



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
TECNOLOGICAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ARTHUR ÉMILY GOMES FERNANDES VIEIRA

**EFEITO DO AFASTAMENTO DE NANODOTS NA MAGNETIZAÇÃO
DE NANOELEMENTOS ACOPLADOS MAGNETICAMENTE**

Mossoró-RN

2014

ARTHUR ÉMILY GOMES FERNANDES VIEIRA

**EFEITO DO AFASTAMENTO DE NANODOTS NA MAGNETIZAÇÃO
DE NANOELEMENTOS ACOPLADOS MAGNETICAMENTE**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, para a obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Mossoró-RN

2014

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

V657e Vieira, Arthur Emily Gomes Fernandes.

Efeito do afastamento de Nanodots na magnetização de nanoelementos acoplados magneticamente./ Arthur Emily Gomes Fernandes Vieira-- Mossoró, 2014.
53f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Junior

Monografia (Graduação em Ciencia e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Graduação.

1. Nanotecnologia. 2. Nanomagnetismo. 3. Nanodots. 4. Spintrônica. 5. Acoplamento Magnético. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /027-14

CDD: 620.5

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

ARTHUR ÉMILY GOMES FERNANDES VIEIRA

**EFEITO DO AFASTAMENTO DE NANODOTS NA MAGNETIZAÇÃO
DE NANOELEMENTOS ACOPLADOS MAGNETICAMENTE**

Monografia apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Departamento de Ciências Ambientais e
Tecnológicas, para a obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Aprovado em: 21 / 02 / 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior / UFERSA

Presidente

Prof. Dr. Vamberto Dias de Mello - UERN
Primeiro Membro

Prof. Dr. André Pedro Fernandes Neto – UERN/UFERSA
Segundo Membro

EPÍGRAFE

“O impossível é uma palavra muito grande que gente pequena usa pra tentar nos oprimir. Nada é impossível!”.

Chorão – Charlie Brown Jr.

DEDICATÓRIA

A Deus em primeiro lugar, aos meus pais Aécio e Edione, a meus irmãos Alan e Emanuely, foram os que me deram apoio e ajuda durante esse longo tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus antes de tudo.

Agradeço aos meus pais Aécio Fernandes Vieira e Edione Gomes Martins, por me trazerem ao mundo dando muito amor e carinho, por serem os que me passam ensinamentos de bondade e sabedoria, pelo esforço que fizeram para que eu chegasse até esse momento, pois sem eles isso não seria possível.

Agradecer aos meus irmãos Alan Eric e Ane Emanuely, por sempre estarem presentes nos bons e maus momentos da minha vida.

Agradeço a todos familiares que contribuíram diretamente e indiretamente nessa longa trajetória, em especiais aos meus avós Francisco, Eunice e Francisca, a minha tia Liana e ao meu primo Lucas que sempre estiveram presentes.

Agradeço aos meus amigos que são como minha segunda família, companheiros em todas as horas, em especial a Magno, Kaick, Jhonnathas, Thalita, Ronildo, Rochanny, Mariana, Teresa, Atalwalpa, David, Jack, João Paulo (galego), Leonardo, Daniel, João Paulo Cândia, Luan, Dênis, Artur.

Agradeço aos companheiros de curso pelas horas de estudo que foram de grande importância para conclusão dessa etapa.

Agradeço ao meu orientador Idalmir de Souza Queiroz Júnior, pela orientação, paciência, competência, ensinamentos e apoio constante para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos o progresso da nanotecnologia permitiu o desenvolvimento de materiais de aplicação em diversas áreas como por exemplo, medicina, eletrônica e computação. Na área da eletrônica (conhecida como spintrônica) e computação tem-se uma fácil percepção da aplicação, sendo a spintrônica responsável pelos rápidos avanços na área da informática.

Neste trabalho objetiva-se introduzir alguns conceitos do nanomagnetismo, no texto subsequente analisamos, via simulações computacionais, o efeito causado nas fases magnéticas de nanodots cilíndricos acoplados magneticamente devido a sua separação por meio de material não-magnético, também apresentamos um estudo das fases magnéticas e de histerese.

Palavras-chaves: Nanotecnologia; Nanomagnetismo; Nanodots; Spintrônica; Acoplamento Magnético.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Circuito Integrado (CI) aumentado 2400 vezes.	16
Figura 2: Movimento de rotação do elétron	20
Figura 3: Movimento de translação do elétron.....	20
Figura 4: Curva de histerese magnética de um material ferromagnético.	24
Figura 5: Representação estrutural dos domínios magnéticos dispostos aleatoriamente em um material policristalino.	25
Figura 6: Ordenamento dos domínios magnéticos de material diamagnético, na presença de um campo magnético externo aplicado.	27
Figura 7: Ordenamento dos domínios magnéticos de material paramagnético, na presença de um campo magnético externo aplicado.	28
Figura 8: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material ferromagnético.....	29
Figura 9: Gráfico Magnetização espontânea M_s versus temperatura T num material ferromagnético, onde T_c é a temperatura de Curie ferromagnética.....	30
Figura 10: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material antiferromagnético.....	31
Figura 11: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material ferrimagnético.....	31
Figura 12: Comportamento do campo dipolar de uma célula i sobre sua vizinhança, representada pelo somatório em k	35
Figura 13: Representação atômica da célula de simulação	36
Figura 14: Sistema Magnético em estudo	38
Figura 15 Diagrama de blocos do programa	39
Figura 16: Histerese $\text{ETA} = 0.1$	40
Figura 17: Histerese $\text{ETA} = 0.5$	41
Figura 18: Histerese $\text{ETA} = 1$	41
Figura 19: Histerese $\text{ETA} = 5$	42
Figura 20: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ no cilindro inferior	43
Figura 21: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ no cilindro superior	43
Figura 22: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ campo dipolar.....	44
Figura 23: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ cilindro inferior	45

Figura 24: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ cilindro superior	45
Figura 25: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ campo dipolar.....	46
Figura 26: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ cilindro inferior	47
Figura 27: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ cilindro superior	47
Figura 28: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ campo dipolar.....	48
Figura 29: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ cilindro inferior	49
Figura 30: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ cilindro superior	49
Figura 31: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ campo dipolar.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Permeabilidade magnética e susceptibilidade magnética por tipos de materiais.23

Tabela 2: Permeabilidade magnética e susceptibilidade magnética de alguns materiais.23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOMAGNETISMO.....	15
2.2.1 Nanotecnologia	15
2.1.2 Nanomagnetismo	16
2.1.2.1 Interações Magnéticas	17
2.1.2.2 Anisotropia	18
2.1.2.3 Magnetoresistência Gigante (GMR)	18
2.2 MAGNETISMO, MATERIAIS MAGNÉTICOS E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	19
2.2.1 Comportamento Magnético.....	19
2.2.1.1 Polos Magnéticos	19
2.2.2 Campo Magnético, Indução Magnética e Magnetização	21
2.2.3 Curva de Magnetização - Histerese	24
2.2.4 Domínio Magnético	25
2.2.5 Fenômenos Magnéticos	26
2.2.5.1 Diamagnetismo.....	26
2.2.5.2 Paramagnetismo	28
2.2.5.3 Ferromagnetismo.....	29
2.2.5.4 Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo	30
2.2.5.5 Superparamagnetismo	31
2.3 MODELO MICROMAGNÉTICO.....	32
2.3.1 Energia Zeeman.....	34
2.3.2 Energia de Anisotropia Axial	34
2.3.3 Campo Dipolar	34
2.4 A CÉLULA DE SIMULAÇÃO	36
2.4.1 Comprimento de Troca.....	36
3. OBJETIVOS	37
3.1 OBJETIVO GERAL	37
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1 SISTEMA MAGNÉTICO EM ESTUDO	37
4.2 MODELO COMPUTACIONAL	38
4.3 HISTERESE E REMANÊNCIA DO MODELO ESTUDADO	40

