



Artigo

Estudo da interação entre nanoelementos magnéticos dispostos horizontalmente

Thaysa Danielly Soares da Mota^[1], Idalmir de Souza Queiroz Júnior^[2] e Marcos Vinícius de Mendonça Ferreira^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; thaysa_danielly@hotmail.com

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; idalmir@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; vinicius.mendonca@ufersa.edu.br

Recebido: 02/02/2022;

Aceito: 29/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

Resumo: O presente trabalho desempenhou um estudo sobre a interação entre nanoelementos magnéticos acoplados paralelamente ao eixo x, alterando suas dimensões e espaçamento, apresentando resultados para sua aplicação na construção de portas lógicas magnéticas, utilizando os materiais Ferro, Cobalto, Níquel e Permalloy. O principal objetivo é encontrar, entre os materiais escolhidos para o trabalho, aquele que possua uma melhor resposta de reversão de sua magnetização, com base nas configurações adotadas e, com isso, mostrar graficamente uma faixa de valores favoráveis para um comportamento de alinhamento ferromagnético, ponto importante para sua aplicação em portas lógicas magnéticas. Obtendo assim um comparativo gráfico entre os elementos abordados, a fim de que se tenha aquele que se configure melhor a sua aplicação. Utilizando-se de um recurso computacional autoconsistente e traçando um perfil de configuração, para cada proporção utilizada, constrói-se uma máscara da disposição desses nanoelementos e após o seu processamento, esplanam-se graficamente seus resultados com os valores obtidos. Concluindo assim, quais os materiais que conseguem, dentro das dimensões utilizadas, reverter sua magnetização e com isso conseguir um alinhamento ferromagnético, fornecendo a faixa de valores mais viáveis para essa característica.

Palavras-chave: Nanotecnologia, Nanoelementos, Spintrônica, Portas Lógicas Magnéticas.

Abstract: The present work carried out a study on the interaction between magnetic nanoelements coupled parallel to the x axis, changing their dimensions and spacing, results for their application in the construction of magnetic logic gates, using the materials Ferro, Cobalt, Nickel and Permalloy. The main objective is to find, among the materials chosen for the work, the one that has the best response for reversing its magnetization, based on the adopted configurations and, with this, to show graphically a range of favorable values for a ferromagnetic alignment behavior, important point for its application in magnetic logic gates. Thus obtaining a graphic comparison between the elements covered, in order to have the one that best fits your application. Using a self-consistent computational resource and drawing a configuration profile, for each proportion used, a mask is built of the disposition of these nanoelements and after their processing, their results are graphically expanded with the values obtained. Concluding, which materials can, within the dimensions used, reverse their magnetization and thereby achieve ferromagnetic alignment, providing the most viable range of values for this characteristic.

Key-words: Nanotechnology. Nanoelements. Spintronics. Magnetic Logic Gates.

1. INTRODUÇÃO

A busca por inovações tecnológicas que proporcionem respostas mais rápidas em sistemas já existentes e que incrementem sua capacidade de armazenamento de dados é o cenário ideal para a inserção de estudos envolvendo materiais magnéticos em escala reduzida. Tais materiais, além de serem procurados por possuírem menor tamanho e, por isso, ocuparem pouco espaço no equipamento requerido, também dispõem da possibilidade de serem controlados e projetados previamente, adequando seu funcionamento de acordo com as intenções do profissional que o está programando. Uma das primeiras grandes descobertas na área do

magnetismo foi o efeito da magnetorresistência gigante, que é um decrescimento da resistência elétrica devido à aplicação de um campo magnético externo. Essa propriedade foi observada em estruturas de filmes finos compostos por multicamadas de metal ferromagnético e não-magnético [1].

A spintrônica, ou eletrônica de spins, é uma área do estudo do nanomagnetismo que trata de estruturas magnéticas em escalas nanométricas, que possuem diversas funcionalidades. O termo “spin” significa rodar, traduzido da língua inglesa, e passou a ser utilizado pelos físicos Otto Stern e Walther Gerlach, em 1921, quando estes descobriram através de experimentos, que os elétrons podiam apresentar um movimento próprio de rotação [2]. Para a eletrônica, a manipulação dos spins do elétron e os efeitos que isso traz, abre campo para diversas aplicações, principalmente no que tange ao armazenamento de informações. O surgimento do efeito da Magnetoresistência Gigante direcionou o estudo e fabricação de materiais que evoluíssem o potencial de armazenamento de dados e processamento de informações, como as memórias de acesso aleatório magnéticas, que são memórias que utilizam células magnéticas para armazenar dados, porém a problemática em questão está no estudo da alteração causada no efeito de tamanho finito de nanoelementos nas configurações dos estados magnéticos [3].

