

ESTUDO DO CAMPO DIPOLAR ENTRE NANOELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES.

Clara Leticia de Sousa Carvalho¹, Idalmir de Souza Queiroz Júnior², Stefany Kariny dos Santos de Souza Queiroz³

Resumo: O nanomagnetismo trata do estudo físico de elementos da escala não visível, de tamanhos entre 1 e algumas centenas de nanômetros, constituindo uma área crescente em termos de pesquisa, uma vez que abrange desde a medicina até a computação. A descoberta de novos fenômenos e materiais da área de nanotecnologia desperta a iniciativa científica de otimizar tecnologias existentes e diminuir dimensões. Sabendo disso, esse trabalho pretende entender, através de ferramentas computacionais, o comportamento do campo dipolar de nanocilindros de Ferro e Permalloy quando expostos a um campo magnético externo e distinguir seu comportamento magnético. A compreensão do campo dipolar é fundamental para compreender as diversas fases magnéticas que surgem em nanoestruturas magnéticas, como a fase de monodomínio e de vórtice.

Palavras-chave: nanotecnologia; nanomagnetismo; campo dipolar.

1. INTRODUÇÃO

O progresso da tecnologia traz consigo a demanda pela melhoria dos produtos do mercado mundial. Com isso, há pesquisas em diversas áreas do conhecimento voltadas para otimizar o que já existe e, consequentemente, melhorar a qualidade de vida. Por exemplo, há inúmeros estudos que atrelam medicina e tecnologia [1] e dão uma qualidade melhor de vida a pessoas com deficiências físicas, como o desenvolvimento de braços e pernas robóticas. Nesse contexto, uma área pertinente ao presente e ao futuro é a nanotecnologia, que é o ramo da física que engloba o estudo de elementos magnéticos em escala nanométrica (10^{-9}m) [2].

Os materiais magnéticos foram uma importante descoberta para a humanidade, sendo uma das primeiras e mais importantes descobertas, as bússolas, dando início ao estudo do campo magnético e seus impactos sobre a Terra e o espaço. Hoje, tais materiais são amplamente usados em computadores, mais especificamente em HDs, onde as informações que serão lidas e gravadas são armazenadas. Sabendo da importância de computadores para o mundo moderno e que materiais magnéticos podem ter suas propriedades manipuladas, tem-se que essa área tem o potencial de aprimorar e diminuir o tamanho das tecnologias existentes quando se entende como as informações são processadas em nanoelementos [3].

Dito isso, é importante mencionar que diferentes geometrias de materiais magnéticos possuem diferentes propriedades. Ou seja, mudando a forma e o tamanho de um elemento, a forma como sua magnetização ocorre irá mudar [4]. Logo, entender os estágios desse processo e as fases magnéticas é de extrema importância para a fabricação de novos produtos. Para isso, estuda-se a reação de elementos nanomagnéticos quando expostos a um campo magnético, uma vez que sua resposta em forma de fase magnética determina seu melhor uso. Fases de destaque são as de vórtice e de monodomínio, que podem ser atingidas ao alterar as dimensões de nanoelementos mediante aplicação e desligamento de um campo externo para magnetizar o material. Por vez, ambas as fases citadas podem ser usadas em portas lógicas, uma vez que uma direção de magnetização irá representar uma resposta enquanto seu oposto representa a resposta contrária, ou seja, a resposta binária de computadores de 0 ou 1. Dito isso, elementos da natureza do tipo monodomínio são mais usadas para portas lógicas, uma vez que são mais simples, magnetizadas em linha reta, enquanto no vórtice, a magnetização se dá na forma indicada pelo seu nome, sendo a leitura dessa informação mais complexa [4, 3].

Ainda, cita-se o campo dipolar, que se trata de um campo magnético de longo alcance que existe entre os átomos de um material magnético [4]. Nesse artigo será explorado o comportamento desse tipo de campo magnético quando as dimensões das amostras de Ferro e Permalloy são variadas. Para isso foi utilizado um programa escrito em Fortran pelo grupo de pesquisa GMMM, em que foram analisadas as interações entre os átomos do material magnético. O estudo procurou obter o estado de equilíbrio de um nanoelemento de formato cilíndrico, onde ao invés de estudar a interação entre átomos, preferiu-se estudar a interação entre um conjunto de átomos, que aqui chamaremos de célula de simulação. A célula de simulação funciona como um átomo resultante, pois substitui um conjunto de átomos que interagem de forma colaborativa e uniforme, diminuindo a quantidade

de elementos na simulação. Esse estado de equilíbrio se dá com a minimização do torque ou pela minimização da energia [3], no caso presente usamos a minimização do torque.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente tópico descreverá os fenômenos mais importantes e características influentes para a realização deste trabalho desde definições de propriedades físicas até de elementos intrínsecos ao desenvolvimento metodológico dos resultados a serem analisados.

2.1. Magnetismo

Considera-se que o magnetismo foi descoberto na Grécia antiga quando foi notado que certas pedras, chamadas de magnetita, tinham um comportamento peculiar de atrair e repelir minérios de ferro, além de que elas se orientavam em relação a Terra. Essas propriedades foram base para a invenção da bússola, um importante marco na história do magnetismo e das explorações de descobrimentos de terra [5].

Esse fenômeno surge tanto com o movimento de cargas elétricas, que ao gerar um campo magnético, surgem forças de atração ou repulsão entre os materiais, quanto já existe um campo magnético e um material é induzido a se magnetizar ao ser exposto a esse campo [5]. Cita-se ainda a importância tecnológica do magnetismo na busca por tecnologias mais avançadas com aplicações em motores elétricos, nanosensores biomagnéticos e ímãs de alto desempenho [3].