4.4 FASES MAGNÉTICAS OBTIDAS	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
5.1 RESULTADOS DAS HISTERESES.....	50
5.2 RESULTADOS DOS MAPAS DE SPINS	51
CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico faz parte da evolução do homem é um conceito amplamente direcionado para o planejamento de novas tecnologias como composto por processos interdependentes de novas inovações. Os avanços da tecnologia em todas as áreas geram novos desafios ao mercado competitivo, fazendo surgir diversos produtos para diferentes consumidores. O setor da informática é um exemplo desse avanço, onde facilmente percebe-se as mudanças, comparando-se os computadores usados em meados de 1997 com utilizados atualmente, tem-se uma diferença no tamanho físico, velocidade de processamento e armazenamento.

O motivo dessa evolução foi o rápido avanço da spintrônica, em 1988, com o trabalho de dois pesquisadores europeus, o alemão Peter Gruenberg e o francês Albert Fert. Como o próprio nome sugere, eletrônica baseada no spin do elétron. Enquanto a eletrônica convencional preocupa-se com a carga dos elétrons, a spintrônica além de importar-se com a carga do elétron estuda o momento magnético intrínseco ou de rotação (spin), essa descoberta foi empregada principalmente nos leitores dos discos rígidos, possibilitando o aumento da sua capacidade de leitura e de armazenamento e ao mesmo tempo reduzindo o seu tamanho físico.

O presente trabalho de conclusão de curso aborda o efeito causado nas fases magnéticas de nanodots cilíndricos acoplados magneticamente devido a sua separação por meio de material não-magnético.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOMAGNETISMO

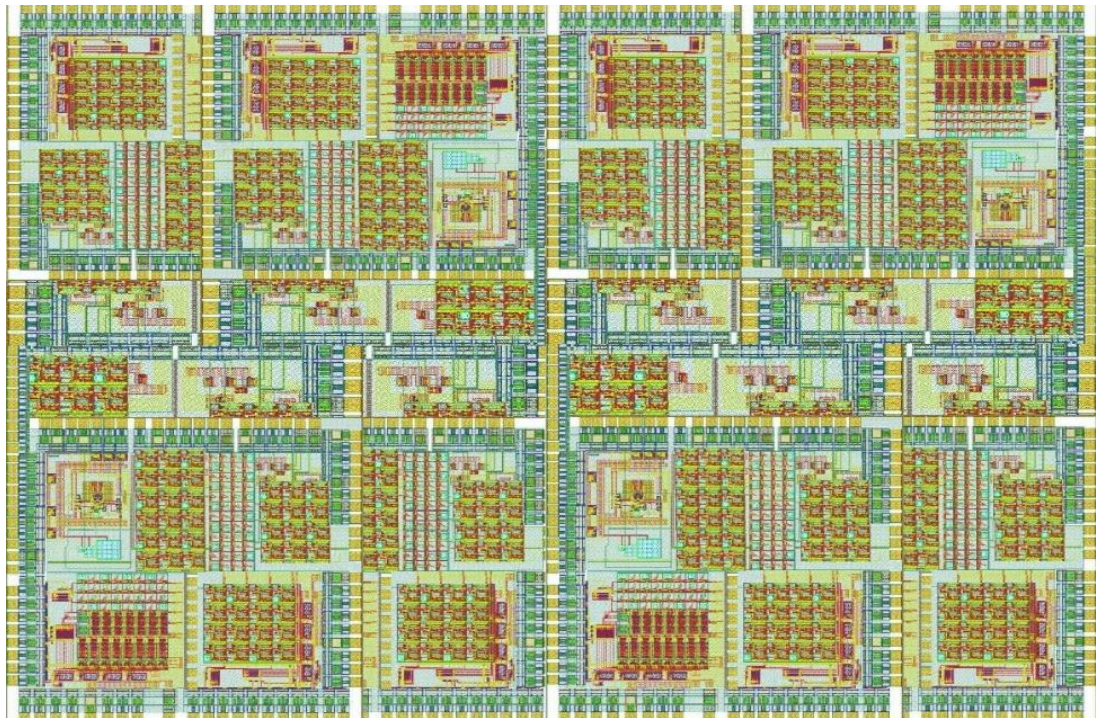
2.2.1 Nanotecnologia

A nanotecnologia corresponde à capacidade de desenvolver agrupamentos de átomos ou moléculas, cujo arranjo espacial e composição são usados para obter estruturas com novas propriedades mecânicas, ópticas, eletrônicas ou magnéticas e, portanto, novos produtos industriais. (FIGUEIREDO, 2006).

O termo nanotecnologia foi usado pela primeira vez, em 1974, pelo professor Norio Taniguchi da Universidade de Tóquio, mas já havia sido mencionado com outras palavras por Richard Feymann (ganhador do prêmio Nobel da física em 1965) em uma palestra em 1959, onde relatou que seria possível escrever a informação contida em uma enciclopédia na “cabeça” de um alfinete, isso se o tamanho de tudo que lá estava escrito fosse reduzido cerca de 25 mil vezes.

É de fácil observação a importância e a aplicabilidade da nanotecnologia nas diversas áreas, principalmente na área da informática. Os processadores de utilizados nos computadores e os harddisks, mais conhecidos como HDs, são provavelmente, os componentes eletrônicos que mais se utilizam da nanotecnologia. Evidentemente, o processador não tem dimensões em nanômetros, mas seus componentes são nessa escala, como por exemplo vide Figura 01, um circuito integrado (CI) utilizado em um processador de computador Intel de dimensão na escala de 45nm.

Figura 1: Circuito Integrado (CI) aumentado 2400 vezes.



Fonte: Intel (2010)

Esta tecnologia não é aplicada apenas na informática, atualmente, pode-se relatar a aplicação da nanotecnologia na Medicina, na Química, na Física quântica, nas indústrias que criam protótipos aeroespaciais, refinarias e também na eletrônica (chamada spintrônica).

2.1.2 Nanomagnetismo

Com a evolução das pesquisas em nanociência nos últimos anos, tornou-se possível perceber alterações nas propriedades dos materiais que em pequena escala possuem comportamentos diferenciados, o que proporciona a possibilidade de utilização de materiais conhecidos de maneiras inovadoras. Essas alterações ocorrem pelo efeito diferenciado da interação dos átomos em pequena escala. Tais objetos podem ser encontrados na natureza e fabricados artificialmente, modeladas em várias formas diferentes.