O presente artigo tem por finalidade estudar os conceitos que regem a spintrônica, bem como a fundamentação teórica que envolve a interação existente entre nanoelementos magnéticos elíptico acoplados horizontalmente e também observar e analisar as mudanças que ocorrem em alterar algumas de suas características, visto que no estudo de propriedades em escala nanométrica, o efeito em alterar o diâmetro e a espessura é relevante, pois quanto mais o tamanho se aproxima do tamanho crítico, mais o modo de domínio único se torna predominante [4], dessa maneira se afere os resultados observando os gráficos da curva de magnetização na configuração dos momentos magnéticos e do mapa de campo dipolar, objetivando resultados de um alinhamento ferromagnético, que são resultados favoráveis à utilização desses elementos em portas lógicas nanomagnéticas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Método Autoconsistente

O recurso computacional autoconsistente utilizado foi desenvolvido em linguagem de programação Fortran pelo Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos da UFRN. Nesse código, cada célula de simulação possui um campo efetivo sobre ela que é dado pela soma vetorial dos demais campos apresentados anteriormente. O objetivo é ter todos os momentos de dipolo magnético alinhados com o campo magnético médio local ou o mais próximo disso para que, dessa forma, tenhamos o menor torque magnético possível. Assim sendo, o referido método se apresenta da seguinte maneira:

1. Inicia-se o sistema com uma determinada configuração magnética;
2. Calcula-se o campo magnético efetivo local sobre cada célula de simulação;
3. Compara-se o valor calculado para a configuração magnética obtida pela equação do torque magnético em relação a uma dada tolerância;
4. Se o valor do torque magnético for menor ou igual a tolerância, aceitamos a configuração;
5. Se o torque magnético for maior que a tolerância, os momentos são alinhados com o campo magnético efetivo local e retornamos ao segundo passo;
6. O cálculo é repetido até que o torque magnético seja menor que a tolerância ou até que o número de interações chegue ao seu máximo;

2.2 Células de Simulação

Para uma compreensão melhor sobre a célula de simulação, utilize-se um material cristalino do tipo cúbico de corpo centrado, de volume d^3 com a quantidade de átomos dados pela Equação 1:

$$N = n \left(\frac{d}{a_0} \right)^3 \quad (1)$$

Onde a_0 é o parâmetro de rede do material, n é número de átomos por célula unitária e a fração nos informa o número de células. Com isso, é possível o estudo das configurações magnéticas, na ordem de centenas de nanômetros, dos materiais utilizados [5], para a nossa abordagem utilizamos uma parte do volume, denominada célula de simulação, onde os momentos magnéticos estarão quase alinhados entre si e o comprimento da célula de simulação seja menor que o comprimento de troca do material magnético, para que essa interação de troca se sobre saia sobre as demais [6]. Esse comprimento de troca dado pela Equação 2:

$$l_{EXCH} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}} \quad (2)$$

A é a rigidez magnética do material, M_S é a magnetização de saturação e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

2.3 Portas Lógicas Magnéticas

A invenção do transistor trouxe uma significativa contribuição para o avanço na produção de equipamentos eletrônicos. Com isso ela mudou a maneira que se fabricava dispositivos eletrônicos e, dessa forma contribuiu com o crescimento na indústria de computadores. Estudos recentes mostram a utilização de corrente elétrica e dos transistores para a realização de operações lógicas simples ou complexas. Um desses relaciona a utilização de funções básicas como AND, OR e NOT, utilizando materiais magnéticos em substituição ao dito anteriormente [7]. Quando um dispositivo ou circuito funciona a partir de um ou mais sinais de entrada e fornece apenas uma saída, denomina-se porta lógica e essa saída dependerá da função lógica empregada no dispositivo. Esses dispositivos devem diferenciar os diferentes sinais de entrada segundo a álgebra Booleana que utiliza um sistema binário com os valores 0 e 1. Em relação aos materiais magnéticos, essa distinção dos sinais lógicos de entrada pode ser feito com a direção da magnetização resultante do material ou o sentido do campo magnético externo [8]. Dessa maneira, passou-se a utilizar nanoelementos magnéticos nas estruturas das portas lógicas, onde esse interage com o campo dipolar [9]. Na Figura 1 temos uma imagem em alta resolução dos estados de magnetização de quatro imãs, onde cada conjunto possui três imãs de entrada e um imã de saída, por microscopia de força magnética (MFM), onde vemos o sinal lógico de saída para cada conjunto de sinais lógicos de entrada expostos.

