nanocilindro de permalloy de 60nm de diâmetro e 6nm de espessura se comporta da forma mostrada pelos resultados expressos na Figura 15:

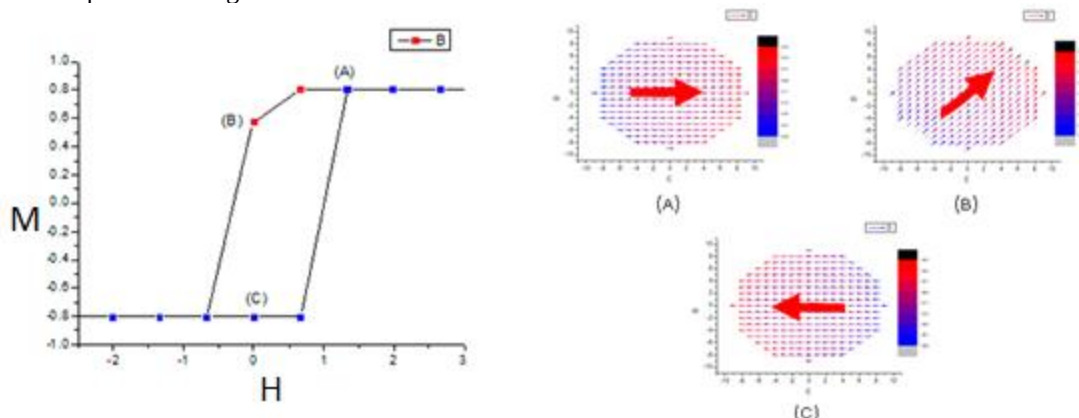


Figura 15: Resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy de 60nm de diâmetro e 6nm de espessura.

Pelo gráfico de histerese da Figura 15, percebe-se que a magnetização remanente é pouco menos uniforme que a de saturação, representada pelo Ponto A. Após a aplicação de um campo externo, tem-se uma queda uniforme, representada pelo Ponto B, onde os domínios magnéticos sofrem uma pequena perturbação até se inverterm completamente. Isso pode ser observado pelo gráfico referente ao Ponto C. Assim, pouco após a aplicação do campo positivo, os momentos voltam à sua formação inicial, no Ponto A.

Mantendo o mesmo diâmetro e aumentando a espessura para 12nm, obteve-se o resultado demonstrado pela Figura 16:

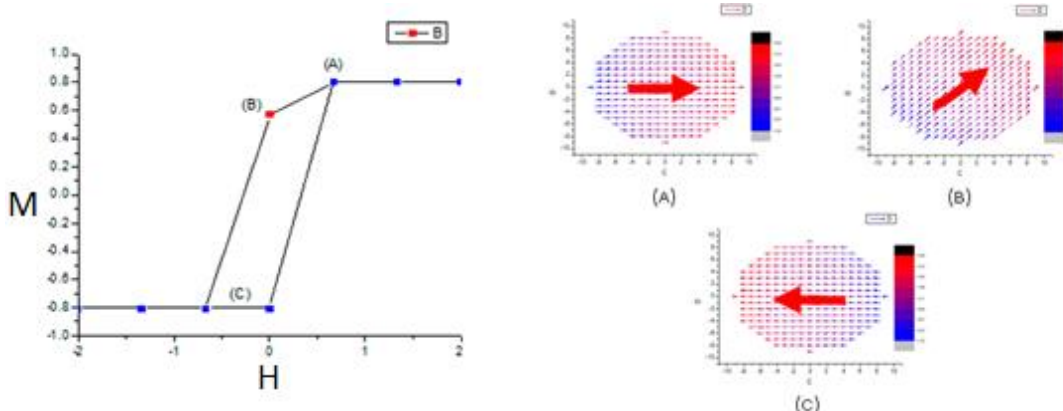


Figura 16: Resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy de 60nm de diâmetro e 12nm de espessura.

O que ocorre na curva de histerese da Figura 16 é semelhante ao que ocorreu na Figura 15. Têm-se os momentos alinhados no Ponto A, até uma pequena perturbação deixá-los da forma representada pelo gráfico referente ao Ponto B. Porém, exatamente após aplicação de um campo magnético positivo os domínios irão se inverter de forma a voltar ao formato representado pelo Ponto A.

O nanocilindro de permalloy de 60nm de diâmetro e 18nm de espessura se comporta da seguinte forma, mostrada pela Figura 17.