Esses materiais possuem um potencial de funcionarem como mídias removíveis, ampliando a capacidade de armazenamento em alta velocidade e densidade, desde que possuam certa configuração. Além da possibilidade de funcionarem como portas lógicas magnéticas e

da fabricação de materiais híbridos ferromagnético/semicondutor. Uma importante forma de análise dos materiais são as simulações computacionais. (SILVA, 2009).

2.1.2.1 Interações Magnéticas

As partículas nanomagnéticas de um conjunto podem interagir de diferentes maneiras, de acordo com a distância entre elas. Temos a interação dipolar, a interação de troca e a interação RKKY, por exemplo.

Considerando a interação entre dois dipolos magnéticos simples, $\vec{\mu}_1$ e $\vec{\mu}_2$, separados pelo vetor $\vec{r}$, a energia da configuração é dada pela equação 1:

$$E = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \left(\mu_1 \cdot \mu_2 - \frac{3}{r^2} (\mu_1 \cdot \vec{r})(\mu_2 \cdot \vec{r}) \right) \quad (1)$$

Onde, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. Nota-se que a energia depende da distância e da orientação relativa entre os dipolos. (FERREIRA, 2012).

As propriedades magnéticas dos materiais com momentos magnéticos localizados se deve principalmente à interação de troca. Sabe-se que a interação dipolar não é suficiente para produzir ordenamento magnético à temperatura ambiente, isso só seria possível a temperaturas muito baixas.

Para a interação de troca, consideraremos um modelo constituído de dois elétrons indistinguíveis. Existem dois tipos de interação de troca, a interação de troca direta, onde o estudo da interação entre dois elétrons é relativamente simples, o que não acontece na prática com um sistema constituído de inúmeros átomos e, mais elétrons. Porém a interação de troca realmente significativa ocorre entre átomos mais próximos, o que nos leva ao modelo de Heisenberg, dado pela equação 2:

$$H_{spin} = -\sum_{ij} J_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j \quad (2)$$

Sendo, J_{ij} a constante de troca entre os spins em i e j . Em geral J é positivo quando os elétrons pertencem ao mesmo átomo, e negativo para elétrons de átomos distintos. Por outro lado, os tipos de interação de troca indireta basicamente depende significativamente do tipo de material magnético, podendo assim ser classificadas como interação de supertroca, de troca e de troca dupla. Sendo que a de supertroca ocorre em sólidos iônicos e a interação de troca ocorre em metais como momentos magnéticos localizados. (FERREIRA, 2012).

2.1.2.2 Anisotropia

Nos materiais magnéticos existem interações que selecionam uma direção particular, chamada de eixo fácil, ao longo do qual existe uma tendência para o momento magnético direcionar-se. Estas interações são conhecidas como energia de anisotropia ou simplesmente anisotropia. (FERREIRA, 2012). Existem duas fontes principais de anisotropia, a interação spin-órbita dos elétrons com a estrutura cristalográfica do material, resultando na anisotropia magnetocristalina e a interação dipolar entre os momentos magnéticos atômicos, que cai com a distância entre dipolos vizinhos elevado ao cubo.

2.1.2.3 Magnetoresistência Gigante (GMR)

O fenômeno da magnetorresistência gigante foi descoberto em 1988 por Baibich e colaboradores em multicapas de Ferro-Cromo. As camadas de Fe estavam acopladas antiferromagneticamente que passava a ser ferromagnética mediante a aplicação de um forte campo magnético. Tal mudança no acoplamento entre as capas de Fe era acompanhada por uma imensa mudança na resistividade do material. Mais tarde, em 1992, foi descoberta a GMR em sistemas nanoestruturados granulares de Cobre-Cobalto ou Ferro-Prata.

O efeito da GMR é possivelmente o mais importante dos fenômenos de magnetotransporte devido não só ao seu interesse do ponto de vista da ciência básica como também no enorme potencial de aplicações tecnológicas. Este efeito, além de ser a base da nova tecnologia denominada spintrônica, é a base para todos os sistemas de leitura de informações magnéticas existentes nos computadores modernos. Com muito mérito, a descoberta da GMR premiou aos Físicos Albert Fert e Peter Grünberg, o prêmio Nobel de física de 1997.

O efeito da GMR em multicamadas magnéticas está relacionado com o acoplamento antiferromagnético entre as camadas magnéticas, separadas por um espaçador não magnético. Quando a orientação relativa da magnetização em camadas magnéticas vizinhas muda da configuração antiparalela para paralela devido a aplicação de campo magnético, se observa um brusca redução na resistência da amostra como um todo. (PIROTA, 2009).

2.2 MAGNETISMO, MATERIAIS MAGNÉTICOS E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

O magnetismo está entre as mais antigas áreas do conhecimento científico, tendo estimulado o progresso da ciência e da tecnologia da humanidade. Os primeiros fenômenos magnéticos envolvem a atração de alguns metais por ímãs naturais, provenientes de uma região da Grécia conhecida como Magnésia, foram descritos, já por volta de 900 a.C., pelo grego Magnus. Sabe-se hoje, que o magnetismo da matéria está relacionado ao conceito de spin. Deste conceito, resultam os momentos magnéticos de spin e orbital. (SILVA, 2009).

2.2.1 Comportamento Magnético

2.2.1.1 Polos Magnéticos

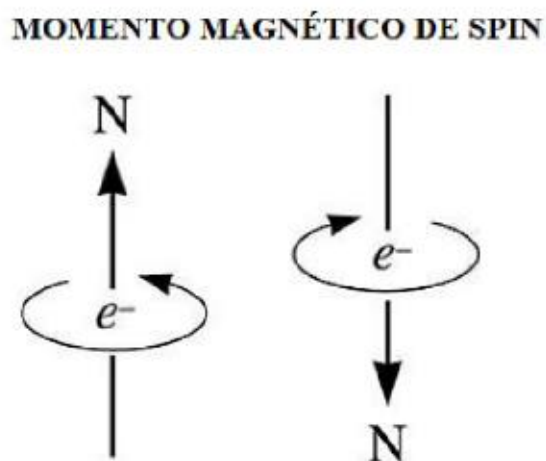
Quando pega-se um ímã e dividimos ao meio, observa-se a formação de outro ímã. Não importa quantas divisões sejam feitas, sempre haverá um novo ímã, ou seja, não consegue-se separar o polo norte do polo sul em um ímã e obter o chamado monopolo magnético. (BARBOSA, 2009).

Não existe uma carga ou polo magnético separado, portanto temos como a unidade fundamental do magnetismo o dipolo magnético, seu conceito é útil em cálculos micromagnéticos, ou seja no cálculo dos campos internos a amostras e fenômenos relacionados como estrutura de domínios magnéticos. (NOVAK, 2013).