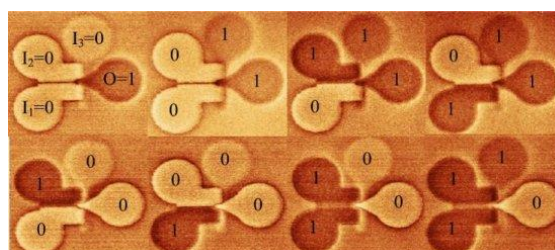


Figura 1. imagens de MFM. Estados de magnetização para todas as configurações de entrada (temporariamente após um ciclo de clock) [10].

Na Tabela 1, 2 e 3 são apresentadas as tabelas verdade das funções lógicas AND, OR e NOT, respectivamente.

Tabela 1. Tabela Verdade da função lógica AND (Autoria Própria).

Entrada A	Entrada B	Saída C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabela 2. Tabela Verdade da função lógica OR (Autoria Própria).

Entrada A	Entrada B	Saída C
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabela 3. Tabela Verdade da função lógica NOT (Autoria Própria).

Entrada A	Saída C
0	1
1	0

2.4 Autômato Celular Quântico

O Autômato Celular Quântico (Quantum CellularAutomata – QCA) é definido como um modelo computacional que usa acoplamento local entre células idênticas biestáveis que são construídas com a finalidade de executar funções lógicas binárias. Essas células podem ser um conjunto de nanoelementos ferromagnético. Da mesma maneira que em um transistor, em microeletrônica, utiliza-se da propriedade de carga do elétron para o processamento ou armazenamento de dados. Para a construção de portas lógicas magnéticas feitas com esse conjunto de nanoelementos, utiliza-se da propriedade de spin para a mesma finalidade. Logo, um grupo de elementos que possuam a magnetização na mesma direção recebem a codificação Estado 1 e os que possuem outra magnetização, codificam-se como Estado 0 [11].

Dependendo de como esses nanoelementos estiverem dispostos, tem-se um determinado alinhamento paralelo ou antiparalelo, como pode ser visualizado na Figura 2.

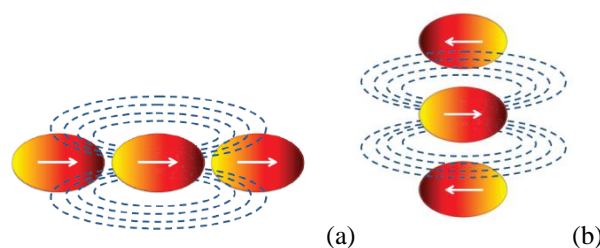


Figura 2. Representação gráfica do alinhamento paralelo (a) e antiparalelo (b) entre nanoelementos ferromagnéticos elípticos [11].

Todo esse processo nos remete a ter uma ideia mais clara de como se comporta uma porta lógica magnética, ou seja, para quais dimensões de diâmetro, raio, espaçamentos e altura, dependendo das configurações de alinhamento, os nanoelementos irão sofrer a ação do campo dipolar para terem um alinhamento ferromagnético ou antiferromagnético. Dessa maneira, são mostrados os resultados obtidos a partir da simulação de nanoelementos elípticos dispostos horizontalmente, de diferentes materiais, ocorrendo variação nas suas dimensões de altura e, principalmente, espaçamento, a fim de trazeremos as configurações adotadas que melhor se enquadram na questão do alinhamento ferromagnético para a sua utilização em portas lógicas magnéticas.

3. RESULTADOS

Inicia-se o trabalho realizando-se as simulações para nanoelementos esféricos acoplados de Cobalto (Co), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e Permalloy (Py), com altura variando em $h = 9$ nm, 12 nm, 15 nm e 18 nm e diâmetros fixos em $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm. Para cada configuração de altura e também para cada tipo de material, variou-se o espaçamento do mesmo em $E = 9$ nm, 12 nm e 15 nm. A Figura 3 mostra a disposição esquemática desses nanoelementos.

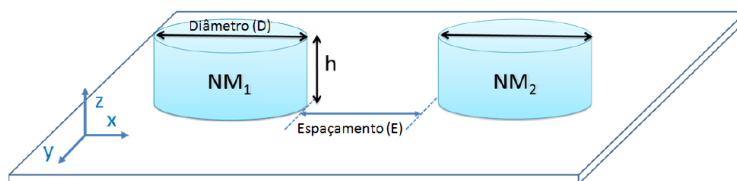


Figura 3. Representação da disposição da configuração dos nanoelementos acoplados no plano alinhado paralelamente ao eixo x [6].