2.1.1. Campo magnético

Materiais magnéticos possuem polos magnéticos que existem sempre em pares, um denominado de Norte e o outro de Sul. Os chamados monopolos magnéticos, são análogos a cargas elétricas positivas e negativas e possuem uma interação entre si, porém, nunca foi comprovada suas existências separadas. Os polos magnéticos opostos possuem uma força de atração entre si e induzem a existência de um campo magnético, que envolve materiais magnéticos ou magnetizados e possui uma direção e um sentido. Essa região pode ser representada por linhas de força que saem do polo norte e entram no polo sul de um elemento (Figura 1) e sua intensidade é representada na Equação 1 [6].

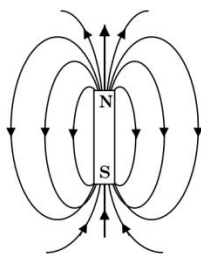


Figura 1: Demonstração de um campo magnético.

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

Onde: $\vec{F}$ é a força exercida por um polo magnético; m é a constante de proporcionalidade em relação ao polo magnético em questão e $\vec{H}$ é a intensidade do campo magnético.

2.1.2. Ímãs

Ímãs são materiais magnetizados permanentemente, sem haver a necessidade de sua magnetização por indução por um campo magnético externo. A Terra, por vez, é um exemplo de ímã. O seu interior metálico está em constante movimento e sabendo que cargas em movimento geram campo magnético, esse planeta é tido como um ímã gigante. Seu polo norte magnético se localiza próximo ao polo sul geográfico, enquanto seu polo sul magnético está próximo ao polo norte geográfico. Isso explica o funcionamento da bússola, uma vez que seu ponteiro magnetizado aponta para o polo sul magnético da Terra, logo, a leitura será seu norte geográfico [5].

2.1.3. Nanomagnetismo

O nanomagnetismo é uma parte da física que estuda os fenômenos magnéticos em escala nanométrica (de 1 a centenas de nm) para entender o que acontece além da escala visível e definir propriedades não conhecidas, mas

que podem ter uso pertinente na tecnologia moderna [7]. Suas aplicações tecnológicas podem abranger ramos como a medicina, na área oncológica, com nanoelementos nanométricos de Permalloy que se depositam em membranas de células cancerígenas e as eliminam quando os nanoelementos são expostos a oscilações de baixas frequências e baixos campos magnéticos, induzindo a morte das células por aquecimento [1]. E ainda, nanopartículas magnéticas podem constituir processos de distribuição de remédios localizada, uma vez que é possível controlar a posição da nanopartícula no corpo através de um campo magnético externo [8].

2.2. Materiais magnéticos

Os materiais magnéticos são classificados a partir da permeabilidade magnética (2) e da susceptibilidade magnética (3). A permeabilidade magnética relaciona o campo magnético no interior do material com o campo em que o material é exposto, já a susceptibilidade magnética mede a capacidade de um corpo em se magnetizar. A partir desses valores os materiais são classificados em paramagnéticos, diamagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnético, antiferromagnético entre várias outras classificações [6].

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

Onde μ é a permeabilidade magnética; $\vec{B}$ o Campo magnético interno; $\vec{H}$ o campo magnético externo.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (3)$$

Onde: χ_m é a susceptibilidade magnética; $\vec{M}$ é a magnetização do material; $\vec{H}$ o campo magnético externo.

2.2.1. Momentos magnéticos

Os momentos magnéticos existentes em um material magnético, são elementos reais que quando exposto a um campo magnético adquirem um torque. Nessa situação, o torque magnético associado a esse material é representada pela Equação 4 [5, 6].

$$\vec{\tau} = -\vec{\mu} \times \vec{H} \quad (4)$$

Onde: $\vec{\tau}$ é o torque magnético; $\vec{\mu}$ o momento magnético (diferente de μ - permeabilidade magnética); $\vec{H}$ é o campo magnético externo ao material.

Em um material magnético macroscópico há uma magnetização resultante das minúsculas magnetizações de cada átomo, ou pequeno volume de momentos magnéticos, que resultará na Magnetização total do material (5) [6].

$$\vec{M} = \sum \vec{\mu}_i / V \quad (5)$$

Onde: $\vec{M}$ é a magnetização; $\vec{\mu}_i$ o momento magnético; V o volume ocupado.

2.2.2. Paramagnetismo

Os materiais paramagnéticos se caracterizam por possuírem susceptibilidade baixa, positiva e dependente da temperatura, por exemplo o alumínio (Al). Quando são expostos a um campo magnético, os momentos magnéticos anteriormente distribuídos aleatoriamente no material e possuindo uma magnetização nula, tendem a alinhar-se com o campo, resultando em uma magnetização não nula de mesmo valor desse campo. Essa magnetização volta a anular-se quando o campo magnético externo é desligado [5, 6].

2.2.3. Diamagnetismo

Materiais diamagnéticos possuem magnetização induzida contrária a um campo magnético externo, porém proporcional a ele, uma vez que sua susceptibilidade magnética é pequena, negativa e independente da temperatura, por exemplo o cobre (Cu). O material se organizará de forma a cancelar a tentativa de indução magnética pelo campo magnético externo. Essa magnetização volta a anular-se quando o campo magnético externo é desligado [5, 6].