Pesquisando-se sobre identifica-se que o elétron, ele realiza dois movimentos que são semelhantes aos movimentos planetários, o movimento de rotação e translação, esses dois movimentos formam dois momentos de dipolo magnético: o momento de dipolo magnético

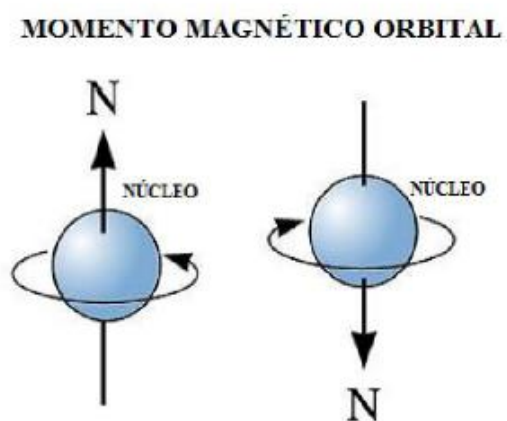
orbital/translação e o momento de dipolo magnético intrínseco/rotação (spin). Conforme ilustrado nas Figuras 02 e 03.

Figura 2: Movimento de rotação do elétron



Fonte: Barbosa (2009)

Figura 3: Movimento de translação do elétron



Fonte: Barbosa (2009)

2.2.1.2 Momentos magnéticos

O momento magnético de um átomo é originado do spin, dos momentos angulares orbitais e da mudança no momento induzido por um campo magnético aplicado. (FERREIRA, 2012). O momento magnético orbital e o momento angular orbital $\vec{L}$ são dados pela equação 3:

$$\vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m} \vec{L} \quad (3)$$

O sinal negativo é devido à carga do elétron, onde $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ é a massa do elétron e $\vec{L}$ é o momento angular, devido à carga do elétron ser negativa o momento de dipolo magnético orbital $\vec{\mu}_l$ é antiparalelo ao momento angular. (BARBOSA, 2009). O momento magnético intrínseco $\vec{\mu}_s$ e o spin $\vec{S}$ são dados pela equação 4:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{2m} \vec{S} \quad (4)$$

Os momentos magnéticos interagem entre si e também com campos magnéticos externos. Em mecânica quântica o momento magnético $\vec{\mu}$ de um átomo é o seu momento angular total, dado pelo somatório do momentos magnético orbital e intrínseco (spin), mostrado na equação 5.

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_l + \vec{\mu}_s \quad (5)$$

2.2.2 Campo Magnético, Indução Magnética e Magnetização

Três elementos são importantes para a descrição do magnetismo na matéria: o campo magnético $\vec{H}$, a indução magnética $\vec{B}$ proveniente da própria magnetização do material,

juntamente com o campo magnético externo e, a magnetização $\vec{M}$, que é o momento magnético por unidade de volume.

Quando um material se submete a presença de um meio magnético tanto o campo magnético $\vec{H}$ quanto à indução magnética $\vec{B}$ será influenciado pela magnetização $\vec{M}$ do meio. A magnetização vista microscopicamente é o resultado da soma dos momentos magnéticos e essa soma tem que ser diferente de zero. Para que haja magnetização é necessário que a média dos momentos magnéticos aponte para a mesma direção (BARBOSA, 2009).

No vácuo, o campo magnético é diretamente proporcional a intensidade de campo magnético $\vec{H}$, a relação entre $\vec{H}$, $\vec{B}$ e $\vec{M}$ é ilustrada pela equação 6:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (6)$$

Sendo, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, a permeabilidade magnética do vácuo. Experimentalmente observa-se uma relação entre a magnetização e o campo magnético, para materiais isotrópicos e lineares.

Essa grandeza que surge dessa relação é adimensional e foi denominada susceptibilidade magnética (χ_m), dada pela equação 7.

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (7)$$

Analisando a susceptibilidade magnética pode-se identificar a classificação de um material, por exemplo, se a susceptibilidade magnética (χ_m) for positiva a indução magnética se reforçará pela presença do material e esse material será classificado como paramagnético, caso χ_m seja negativo a indução se enfraquecerá pela presença do material e esse material se chamará diamagnético.

A susceptibilidade magnética é função da temperatura, e às vezes varia drasticamente com esta, apesar disto para materiais paramagnéticos e diamagnéticos temos que, $\chi_m < 1$, já para materiais ferromagnéticos temos $\chi_m \gg 1$. (BARBOSA, 2009).

Além de χ_m , também se pode analisar outra grandeza para saber qual tipo de material, a permeabilidade relativa, dada pela equação 8:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + \chi_m) \quad (8)$$

Na Tabela 1 observa-se como se classifica os materiais analisando a permeabilidade e susceptibilidade magnética.

Tabela 1: Permeabilidade magnética e susceptibilidade magnética por tipos de materiais.

Materiais	μ_r	χ_m
Diamagnético	< 0	< 1
Paramagnético	> 0	> 1
Ferromagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Ferrimagnético	$\gg 0$	$\gg 1$
Antiferromagnético	> 0	> 1

Fonte: Adaptado de Faria (2005)

Na Tabela 2 observa-se a classificação de alguns materiais analisando as mesmas.

Tabela 2: Permeabilidade magnética e susceptibilidade magnética de alguns materiais.

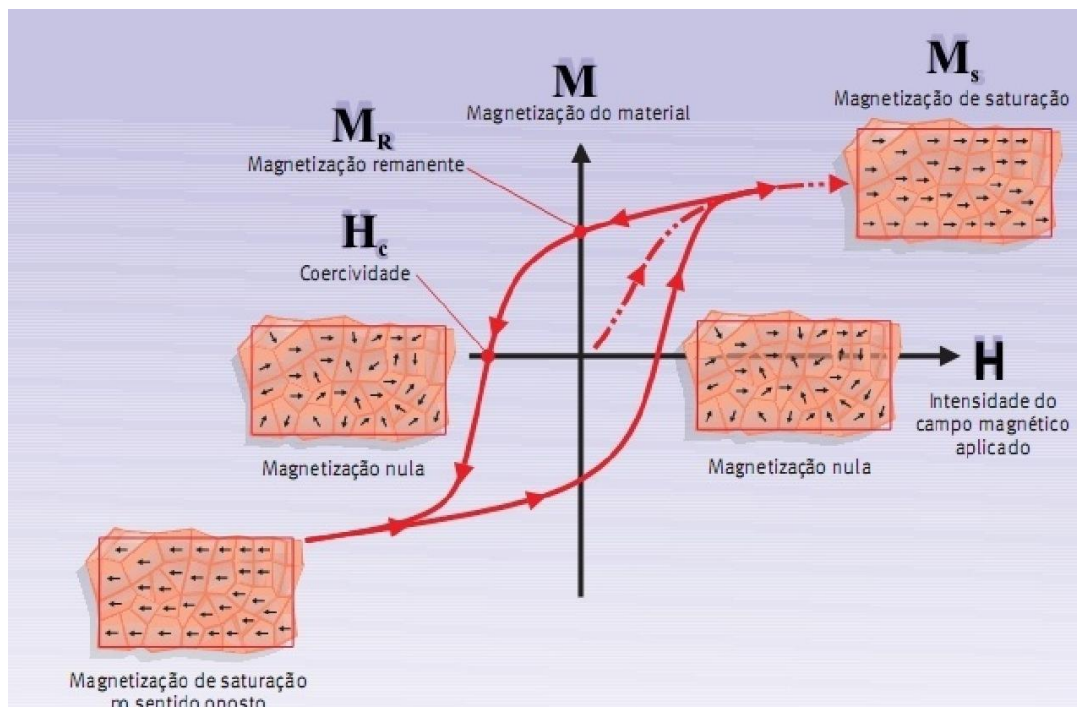
Material	Classificação	μ_r	χ_m
Bismuto	Diamagnético	0,99983	-17×10^{-5}
Zinco	Diamagnético	0,999986	$-3,6 \times 10^{-5}$
Cobre	Diamagnético	0,999991	$-1,4 \times 10^{-5}$
Água	Diamagnético	0,999991	$-0,9 \times 10^{-5}$
Vácuo (por definição)	Não-magnético	1	0
Ar	Paramagnético	1,0000004	$0,004 \times 10^{-5}$
Sódio	Paramagnético	1,0000062	$0,62 \times 10^{-5}$
Alumínio	Paramagnético	1,000022	$2,2 \times 10^{-5}$
Aço	Ferromagnético	2000	2000
Ferro Puro	Ferromagnético	200000	200000