Aplicando um campo externo de 10 kOe, não se obteve bons resultados com as configurações utilizadas, para que quaisquer um dos materiais utilizados tivesse um comportamento favorável a sua utilização em portas lógicas magnéticas. São apresentados os gráficos de curva de magnetização, mapa de spins e campo dipolar, para as configurações de espaçamento $E = 6$ nm, altura $h = 18$ nm e diâmetro $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm com campo externo de 10 kOe, do Ferro, que conseguiu reversão, e do Cobalto, que não conseguiu reversão. Para as demais configurações de dimensão, não houve reversão da magnetização dos materiais. As Figuras 4a e 4b mostram a curva de magnetização de ambos os materiais utilizados.

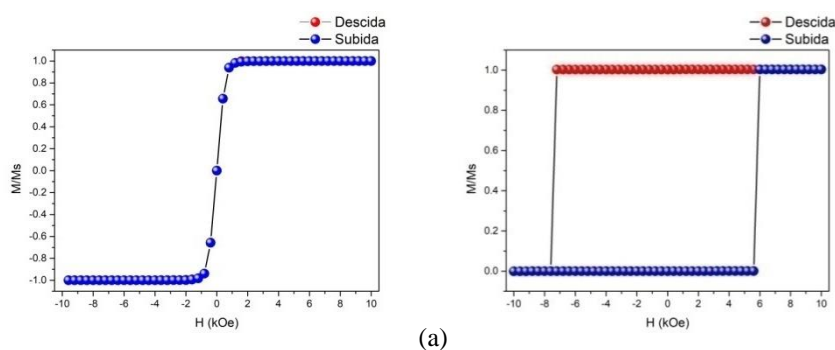


Figura 4. Curva de Magnetização dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, do Ferro (a) e do Cobalto (b) com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

As Figuras 5 e 6 mostram a configuração do Campo Dipolar para o Ferro e Cobalto, respectivamente. Atente-se ao fato de que, quanto ao passo que o Ferro consegue reverter completamente sua magnetização, o Cobalto não consegue reverter. Um ponto importante diz respeito à anisotropia desses materiais, enquanto o Ferro possui uma estrutura cristalina cúbica o Cobalto, por sua vez, possui uma estrutura hexagonal compacto, o que faz com que sua anisotropia magnetocristalina atue diferentemente nos materiais expostos a uma mesma interferência de campo magnético externo.

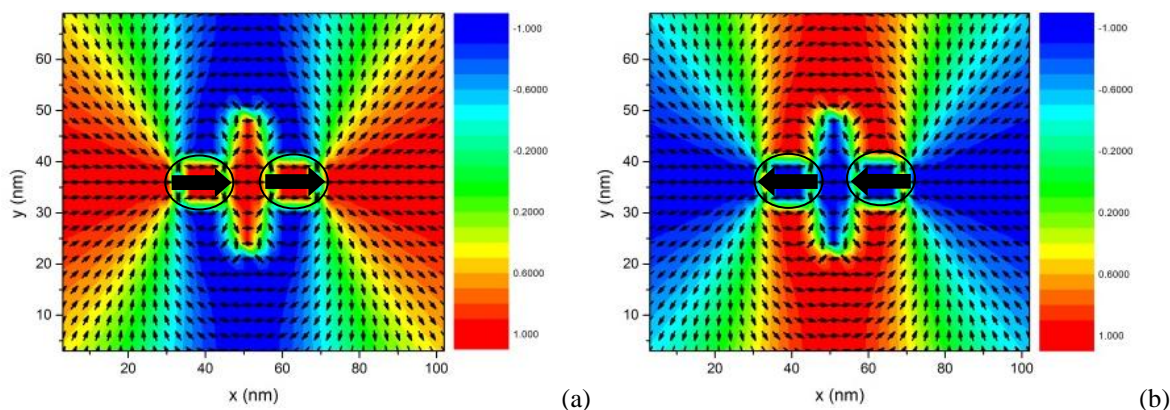


Figura 5. Campo Dipolar para o ponto de saturação (a) e para o ponto de remanência (b). Os gráficos são referentes a dois nano elementos acoplados paralelamente ao eixo x, de Ferro, com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