2.2.4. Ferromagnetismo

Ferromagnetos são materiais que são independentes de campo externo para a formação de domínios magnéticos, que são regiões em que há o alinhamento de momentos magnéticos dos átomos. São encontrados dessa forma na natureza, e alguns de seus exemplos são o ferro (Fe), o níquel (Ni) e o cobalto (Co). Apesar de não haver a necessidade de expor esses elementos a um campo externo para haver sua magnetização, quando há essa exposição, os momentos magnéticos alinham-se paralelamente a ele, deslocando as paredes das regiões de domínio. Se essa ação for contínua, aumentando sua intensidade, o material será quase que inteiramente magnetizado até que em um momento ocorre a magnetização de saturação e ela não muda mais [5, 6].

2.3. Curva de histerese

A curva de histerese magnética descreve o comportamento da magnetização quando exposta a um campo externo levando em conta sempre seu estado anterior. A magnetização tomará caminhos diferentes quando o campo aumenta e quando diminui, representada no gráfico da Figura 2 [3, 4].

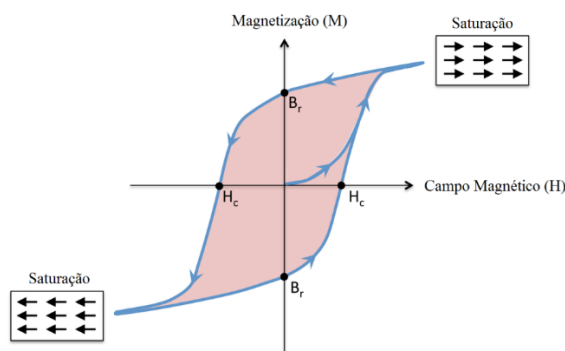


Figura 2: Gráfico de uma histerese magnética qualquer.

2.3.1. Remanência

A remanência, indicada por B_r na Figura 2, se trata da magnetização residual do material quando o campo externo é desligado a partir de seu ponto de saturação. Uma aplicação desse conhecimento está na gravação do bit em um HD, uma vez que quando não exposto a um campo o material já tendo uma magnetização, pode ser lida [3, 4].

2.3.2. Coercividade

A coercividade, indicada por H_c na Figura 2, se trata do campo magnético necessário para anular a magnetização existente, ou seja, é o campo em que a reversão magnética de uma saturação positiva para negativa ocorre [3, 4].

2.4. Células de simulação

Tudo que existe é feito de átomos, cujas dimensões são muito pequenas comparadas às dimensões do mundo macroscópico que os seres humanos estão acostumados a notar. Porém, para estudar o mundo microscópico há a necessidade de determinar o comportamento de elementos tão pequenos como átomos. Essa análise seria bastante exaustiva caso cada átomo fosse tomado e estudado de um em um, levando um tempo muito longo para que os cálculos de pequenas amostras fossem feitas. Dessa forma, foi criado o conceito de célula de simulação, que trata de um aglomerado de átomos próximos que se comportam de forma semelhante em relação a seus momentos magnéticos. Esse número de átomos e, consequentemente, o tamanho de uma célula de simulação dependerá do conjunto de átomos em questão [4].

Há dois parâmetros essenciais para a adoção de uma célula de simulação: o comprimento de troca e o comprimento de parede de domínio. O primeiro se trata da máxima dimensão que a célula pode ter para que suas interações internas não superem as interações externas. Já o segundo, Figura 3, trata basicamente da região de transição entre duas células de simulação. Na prática, a parede de domínio, não é algo físico onde é clara a distinção entre uma célula de simulação e a seguinte, mas uma região onde as magnetizações estão em transição de um estado para outro [3].

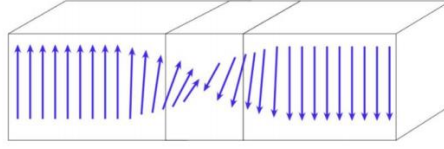


Figura 3: Parede de domínio entre duas regiões de domínio magnético [2].

2.5. Energias

As interações magnéticas na forma de energias magnéticas são cruciais para determinar como um material é configurado, logo, deve-se entender seu conceito e aplicação para o mais claro aprofundamento sobre a natureza de cada elemento magnético. Essas energias são: Energia de troca magnética, Energia Zeeman, Energia de Anisotropia e Energia Dipolar magnética.

2.5.1. Energia de troca

Essa energia se trata da energia trocada entre um átomo e seus vizinhos e ela é representada, segundo Heisenberg, pela somatória da interação dos spins desses átomos com os seus próximos. Quando se trata de células de simulação, a densidade volumétrica da energia de troca entre duas células cúbicas de lado δ é representada pela Equação 6 [4].

$$E_{troca} = - \sum_{i,j} J_{i,j} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (6)$$

Onde: onde i e j são as posições dos átomos; S_i representa os momentos magnéticos; $J_{i,j}$ é a integral de troca.

2.5.2. Energia Zeeman

A energia que aponta a relação entre o campo externo e o momento magnético da célula de simulação é a Energia Zeeman, Equação 7, uma vez que os momentos magnéticos ao serem influenciados por um campo, determinam sua magnetização. Essa energia se mostra mínima quando os devidos vetores dos momentos e do campo possuem o mesmo sentido e a mesma direção [3].

$$E_{Zeeman} = -\vec{H} \cdot M_s V \sum_i \vec{S}_i \quad (7)$$

Onde: M_s é a magnetização de saturação; $\vec{H}$ o campo magnético externo; V o volume; S_i representa os momentos magnéticos.