Fonte: Adaptado de Faria (2005)

2.2.3 Curva de Magnetização - Histerese

A curva de magnetização ou curva de histerese ocorre quando a inversão dos momentos magnéticos de uma estrutura, à aplicação de um campo magnético se dá por caminhos diferentes, ou seja, a magnetização apresenta valores diferentes para um mesmo campo magnético aplicado, dependendo do estado magnético anterior da estrutura. (REBOUÇAS, 2010). A Figura 4 exemplifica uma curva de histerese de um material ferromagnético.

Figura 4: Curva de histerese magnética de um material ferromagnético.



Fonte: Barbosa (2009)

Existe uma tendência de manter-se este estado até que a magnetização não suporte o elevado campo magnético externo aplicado. A diferença ou a largura da magnetização depende de diversos fatores como os parâmetros do material, o formato, o acoplamento, a interação com outros elementos.

Tem destaque na curva de magnetização:

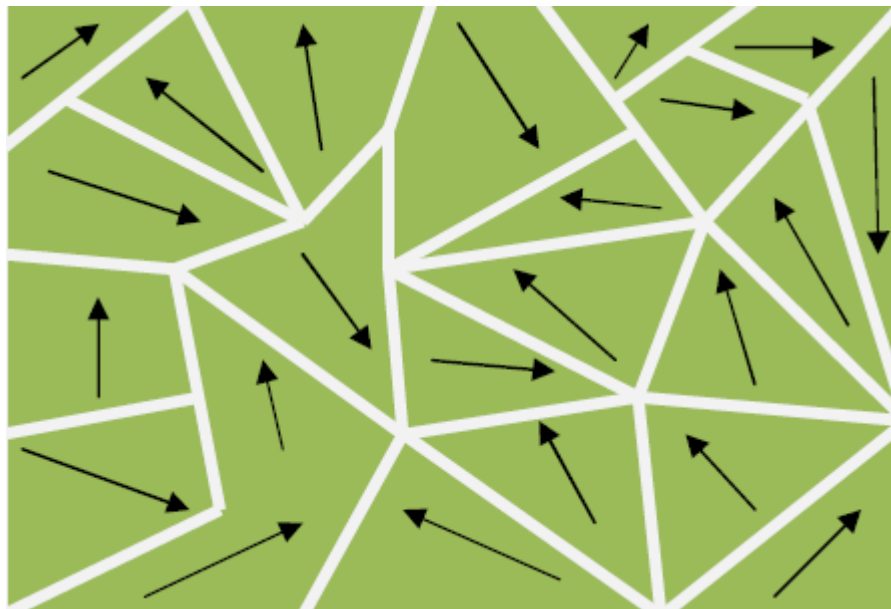
- A Remanência (mostrada na Figura 4), que é a magnetização do elemento quando removido o campo magnético externo a partir da saturação.

- A Coercividade (também mostrado na Figura 4), que indica o campo magnético onde ocorre a reversão da magnetização de uma saturação para outra.

2.2.4 Domínio Magnético

Os materiais ferromagnéticos estão divididos em domínios. É essa divisão em domínios que faz com que uma amostra de material ferromagnético possa ser magnetizada até quase a saturação, abaixo de uma temperatura chamada de Temperatura Curie (T_c) e, ainda assim, parecer macroscopicamente desmagnetizado. O que ocorre é que, cada domínio está totalmente magnetizado mas, diferentes domínios estão orientados em diferentes direções, aleatoriamente, dando ao material o aspecto desmagnetizado. Essa ideia de domínios foi postulada em 1907 por Pierre Weiss. (EYRE, 2013). Na Figura 5, exemplifica-se a estrutura de um domínio magnético.

Figura 5: Representação estrutural dos domínios magnéticos dispostos aleatoriamente em um material policristalino.



Fonte: Barbosa (2009)

A magnetização em campos aplicados fracos varia de acordo com o movimento das “paredes do domínio”, que são as fronteiras entre domínios com orientações diferentes (linhas brancas apresentadas na Figura 5). Em materiais puros, isto é, de uma fase, o movimento da

parede é reversível até certo ponto. Analisando o efeito de campos mais intensos, o movimento da parede pode tornar irreversível e, assim, o material se torna permanentemente magnetizado mesmo após a remoção do campo externo aplicado.

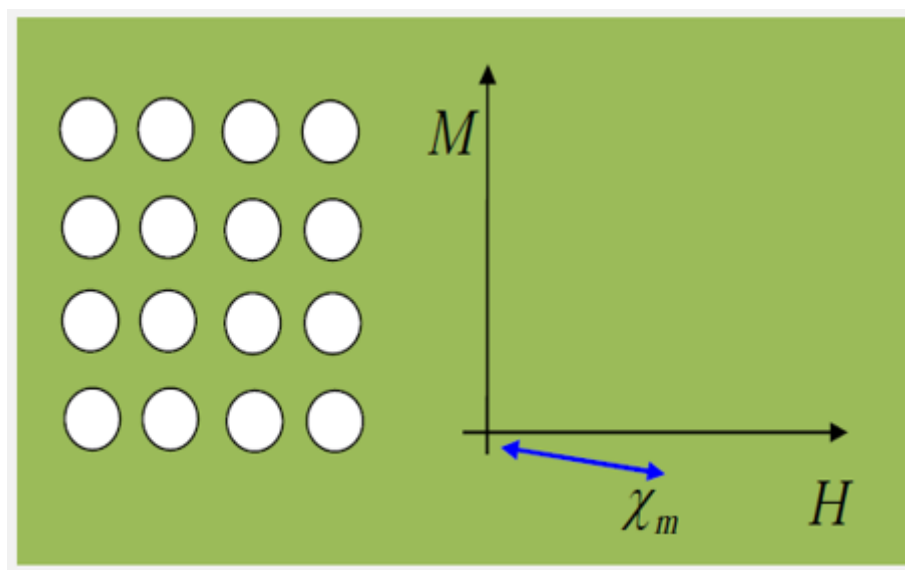
2.2.5 Fenômenos Magnéticos

Os fenômenos magnéticos ocorrem devido ao comportamento magnético ou natureza magnética das substâncias. Basicamente os fenômenos que ocorrem nos materiais são: Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo. Além do mais, outro fenômeno que vem sendo estudado são de grande importância devido ao crescimento de pesquisas e de novos equipamentos para pesquisa em nanotecnologia é o Superparamagnetismo, fenômeno que está relacionado com o alinhamento ao acaso dos momentos magnético das nanopartículas magnéticas devido à energia térmica e energia magnética (FARIA, 2005).