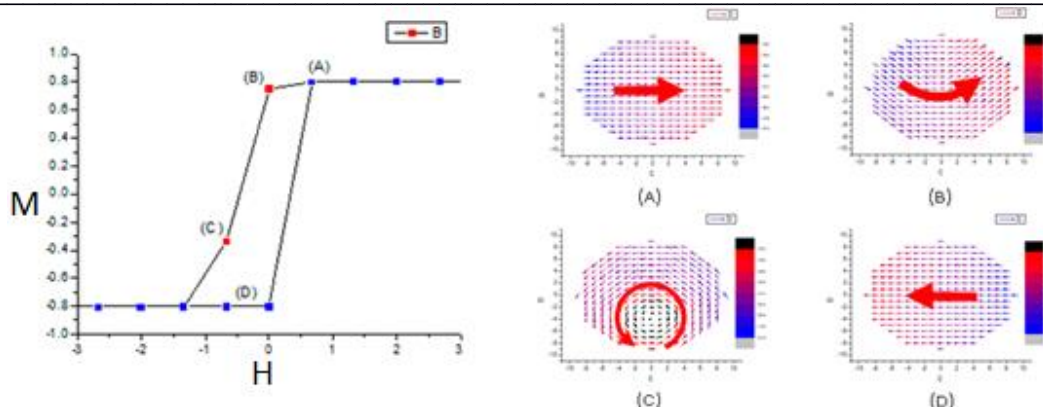


Figura 17: Resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy de 60nm de diâmetro e 18nm de espessura.

Na Figura 17, o Ponto A do gráfico da histerese representa a magnetização de saturação, que irá se desordenar uniformemente até o Ponto B, onde irá ocorrer uma queda até o Ponto C, que resultará em um vórtice fora do centro. Esse vórtice será desfeito aos poucos até chegar na magnetização de saturação que também pode ser representada pelo Ponto D. Imediatamente após a influência de um campo externo, os momentos magnéticos se invertem e atingem a magnetização de saturação novamente.

Já quando há um aumentada espessura para 21nm, mantendo fixo o diâmetro de 60nm, obtêm-se os resultados presentes na Figura 18.

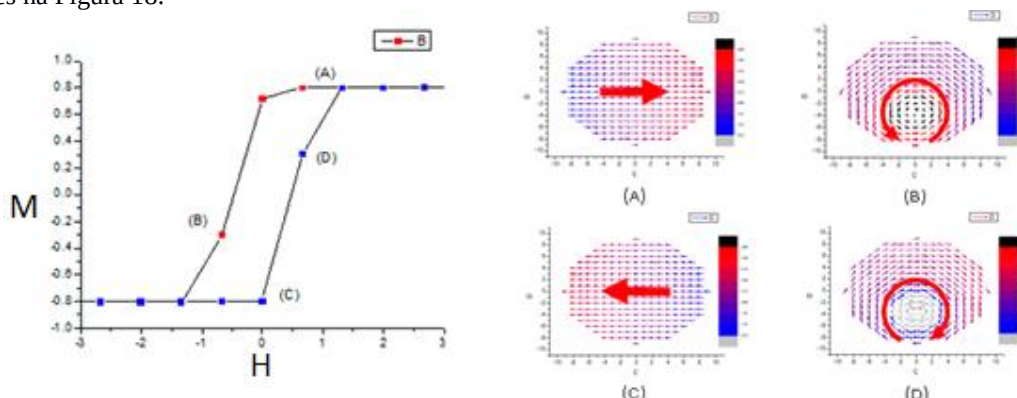


Figura 18: Resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy de 60nm de diâmetro e 21nm de espessura.

Na Figura 18, o Ponto A representa a magnetização de saturação, que desce uniformemente, atinge a sua magnetização remanente, onde o campo externo é igual a zero, e continua a descer até atingir o Ponto B. Neste ponto ocorre a formação de um vórtice fora do centro do gráfico com uma pequena elevação no ponto central. Este será desfeito até atingir sua magnetização de saturação que também pode ser representada pelo Ponto C. Após a influência de um campo externo positivo, os momentos magnéticos formam um vórtice da mesma forma do Ponto B, porém no sentido contrário e com um declive no meio do vórtice.

5. CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado neste trabalho e nos resultados obtidos, é observado que, quanto menor for a espessura, mais rápida e direta acontece a inversão dos momentos magnéticos de uma magnetização de saturação para a outra, resultando em um ciclo de histerese mais retangular. Essa característica pôde ser observada especialmente nos resultados obtidos para o nanocilindro de Permalloy. No nanocilindro de ferro se percebe uma simetria maior no ciclo de histerese, além da perda de magnetização à campo externo quando surge vórtice. Em ambos os casos se percebe uma redução da área da histerese magnética com o aumento da espessura.