2.5.3. Energia de Anisotropia

A anisotropia magnética se trata da energia relacionada com a orientação dos momentos magnéticos de um elemento em relação a seu eixo cristalino. Existe a energia de fácil magnetização, que é aquela de menor energia quando os momentos magnéticos estão alinhados com o eixo cristalino; e a energia de difícil magnetização, que se trata da energia necessária para que os momentos tenham outro alinhamento senão aquele de fácil magnetização. Essa energia é dependente do tipo de material analisado, uma vez que existem diferentes tipos de estruturas cristalinas, assim como diferentes materiais que as constituem [3]. Essa energia é representada pela Equação 8.

$$E_a = -KV \sum_i (\vec{S}_i)^2 \quad (8)$$

Onde: K é a constante de anisotropia; V o volume; S_i representa os momentos magnéticos.

2.5.4. Energia Dipolar

A Energia Dipolar relaciona um átomo com todos os átomos em um determinado volume. Trata-se da somatória das relações de momentos magnéticos entre um átomo com os demais [3] e é dada pela Equação 9.

$$E_d = \frac{M_s^2 V^2}{2} \sum_{i,k} \left(\frac{\vec{S}_i \cdot \vec{S}_k}{r_{ik}^3} - \frac{3(\vec{S}_i \cdot \vec{r}_{ik})(\vec{S}_k \cdot \vec{r}_{ik})}{r_{ik}^5} \right) \quad (9)$$

Onde: M_s é a magnetização de saturação; V o volume; $\vec{r}_{ik}$ a distância entre os momentos magnéticos nas posições i e k ; S_i representa os momentos magnéticos.

2.6. Campo médio local

O campo médio local de uma célula de simulação é obtido da relação de divergência entre as energias supracitadas e o seu momento magnético local, Equação 10. Essa relação depende do somatório de quatro tipos de campos diferentes, que serão levantados para o entendimento de sua importância e atuação em um sistema de células magnéticas [3, 4].

$$\vec{H}_i^p = - \frac{1}{M_s} \frac{\partial E_T}{\partial \hat{m}_i^p} \quad (10)$$

Onde: $\hat{m}_i^p$ representa a magnetização local na célula i ; M_s é a magnetização de saturação; E_T é a energia da célula de simulação i ; j representa as células vizinhas.

2.6.1. Campo de troca

O campo de troca se diz respeito quando se trata de células de simulação do campo magnético entre células vizinhas [3] e é representado pela Equação 11.

$$\vec{H}_{i \text{ troca}}^p = \frac{A}{M_s d^2} \sum_j \hat{m}_j^p \quad (11)$$

Onde: $\hat{m}_i^p$ representa a magnetização local na célula i ; M_s é a magnetização de saturação; d é a dimensão da célula de simulação; j representa as células vizinhas.

2.6.2. Campo Zeeman

O Campo Zeeman representa o campo externo, de modo a atuar em todas as células de simulação com a mesma intensidade [3]. Isso pode ser observado na Equação 12.

$$\vec{H}_{i \text{ Zeeman}}^p = \vec{H} \quad (12)$$

Onde: $\vec{H}_{i \text{ Zeeman}}^p$ é o campo Zeeman; $\vec{H}$ é o campo externo.

2.6.3. Campo de anisotropia

Sabe-se que o eixo de fácil magnetização se diz respeito ao eixo em que os momentos magnéticos se alinharão de forma a estar em seu menor estado energético. O campo de anisotropia equivale aos valores máximos possíveis de magnetização sobre esse eixo fácil. É representado pela Equação 13 e é uma eficaz aproximação do campo coercivo [3, 4].

$$\vec{H}_{i \text{ Anisotropia}}^p = \frac{2K}{M_s} \hat{m}^x \quad (13)$$

Onde: $\hat{m}^x$ representa a magnetização local na direção x ; M_s é a magnetização de saturação.

2.6.4 Campo dipolar

Cada célula de simulação possui uma influência sobre todas as outras células de um sistema e o campo magnético que faz essa relação é o campo dipolar. Trata-se do somatório dos comportamentos do campo de uma célula sobre as demais e é representado pelas Equações 14 a 16 nas direções x , y e z , respectivamente [4].

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

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

$$\vec{H}_i^z = M_s \sum_k \left(\frac{3 n_{ik}^z (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^z}{n_{ik}^3} \right) \quad (16)$$

2.7. Torque

O estado magnético almejado é de menor energia possível e isso é adquirido quando o torque de uma célula de simulação é mínimo. Para isso os momentos magnéticos devem estar alinhados com o campo externo do sistema analisado. A Equação 17 descreve essa relação e pode-se observar que ao atingir o menor torque possível, a magnetização será a mais constante possível [3].

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H}_{local} \quad (17)$$

3. METODOLOGIA

Para este trabalho foram usadas ferramentas computacionais que permitiram fazer os cálculos necessários à análise da histerese de cada material analisado, Ferro e Permalloy. Foram eles o ambiente de programação Fortran, Force 2.0, e o Origin 9, este responsável pelos gráficos pertinentes à análise almejada e aquele teve a função de fazer todos os cálculos necessário, como os cálculos das energias, torque e pontos da histerese.

3.1. Force 2.0

O software Force 2.0 foi usado para compilar um programa em linguagem Fortran de nanocilindros a fim de estudar o comportamento da histerese e campo dipolar dos materiais em questão, Ferro e Permalloy, quando suas dimensões foram alteradas.

Os parâmetros de campo externo e dimensões do nanocilindros da célula de simulação eram editáveis, porém apenas as dimensões em x, y e z foram alteradas. Esses valores diziam respeito à altura, largura e raio do nanocilindro, formado por várias células de simulação. Sabendo disso, os valores inseridos no programa eram em função da medida da célula de simulação cúbica, que possuía 3nm de altura, 3nm de comprimento e 3nm de largura, de modo que a dimensão inserida no programa deveria ser 6 para conseguir um valor de 18nm para certa dimensão, uma vez que 6 vezes 3 é 18 (Figura 5).