2.2.5.1 Diamagnetismo

O diamagnetismo é resultado do movimento orbital dos elétrons que circulam ao redor do núcleo produzindo um campo magnético. Não se gera nenhum campo magnético externo porque para cada órbita tem dois elétrons circulando em direções opostas e, assim, nenhum momento magnético é produzido (FARIA, 2005). Está presente em todos os tipos de matéria, todavia esse fenômeno é em geral mascarado por um comportamento paramagnético ou ferromagnético mais intenso e que frequentemente ocorre simultaneamente no material (BARBOSA, 2009). A Figura 6, exemplifica como fica o ordenamento do domínio magnético de um material diamagnético na presença de um campo magnético externo.

Figura 6: Ordenamento dos domínios magnéticos de material diamagnético, na presença de um campo magnético externo aplicado.



Fonte: Rodrigues (2005)

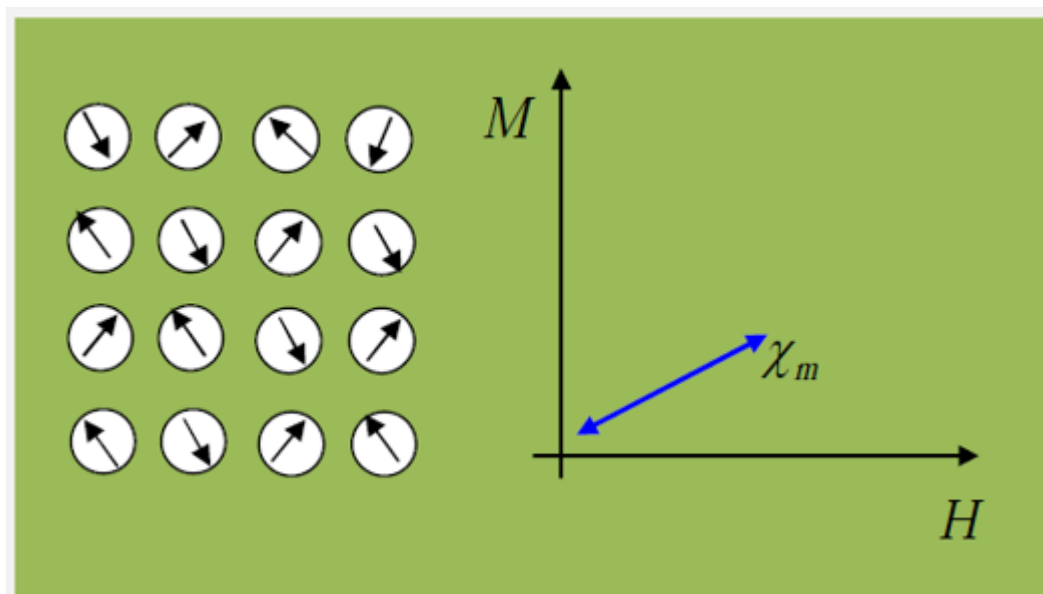
Na presença de um campo magnético externo podemos ver o diamagnetismo como uma consequência da Lei de Lenz atuando em escala atômica, havendo uma alteração na velocidade orbital dos elétrons no sentido de evitar qualquer mudança no campo magnético produzido pelo átomo. Assim, as correntes eletrônicas em cada átomo são modificadas de tal maneira que tendem a enfraquecer o campo, para isso se opõem a ele. As substâncias diamagnéticas não apresentam um momento magnético externo, ou seja, polos magnéticos como um ímã permanente. Todavia, quando submetidas a um campo externo, tendem a se afastar da região em que este campo é mais forte, daí diz-se que possui magnetismo negativo.

Como mencionado diamagnetismo é uma propriedade de todos os materiais, mas como é um efeito relativamente fraco, ele só pode ser facilmente observado nos materiais que não sejam também paramagnéticos. Analisando a susceptibilidade magnética, que nos materiais diamagnéticos é negativa e não é influenciada pela temperatura, podemos classificar um material puramente diamagnético.

2.2.5.2 Paramagnetismo

O paramagnetismo se caracteriza pelo fato dos átomos terem momentos de dipolo magnéticos permanentes. Nos materiais paramagnéticos os momentos dipolares magnéticos, orbitais e de spin/intrínseco, de cada átomo não se anulam, logo cada átomo possui um momento dipolar magnético permanente. Ao aplicar em um material paramagnético um campo magnético externo os momentos de dipolo magnético orientam-se paralelamente ao campo externo. Se o campo não for uniforme, o material paramagnético é atraído da região onde o campo magnético é menos intenso para a região, onde o campo magnético é mais intenso. A energia é menor quando o campo se orienta paralelamente ao campo aplicado, por isso essa orientação é preferida ao invés da antiparalela. Isso provoca um campo de indução que se soma ao campo aplicado, assim a susceptibilidade magnética é positiva, no entanto bem menor. A Figura 7, exemplifica o ordenamento do domínio magnético de um material paramagnético na presença de um campo magnético externo.

Figura 7: Ordenamento dos domínio magnéticos de material paramagnético, na presença de um campo magnético externo aplicado.



Fonte: Rodrigues (2005)

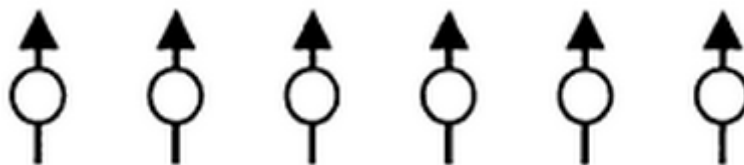
O fenômeno paramagnético ocorre quando nos átomos de um material seus elétrons estão desemparelhados e, na presença de um campo magnético externo, passa a produzir um campo magnético próprio resultante do alinhamento dos dipolos elementares atômicos. A

tendência dos momentos de dipolo magnéticos de se orientarem na direção do campo encontra na agitação térmica dos átomos uma resistência que se opõe a qualquer tipo de ordem e tenta manter os dipolos atômicos dispostos aleatoriamente (FARIA, 2005). Diferentes dos materiais diamagnético, onde sua susceptibilidade magnética não varia com a temperatura, nos materiais paramagnéticos a susceptibilidade magnética é positiva e varia com a temperatura.

2.2.5.3 Ferromagnetismo

O ferromagnetismo é o ordenamento magnético de todos os momentos magnéticos de um material magnético, na mesma direção e sentido. Nesses tipos de materiais magnéticos existe uma forte interação entre átomos próximos que mantém os seus momentos de dipolo magnético alinhados, mesmo quando o campo magnético externo é removido. (BARBOSA, 2009). A Figura 8 mostra-se a representação da orientação do momento de dipolo magnético em um material ferromagnético.

Figura 8: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material ferromagnético.