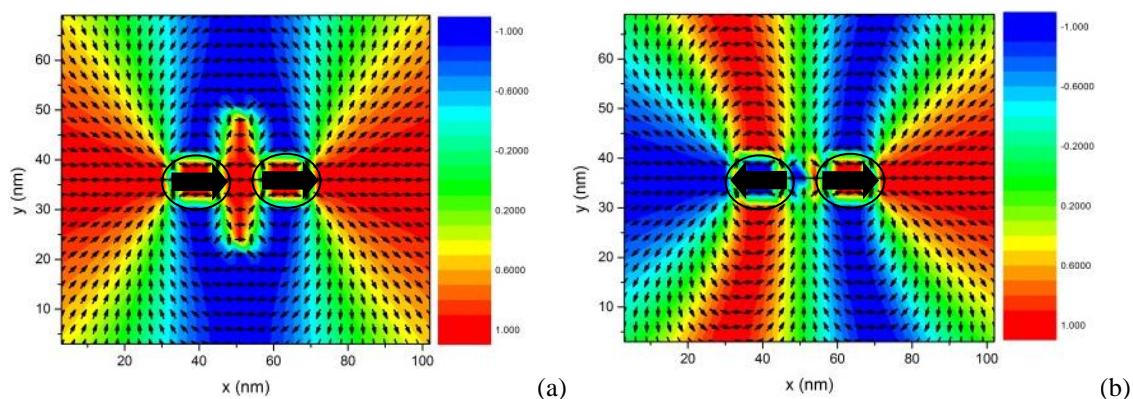


Figura 6. Campo Dipolar para o ponto de saturação (a) e para o ponto de remanência (b). Os gráficos são referentes a dois nano elementos acoplados paralelamente ao eixo x, de Cobalto, com diâmetro $D_x = 18$ nm, altura $h = 18$ nm e espaçamento $E = 6$ nm (Autoria Própria).

Ao obter melhores resultados, optou-se pela mudança nas dimensões dos nanoelementos e em aumentar o valor do campo externo aplicado que antes era de 10 kOe e passou a ser 50 kOe. As novas dimensões adotadas são: Altura variando em $h = 15$ nm, 18 nm e 21 nm, o espaçamento variando em $E = 6$ nm, 9 nm e 12 nm e os valores de diâmetros permaneceram os mesmos $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm. Pode-se ver, nas Figuras 7, 8 e 9 a curva de magnetização, mapa de spins e mapa de campo dipolar do Ferro, Cobalto, Permalloy e do Níquel e o gráfico de reversão criado a partir dos resultados obtidos com as simulações realizadas.