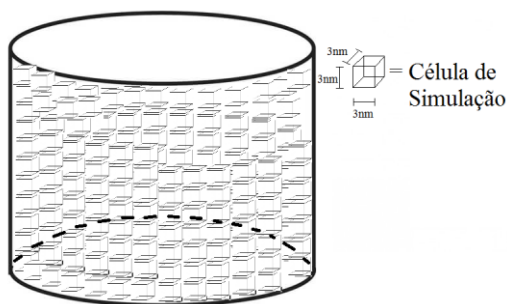


Figura 4: Nanocilindro composto por células de simulação (Autoria própria).

Foram feitos 4 simulações para o Ferro e 4 para o Permalloy com um campo externo variando de -10 Oe a 10 Oe. Esses valores são referentes tanto às simulações do Ferro e do Permalloy.

O programa usado para os cálculos em questão foi desenvolvido pelo GMMM (Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e tem como objetivo atingir um menor torque possível. Assim, a princípio, os momentos de dipolo magnético devem estar alinhados com o campo magnético externo para que o programa comece a ser simulado no Force 2.0 a partir das seguintes etapas [3, 4]:

- Inicializamos o sistema com uma determinada configuração magnética.
- Calculamos o campo magnético efetivo local sobre cada célula de simulação.
- Comparamos o valor calculado para a configuração magnética obtida pela Equação do torque magnético em relação a uma dada tolerância.
- Se o valor do torque magnético for menor ou igual à tolerância, aceitamos a configuração.
- Se o torque for maior do que o valor de tolerância, os momentos são alinhados com o campo magnético efetivo local e retornamos ao segundo passo.
- O cálculo é repetido até que o torque magnético seja inferior a tolerância ou até que o número de interações chegue ao seu limite.

3.2. Origin 9

No software Origin 9 foram extraídos séries de documentos originados do Force 2.0 para a plotagem de gráficos da curva de histerese e campo dipolar, o que permite observar o comportamento das amostras de materiais para cada dimensão alterada. Cada gráfico em questão tem informações pertinentes ao entendimento do magnetismo nesses elementos e isso será explorado nos resultados de modo a entender como a histerese e o campo dipolar se comportam no contexto de nanoelementos planares.

4. Resultados e discussões

Os resultados do programa desenvolvido pelo GMMM e compilado no Force 2.0 ao serem inseridos no Origin 9 possibilitaram a plotagem dos gráficos correspondentes à histerese magnética e aos gráficos do campo dipolar de nanoelementos cilíndricos magnéticos de Ferro e Permalloy quando suas dimensões foram alteradas. Esses resultados serão discutidos nos seguintes tópicos.

4.1. Ferro

Os gráficos das Figuras 5 a 8 distinguem o comportamento da histerese magnética e do campo dipolar nos pontos de saturação e de magnetização nula de um nanocilindro de Ferro, a partir de pontos obtidos da histerese magnética com 60nm de diâmetro, admitindo os valores de 3nm, 6nm, 18nm e 21nm de espessura. Essa análise é auxiliada pelo gradiente de cores usadas ao lado dos gráficos para informar em radianos a angulação tomada pelas linhas de campo.

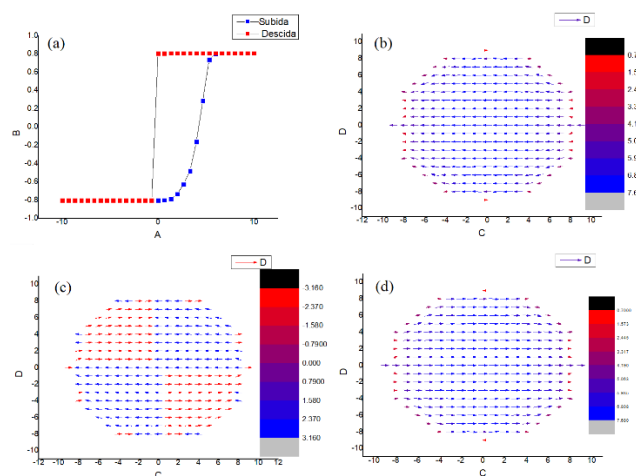


Figura 5: Nanocilindro de Ferro com 60nm de diâmetro e 3nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possívl. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

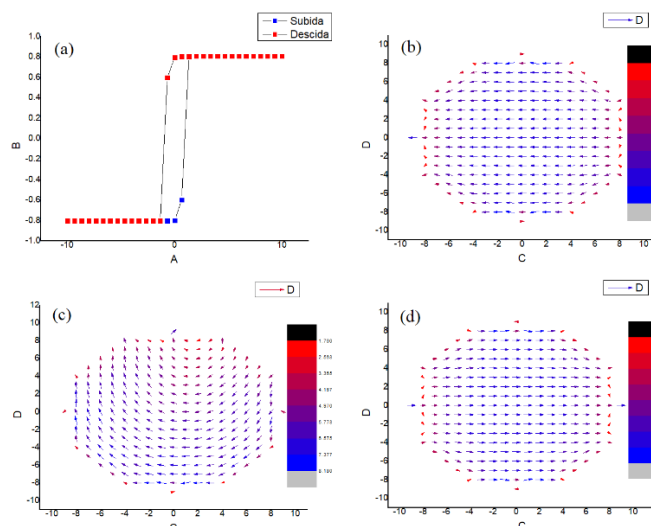


Figura 6: Nanocilindro de Ferro com 60nm de diâmetro e 6nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possívl. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