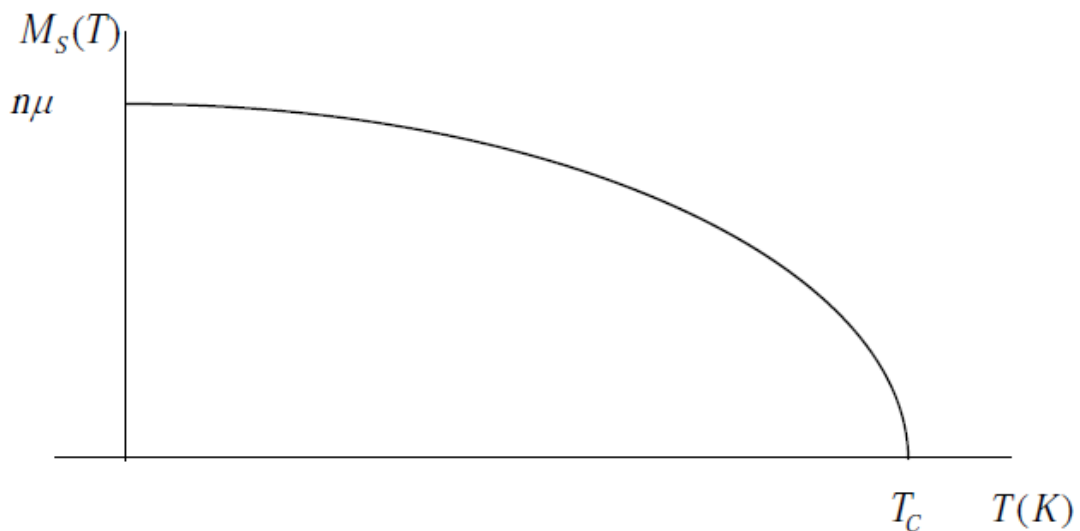
Fonte: Faria (2005)

As substâncias ferromagnéticas são caracterizadas por possuírem uma magnetização que pode persistir mesmo na ausência de um campo magnético, denominada magnetização espontânea. Esse comportamento é diferente daquilo que ocorre numa substância paramagnética em que a magnetização só aparece quando se aplica um campo magnético. Quando o campo se anula, a magnetização desaparece. (OLIVEIRA, 2011).

Se uma substância ferromagnética for aquecida a temperaturas suficientemente altas ela perderá a magnetização espontânea e se comportará como uma substância paramagnética, ou

seja, ocorre uma transição da fase ferromagnética para a fase paramagnética. Essa transição de fase ocorre ao ultrapassar a temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie, abaixo da mesma o material permanece ferromagnético e, acima da mesma o material se torna paramagnético. O gráfico vide Figura 09, mostra-se a Magnetização espontânea (M_s) em função da temperatura (T).

Figura 9: Gráfico Magnetização espontânea M_s versus temperatura T num material ferromagnético, onde T_c é a temperatura de Curie ferromagnética.



Fonte: Halliday (2007)

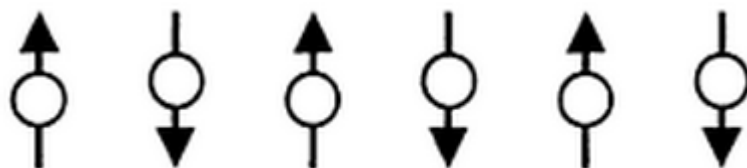
2.2.5.4 Antiferromagnetismo e Ferrimagnetismo

Relacionados ao ferromagnetismo, existem outros dois tipos de comportamento magnético que são o ferrimagnetismo e o antiferromagnetismo. Neste último existe uma interação de troca entre átomos vizinhos que força os momentos magnéticos a assumir orientações antiparalelas e, portanto, as substâncias com este comportamento apresentam um magnetismo externo muito pequeno ou mesmo nulo. Os materiais ferrimagnéticos possuem dois tipos diferentes de íons magnéticos que também se orientam paralelamente, mas, como existem dois tipos de íons com momentos magnéticos bem distintos, a magnetização resultante

não é nula. A resultante magnética é naturalmente inferior à do ferromagnetismo, mas ainda assim, encontram-se aplicações práticas para estes materiais chamados ferrites. (FARIA, 2005).

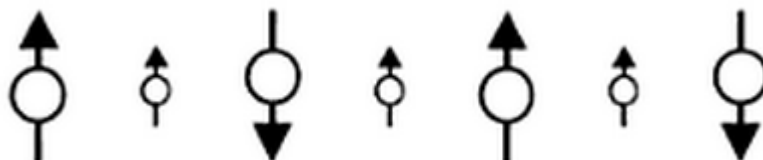
Na Figura 10 e 11, mostra-se uma comparação entre as orientações dos momentos de dipolo magnético entre os materiais antiferromagnético e o ferrimagnético.

Figura 10: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material antiferromagnético.



Fonte: Faria (2005)

Figura 11: Representação ilustrativa da orientação do momento de dipolo magnético em material ferrimagnético.



Fonte: Faria (2005)

2.2.5.5 Superparamagnetismo

Para explicar este fenômeno supõem-se um domínio magnético que possui dois estados de equilíbrio, estes estados são representados por condições de energia potencial mínima.

Para que o momento magnético passe de um estado para o outro é, portanto, necessário que haja energia suficiente para “saltar” a barreira de potencial. Devido ao fato de trabalhar com temperaturas diferentes do zero absoluto (normalmente temperatura ambiente) o domínio

tem uma energia térmica maior do que zero. Esta energia faz com que haja uma probabilidade de que ocorra esta transição. Esta probabilidade está representada pelo tempo de relaxação. O tempo de relaxação é determinado por uma frequência de tentativas de transição (devido à vibração térmica) e pelo fator de Boltzmann (que representa a probabilidade de transição), dada pela equação 9. (ROCHA; CAETANO, 2013).

$$\tau = \tau_0 e^{(-E/k_b T)} \quad (9)$$

A variável E corresponde à diferença de energia entre o eixo de fácil magnetização e da direção cuja probabilidade se quer determinar. Devido a anisotropia, esta energia E é dada pela equação 10:

$$E = K_a V \sin^2 \theta \quad (10)$$

Onde, θ é o ângulo entre a direção fácil e a direção desejada. Portanto para uma transição de 0 a 180°, a probabilidade depende da temperatura e do volume do domínio pois quanto menor o volume, menor a barreira de energia potencial. O regime superparamagnético consiste na situação em que o tempo médio de transição é pequeno comparado com o tempo de medida, ou seja, a direção de magnetização é indefinida.

2.3 MODELO MICROMAGNÉTICO

O mínimo de energia ocorre quando o momento magnético aponta na direção do seu respectivo campo local. No entanto todo o sistema contempla diversas energias, logo a configuração deve ser a que apresente a menor energia ou a que os momentos magnéticos locais apontem na direção do campo efetivo local, constituindo assim em um menor torque entre magnetização local e o campo local.

Um certo volume, d^3 , de um material cristalino apresenta número de átomos N dada pela equação 11:

$$N = 2 \left(\frac{d^3}{a_0^3} \right) \quad (11)$$

Onde, a_0 é o parâmetro de rede do material magnético. A fração indica o número de células unitárias. O cálculo da configuração magnética de todos estes átomos computacionalmente é inviável, pois há um aumento exponencial do número de átomos (REBOUÇAS, 2010).