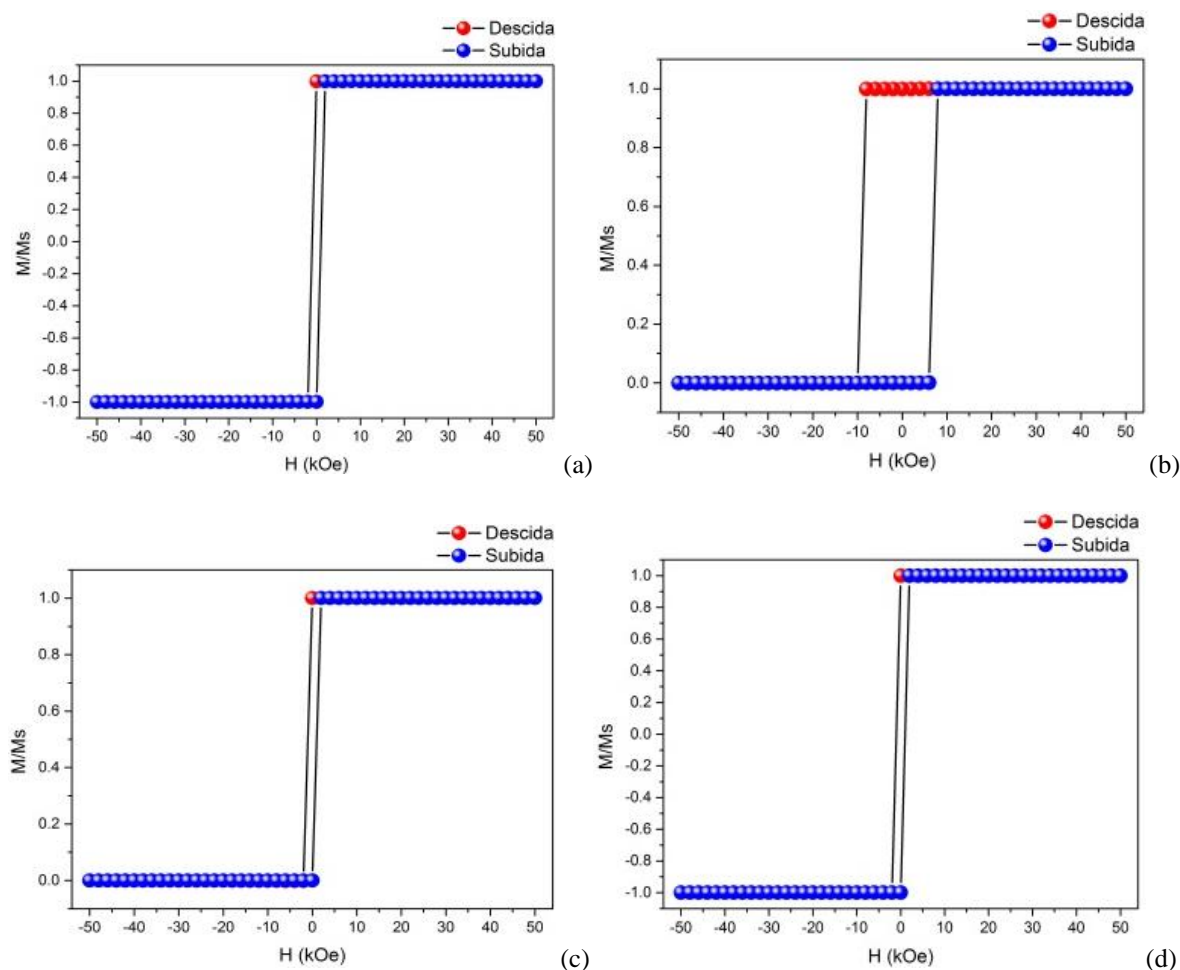


Figura 7. Curva de Magnetização dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, (a) do Ferro, (b) Cobalto (c), Níquel e (d) Permalloy para as dimensões de espaçamento $E = 6$ nm, altura $H = 15$ nm e diâmetro $D_x = 18$ nm e $D_y = 9$ nm.