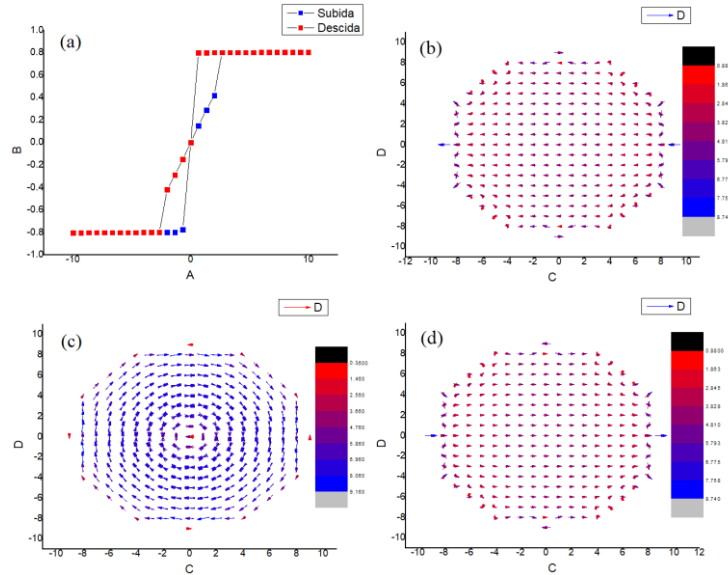


Figura 7: Nanocilindro de Ferro com 60nm de diâmetro e 18nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possívl. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

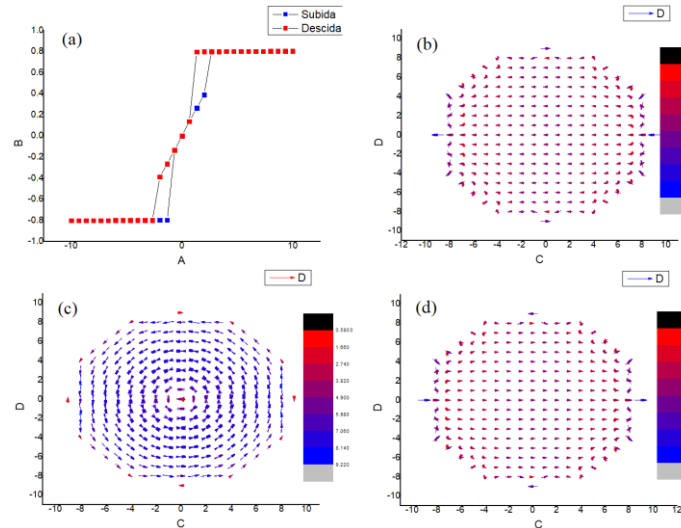


Figura 8: Nanocilindro de Ferro com 60nm de diâmetro e 21nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possívl. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

Na Figura 5, onde a espessura possui um valor de 3nm, observa-se que no gráfico (a) da histerese magnética a maioria dos 31 pontos plotados na curva estão alinhados na saturação. Foram admitidos 1 ponto na saturação positiva e 1 ponto da saturação negativa e plotados os gráficos (b) e (d) respectivamente para a análise do campo dipolar nesses locais. Dito isso, o campo está quase que completamente voltados para um só sentido, exceto na ponta superior e na ponta inferior do gráfico, porém sua angulação de incidência se difere nas bordas do gráfico. Já no gráfico (c), o campo dipolar é metade voltado para um sentido e metade voltado para outro. Além disso, as angulações de uma metade, representadas pela cor azul, anulam a angulação da outra metade, representada pela cor vermelha.

A Figura 6, onde a espessura em questão tem o valor de 6nm, apresenta no gráfico (a) quase todos dos 31 pontos analisados da histerese alinhados com o campo de saturação, observando que apenas dois pontos se aproximaram da magnetização nula, mas ainda ficaram em torno de uma magnetização alta. Porém, o campo dipolar foi observado no ponto de subida mais próximo possível da magnetização, no gráfico (c) e o observado foi uma disposição do campo dipolar em formato de C. Já nos pontos de saturação de magnetização, nota-se que o campo dipolar tanto na saturação positiva, gráfico (b), quanto na negativa, gráfico (d), estão quase que inteiramente voltados para um só sentido, exceto nas bordas do gráfico.

A Figura 7 apresenta os gráficos referentes a um nanocilindro de Ferro de 18nm de espessura e já é perceptível uma diferença inicial entre os demais gráficos dos nanocilindros de espessura de 3nm e 6nm. A histerese, representada pelo gráfico (a) apresenta um cruzamento invés de um formato próximo do retangular. Os gráficos do campo dipolar de saturação representados nos gráficos (b) e (d), também se diferem ao apresentarem um sutil aumento na variação das angulações do campo, além de valores médios na faixa de 4.810 rad. Além disso, o campo nas bordas se mostra mais irregular que nos nanocilindros de espessura menor. Ainda, o campo dipolar na saturação magnética se apresenta no formato de vórtice com angulação variando de 0.3600 rad até 9.160. Valores próximos de 0.3600 rad encontrados nas extremidades, valores próximos de 9.160 rad encontrados na maioria do campo e em seu meio, a angulação se aproxima de 4.760 rad.

Por fim, a Figura 8 apresenta a análise gráfica do nanocilindro de Ferro de 21nm de espessura. O comportamento do campo dipolar na saturação e na magnetização nula se assemelhou com o comportamento do nanocilindro de 18nm, uma vez que ambos possuem campo dipolar em formato de vórtice na magnetização nula, demonstrado no gráfico (c) e campos dipolares irregulares nas bordas, porém apontando em um só sentido.