Quanto ao mapa de spins de ambos materiais simulados, nota-se uma predominância do monodomínio para simulações de elementos de menor estrutura física e maior probabilidade de surgimento de vórtices a partir do momento em que a espessura vai aumentando. Também, o Ferro se mostrou mais propenso ao surgimento de vórtices já que este domínio magnético se mostrou presente desde os 12nm de espessura, enquanto o nanocilindro de Permalloy apenas apresentou essa característica a partir de uma espessura de 18nm. Isso se deve a anisotropia maior no ferro que no permalloy.

Contudo, a interação entre os nanoelementos magnéticos com um campo externo aplicado mostra que a utilização de nanocilindros de Ferro e Permalloy com menor estrutura física, apresentam monodomínio, que é de grande importância para a gravação magnética uma vez que apresenta facilidade de leitura para a forma binária. Já os elementos com espessuras maiores podem ser melhor aproveitados em equipamentos sensores por possuírem a propensão de resultarem em um vórtice.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]: CULLITY, B.D.; GRAHAM, C.D. Introduction to Magnetic Materials: 2. ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009.
- [2]: COEY, J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials: 1. ed. New York: Cambridge Press, 2009.
- [3]: NOVAK, M. Introdução ao Magnetismo. II Escola Brasileira de Magnetismo - IF – UFRJ, 1999.
- [4]: FERREIRA, Marcos Vinícius. Efeito do Acoplamento Dipolar em Nanoelementos Cilíndricos e Elípticos de Fe Aplicados à Portas Lógicas Magnéticas. 2017. 130f. Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Mossoró, 2017.
- [5]: VILLATE, J.E. Eletricidade, Magnetismo e Circuitos: 1. ed. Stanford: Creative Commons, 2016.
- [6]: PIROTA, K.R. Introdução ao nanomagnetismo. 2009. 30f. Escola Brasileira de Magnetismo, Natal, 2009.
- [7]: CALLISTER, W.D.; RETHWISCH D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 8 ed. USA: John Wiley & Sons. Inc., 2009.
- [8]: REBOUÇAS, G. Nucleação de Vórtices e Paredes de Domínio em Nanoestruturas Magnéticas. 2010. 128f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- [9]: MAGNEETILINE MÁLU. Disponível em: <<http://mateeriaharutus.blogspot.com/2011/08/magneetiline-malu.html>>. Acesso em: 09 set. 2018.



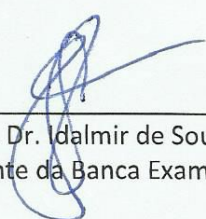
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO - MEC
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO - UFERSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA



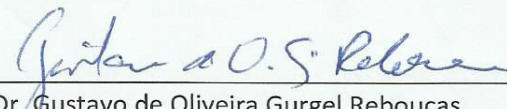
ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 14:00 horas do dia Quatorze de setembro de dois mil e dezoito, no Laboratório de Microondas-CITEd, Campus Central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA/Mossoró/RN, reuniu-se a banca examinadora de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de autoria de **AMANNDA LAÍS FAHEINA AGRA**, aluna do curso de Ciência e Tecnologia desta instituição, com o título **ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE NANOELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES**. A banca examinadora foi composta pelo Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso, Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Gurgel Rebouças e Eng. Daniel Pablo Dantas Diógenes, membros da banca examinadora. Foram registradas as seguintes ocorrências: Sem ocorrências. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, tendo a aluna obtido as seguintes notas: 10,0 (Dez) como primeira nota, 9,0 (Nove) como segunda nota e 9,5 (Nove vírgula cinco) como terceira nota. Apuradas as notas verificou-se que **a aluna foi Aprovada com média geral 10,0 (Dez) cumprindo as exigências para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso**. Para constar, eu, Idalmir de Souza Queiroz Júnior, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso da aluna autora do trabalho, lavrei a presente ata que, após lida e considerada conforme, segue assinada pelos professores membros da banca.

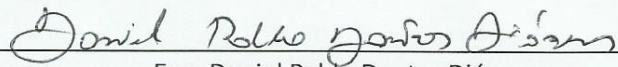
Mossoró, 14 de setembro de 2018.



Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior
Presidente da Banca Examinadora e Orientador



Prof. Dr. Gustavo de Oliveira Gurgel Rebouças
Membro da Banca Examinadora



Eng. Daniel Pablo Dantas Diógenes
Membro da Banca Examinadora