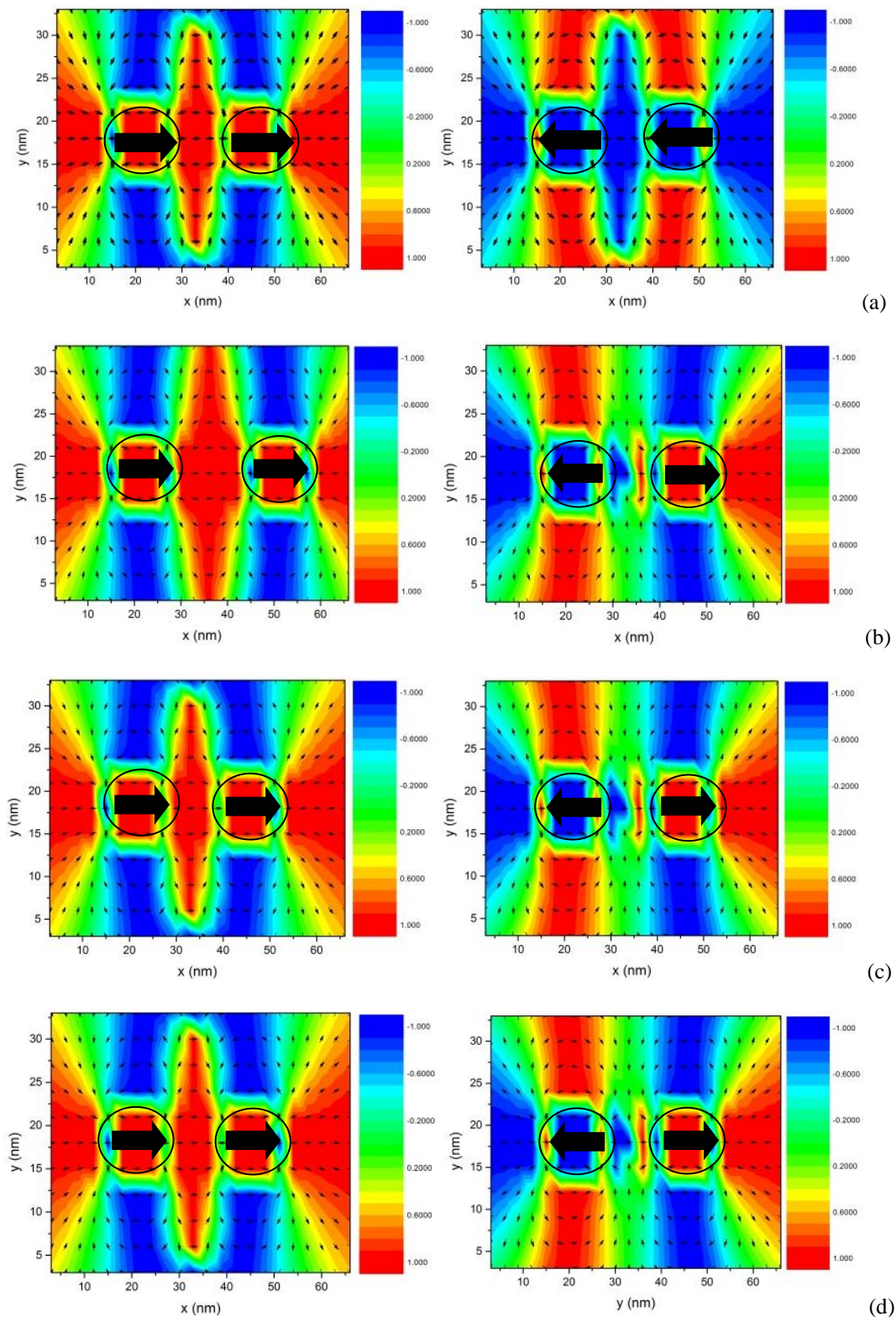


Figura 8. Mapa de Campo Dipolar para o ponto de saturação e remanência, respectivamente, dos nanoelementos acoplados paralelamente ao eixo x, dos materiais (a) Ferro, (b) Cobalto, (c) Níquel e (d) Permalloy, nas mesmas dimensões utilizadas na Figura 7.

Com essas alterações, conseguiu-se uma favorável reversão da magnetização dos materiais e, com isso, para uma melhor visualização e comparativo, construiu-se um gráfico, para cada material utilizado, do

comportamento do mesmo em função da altura e espaçamento utilizados nas simulações. Os resultados gráficos estão expostos nas Figuras 9a, 9b, 9c e 9d.

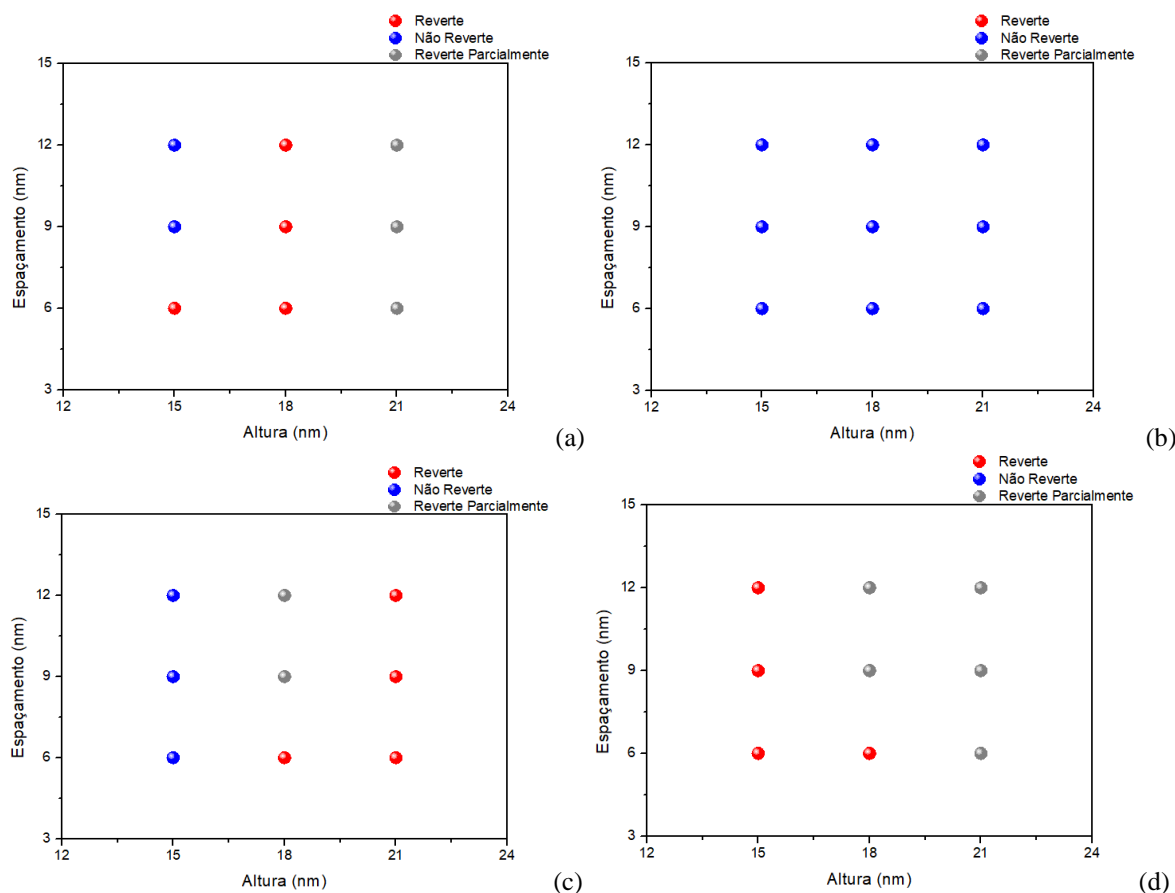


Figura 9. Gráfico da Reversão da Magnetização do (a) Ferro, (b) Cobalto, (c) Níquel e (d) Permalloy.