4.2. Permalloy

Os gráficos das Figuras 9 a 12 distinguem o comportamento do campo dipolar nos pontos de saturação e de magnetização nula de um nanocilindro de Permalloy, encontrados a partir da histerese magnética desses elementos, com 60nm de diâmetro e espessura que varia em cada Figura, admitindo os valores de 3nm, 6nm, 18nm e 21nm. Essa análise é auxiliada pelo gradiente de cores usadas ao lado dos gráficos para informar em radianos a angulação tomada pelas linhas de campo.

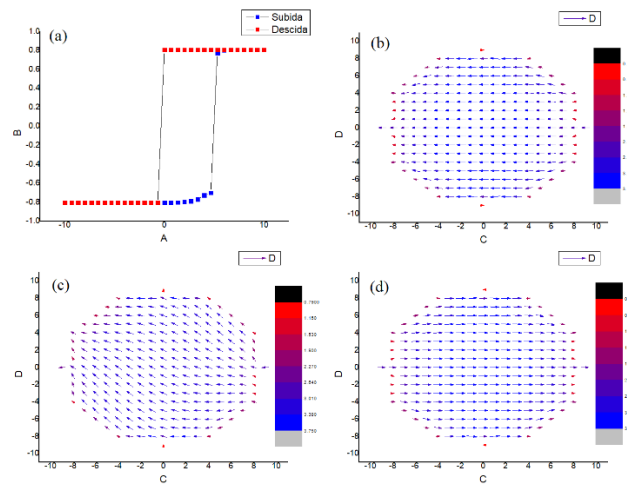


Figura 9: Nanocilindro de Permalloy com 60nm de diâmetro e 3nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possível. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

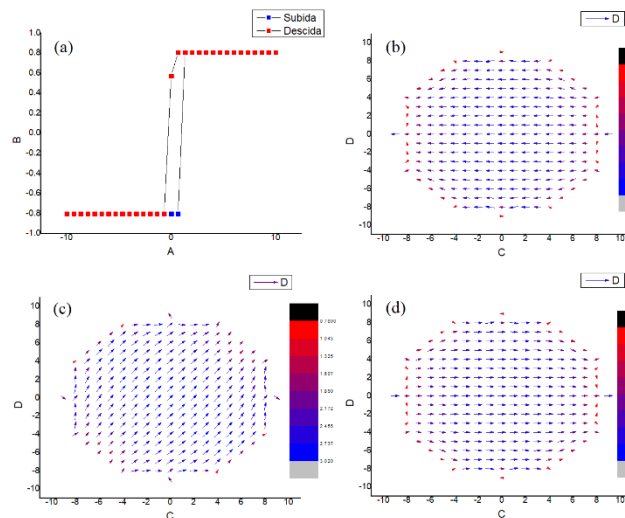


Figura 10: Nanocilindro de Permalloy com 60nm de diâmetro e 6nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possível. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

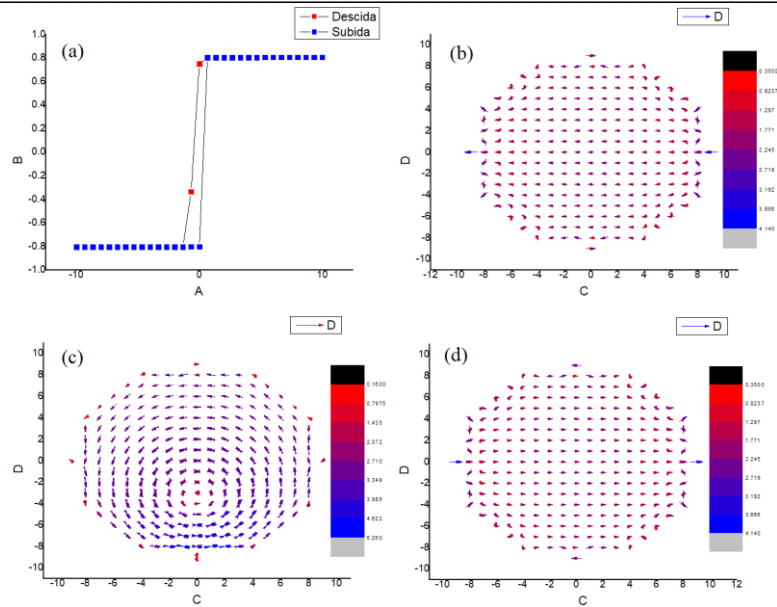


Figura 11: Nanocilindro de Permalloy com 60nm de diâmetro e 18nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possível. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

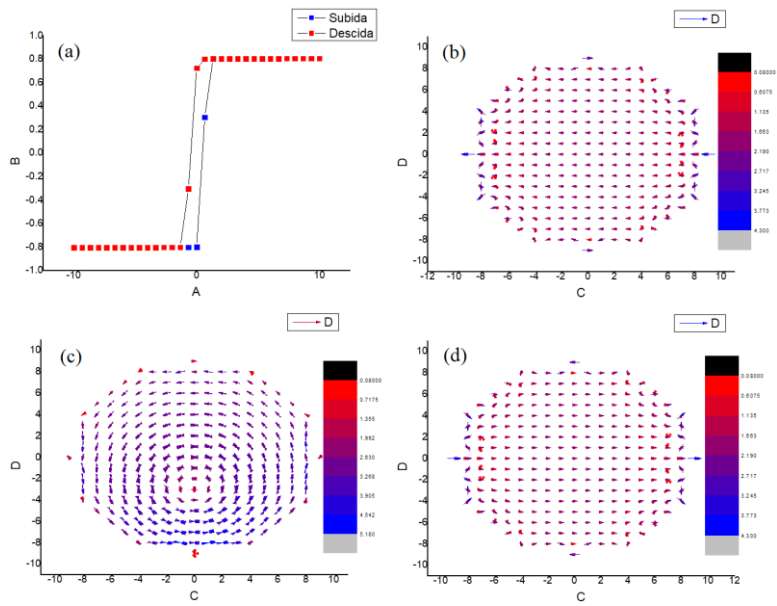


Figura 12: Nanocilindro de Permalloy com 60nm de diâmetro e 21nm de espessura. (a) Histerese magnética. (b) Campo dipolar na saturação magnética positiva. (c) Campo dipolar quando a magnetização é o mais próximo do nulo possível. (d) Campo dipolar na saturação magnética negativa.

A Figura 9 se refere a um nanocilindro de Permalloy com espessura de 3nm e observa-se no gráfico (a) que a histerese é quase retangular, típica de elementos magnéticos pequenos, além de não apresentar pontos próximos da saturação, então a análise mais próxima da magnetização nula, mostrada no gráfico (c), apresentou sentidos variados porém regulares além de angulação de campo regular perto de 3.750 rad, porém as fronteiras do campo apresentam linhas de força com sentidos quase normais aos demais na parte superior e inferior e paralelo ao eixo x do gráfico nas regiões posterior e anterior. Ainda, observa um forte alinhamento do campo dipolar nas regiões de saturação. Esses campos foram representados pelos gráficos (b) e (d) e apresentam regularidade em seu interior, diferentemente de suas extremidades, que possuem linhas de força irregulares e de angulação menor que a do interior do campo.

O nanocilindro de Permalloy cujo diâmetro tem um valor de espessura de 6nm tem seu campo dipolar representado na Figura 10, em que foi analisado nos gráficos (b) e (d) que as linhas de força apesar de possuírem uma regularidade de sentido, além de serem irregulares nas extremidades, possuem uma maior região de sua borda

em que a angulação das linhas de força se diferem e variam em relação à angulação da maior parte do nanoelemento. Além disso, foi admitido o ponto mais próximo possível da magnetização nula, porém ela não foi tão próxima o suficiente para o campo dipolar se anular. Observa-se, então, o campo majoritariamente na direção diagonal superior direita, enquanto suas bordas apresentam irregularidades de sentido e angulação.

Na Figura 11, de espessura 18nm em um nanocilindro de Permalloy apresentou um campo dipolar em forma de vórtice, como pode ser observado no gráfico (c). Essa informação é referente a um ponto próximo da magnetização nula a partir da histerese magnética, gráfico (a), cujas paredes são próximas, porém o formato se assemelha a um retângulo deformado. O vórtice apresenta angulação no campo que se destaca em suas bordas e em seu meio. Além disso, o campo dipolar de saturação, tanto positiva quanto negativa, estão nos gráficos (b) e (d) e possuem bordas onde o campo apresenta irregularidade e uma região significativa onde a angulação variam.

Por se tratar de uma espessura maior, os campos dipolares observados na Figura 12 possuem maior irregularidade em relação tanto a suas bordas quanto a sua angulação, o que é observado nos gráficos do campo dipolar de saturação, (b) e (d). Ainda, observa-se no gráfico (c) que o campo dipolar tem formato de vórtice e possui angulações mais bruscas que o nanocilindro de 18nm.

5. Conclusão

Neste artigo foi estudado o comportamento do campo dipolar em nanocilindros de Ferro e Permalloy a partir de simulações computacionais com os programas Force 2.0 e Origin 9. A partir dessas simulações foi possível observar gráficos do campo dipolar na saturação magnética e próximo de sua anulação e analisar seu comportamento em materiais diferentes com as mesmas dimensões.

Percebe-se que o campo dipolar na maioria das vezes tem o mesmo comportamento que os momentos magnéticos, e neste caso ele predomina, porém em alguns casos o comportamento é diferente, sendo, então a fase magnética resultante dominada pelo comportamento de outras interações magnéticas.

Referências

- [1]: GOIRIENA-GOIKOETXEA, M. et al. High-yield fabrication of 60nm Permalloy nanodiscs in well-defined magnetic vortex state for biomedical applications. 2016. 10f. 10p Publishing, Espanha, 2016.
- [2]: PIROTA, K.R. Introdução ao nanomagnetismo. 2009. 30f. Escola Brasileira de Magnetismo, Natal, 2009.
- [3]: 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.
- [4]: 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.
- [5]: YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A., FÍSICA III - Eletromagnetismo, 14a ed. São Paulo, Addison Wesley, 2015.
- [6]: NOVAK, M. Introdução ao Magnetismo. II Escola Brasileira de Magnetismo - IF – UFRJ, 1999.
- [7]: IGARASHI, Ricardo. Estudo teórico de nanoestruturas magnéticas em superfícies metálicas. 2012. 122f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [8]: TARASOV, V. P.; NESMEYANOV, M. S.; USOV, N. A. Magnetic Vortices as Efficient Nano Heaters in Magnetic Nanoparticle Hyperthermia. 2018. 9f. Scientific Reports, Rússia, 2018.



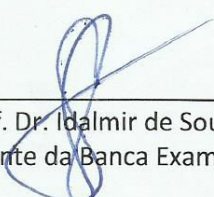
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO - MEC
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO - UFERSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA



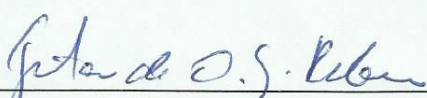
ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 15:00 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 **CLARA LETÍCIA DE SOUSA CARVALHO**, aluna do curso de Ciência e Tecnologia desta instituição, com o título **ESTUDO DO CAMPO DIPOLAR 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