4. CONCLUSÃO

Nesse presente trabalho, desenvolveu-se um estudo acerca da simulação micromagnética de nanoelementos elípticos de Ferro, Cobalto, Níquel e Permalloy acoplados magneticamente via campo dipolar. Para aplicação de campo magnético externo, optou-se pela orientação paralela ao eixo x, onde a mesma não foi modificada, bem como sua anisotropia. Configurou-se a programação computacional utilizada para as dimensões do nanoelemento escolhidas, como também para o valor do campo externo aplicado e da disposição gráfica dos nanoelementos. Com base nos estudos realizados por [6], há uma dependência de reversão na direção da magnetização relacionada à altura e ao espaçamento adotado, logo, optou-se por variar os valores em ambos os parâmetros, para cada material utilizado, a fim de aprimorar mais a obtenção de resultados favoráveis a um alinhamento ferromagnético e com isso a sua aplicabilidade em portas lógicas magnéticas. Finalizou-se o trabalho mostrando os resultados através da curva de magnetização, mapa de spins e do mapa de campo dipolar. Onde o estudo apresentado, através do mapa de campo dipolar e de spins, mostra se há reversão ou não e para qual configuração de dimensões ela ocorre, construindo assim um gráfico de reversão para cada um dos elementos abordados.

Dessa maneira, finaliza-se que os materiais que possuem melhor comportamento para a reversão de sua magnetização, com base nas dimensões e nível de campo externo adotados, são o Ferro e o Permalloy. O Cobalto não conseguiu reverter sua magnetização para os valores adotados e também sua aplicabilidade não seria viável visto que este oxida facilmente em temperatura ambiente e é muito tóxico ao organismo humano [12], e o Níquel só apresenta essa configuração de reversão para espaçamentos e alturas maiores, ou seja, em nanoelementos mais extensos verticalmente. Abordagens futuras podem ser feitas a fim de se obter faixa de valores favoráveis para a boa utilização do Permalloy, bem como também o estudo da aplicabilidade dos elementos aqui favoráveis na construção das variadas portas lógicas magnéticas.

REFERÊNCIAS

- [1] BAIBICH, M. N. et al. Giantmagneto-resistance of (001) Fe/ (001) Cr magnetic superlattices. *Physical review letter*, v. 61, p. 2472, 1988.
- [2] GOMES, Gerson G.; PIETROCOLA, Maurício. *O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história*. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n2/a19v33n2.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017, 16:30.
- [3] CHUNG, S.-H. et al. Phase diagram of magnetic nanodisks measured by scanning electron microscopy with polarization analysis. *Physical Review B*, v. 81, n. 2, p. 024410, 2010.
- [4] LIMA, Ana TA; DANTAS, Ana L.; ALMEIDA, N. S. Magnetic properties of crystalline nanoparticles with different sizes and shapes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 425, p. 72-77, 2017.
- [5] REBOUÇAS, G. de O. G. Nucleação de Vórtices e paredes de Domínio em Nanoestruturas Magnéticas. Tese (Doutorado) - UFRN, 2010.
- [6] FERREIRA, Marcos Vinícius de M. Efeito do Acoplamento Dipolar em Nanoelementos. Dissertação (Mestrado) – UERN, 2017.
- [7] EICHWALD, Irina et al. *Majority logic gate for 3D magnetic computing*. *Nanotechnology*. Vol.: 25 Number 33, 2014.
- [8] COWBURN, R. P. Where have all the transistors gone?. *SCIENCE-NEW YORK THEN WASHINGTON-*, v. 311, n. 5758, p. 183, 2006.
- [9] CARLTON, David B. et al. Simulation studies of nanomagnet-based logic architecture. *letters*, v. 8, n. 12, p. 4173-4178, 2008.
- [10] MARTINS JUNIOR, S. M. S. B. Efeito do campo dipolar em Portas Lógicas Nanomagnéticas. Dissertação (Mestrado) - UERN, 2015.
- [11] MACHADO, T. S. Portas Lógicas Magnéticas. Dissertação (Mestrado) - CBPF, Rio de Janeiro, 2004.
- [12] SARGENTELLI, Vagner; FERREIRA, Antonio P. . Nanopartículas magnéticas: o cobalto. **Eclét. Quím.** , São Paulo, v.35, n. 4, pág. 153-163, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702010000400020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 07 de outubro de 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-46702010000400020> .