Logo para o cálculo das configurações magnéticas de estruturas com dimensões da ordem de nanômetros temos que usar o conceito de célula de simulação. A célula de simulação representa um volume do material magnético no qual não há mudança considerável nos momentos magnéticos. O parâmetro que controla o tamanho da célula de simulação é o comprimento de troca (l_{EXH}). Logo as dimensões das células de simulação devem ser inferiores ao comprimento de troca do material. A célula de simulação será um cubo de lado (d) e representará o número de átomos dado pela equação 12. Esta célula unitária terá um equivalente para cada energia magnética envolvida no sistema. Para um sistema de i átomos com momento magnético representado pelo versor ($\vec{s}_i$) e o volume (V), a energia deste sistema é dada pela equação 12:

$$\begin{aligned} E = & -J_e \sum_i \sum_j \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j - \vec{H} \cdot M_s V \sum_i \vec{s}_i - \\ & \vec{H}_{INT} \cdot M_s V \sum_i \vec{s}_i - \frac{KV}{2} \sum_i (s_i^z)^2 + \\ & \frac{M_s^2 V}{2} \sum_i \sum_j \left(\frac{\vec{s}_i \cdot \vec{s}_j}{r_{ij}^3} - \frac{3(\vec{s}_i \cdot \vec{r}_{ij})(\vec{s}_j \cdot \vec{r}_{ij})}{r_{ij}^5} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Onde o primeiro termo representa a energia de troca sendo J_e , a integral de troca em dois átomos i e j. O segundo termo é a energia Zeeman (H). E M_s é a magnetização de saturação ou densidade de energia magnetostática e V (cm³) o volume do sistema. O Terceiro termo é a interação de troca representada por H_{INT} . O penúltimo termo é o termo da anisotropia,

K é a constante de anisotropia ou densidade de energia cristalina. E por último o termo dipolar onde r_{ik} é a distância entre o i-ésimo e o k-ésimo átomo.

2.3.1 Energia Zeeman

A energia Zeeman é a interação do campo externo com o momento magnético e apresenta mínimo quando estas duas grandezas vetoriais apontam na mesma direção e sentido.

2.3.2 Energia de Anisotropia Axial

A energia dos sólidos magnéticos depende da orientação de sua magnetização com respeito aos eixos cristalinos, chamado de anisotropia magnética. Esta propriedade caracteriza estes sólidos como magnetos duros ou moles. A anisotropia, já vista, é dada pela equação 10.

Para uma célula de volume V^3 a energia por unidade de volume é dada pela equação 13:

$$\frac{E}{d^3} = K_a \sin^2 \theta \quad (13)$$

2.3.3 Campo Dipolar

O campo dipolar é um campo que possui longo alcance, cada célula i atua sobre as outras do sistema k. O campo dipolar nas direções x, y e z são dados pelas seguintes equações: O campo dipolar na direção x, y e z são dados pelas equações 14, 15 e 16, respectivamente:

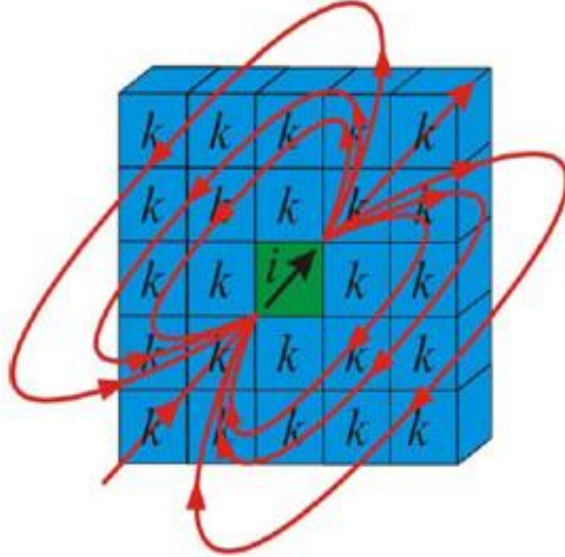
$$\bar{H}_{i \text{ Dip}}^x = M_s \sum_k \left(\frac{3n_{ik}^x (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^x}{n_{ik}^3} \right) \quad (14)$$

$$\bar{H}_{i \text{ Dip}}^y = M_S \sum_k \left(\frac{3n_{ik}^y (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^y}{n_{ik}^3} \right) \quad (15)$$

$$\bar{H}_{i \text{ Dip}}^z = M_S \sum_k \left(\frac{3n_{ik}^z (m_k^x n_{ik}^x + m_k^y n_{ik}^y + m_k^z n_{ik}^z)}{n_{ik}^5} - \frac{m_k^z}{n_{ik}^3} \right) \quad (16)$$

Onde, n_{ik} é a distância entre a célula de simulação i e a célula de simulação k . A Figura 12 mostra o comportamento do campo dipolar de uma célula i sobre sua vizinhança, representada pelo somatório em k .

Figura 12: Comportamento do campo dipolar de uma célula i sobre sua vizinhança, representada pelo somatório em k .



Fonte: Rebouças (2010)

2.4 A CÉLULA DE SIMULAÇÃO

O cálculo de estruturas magnéticas usando micromagnetismo torna possível o estudo destes sistemas magnéticos. A célula de simulação contempla um número grande de átomos. Uma escolha importante é o tamanho da célula de simulação. Este parâmetro é escolhido de forma que seu volume não contemple mudanças consideráveis de seus momentos magnéticos, uma vez que os momentos magnéticos de todos os átomos da célula são representados por um momento magnético único que é a média de todos seus átomos (REBOUÇAS, 2010). Na Figura 13 é mostrada a representação atômica da célula de simulação.

Figura 13: Representação atômica da célula de simulação



Fonte: Rebouças (2010)

Existem dois parâmetros de comprimentos importantes que são: o comprimento de parede de domínio (l_{DW}) e o comprimento de troca (l_{EXH}).

2.4.1 Comprimento de Troca

O comprimento de troca indica o comprimento abaixo do qual a interação de troca se sobressai sobre a interação magnetostática.

O comprimento característico é chamado comprimento de troca, comprimento de intercâmbio ou Exchanged Length (l_{EXH}), é este parâmetro que determina se uma certa porção do material é “pequena” ou “grande”, para que se tenha espaço suficiente para mudanças

consideráveis nos momentos magnéticos. De uma maneira simplificada, a principal diferença reside no fato de que um corpo “pequeno” tende à magnetização uniforme, enquanto um corpo considerado “grande” tende a apresentar magnetização não uniforme (REBOUÇAS, 2010).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar simulações computacionais com materiais em escalas nanométricas, utilizando programa em linguagem Fortran, afim de analisar o efeito do afastamento dos dotes magnéticos na magnetização de nanoelementos.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos avanços tecnológicos no ramo da nanotecnologia, voltado à aplicação nos dispositivos de armazenamento. Através de uma revisão bibliográfica, explicar os conceitos utilizado para realizar as simulações, descrevendo e explicando cada etapa realizada na simulação computacional. Construir gráficos a partir dos resultados da simulação, de histerese, orientação de spin, usando determinados softwares, afim de realizar uma melhor análise e estudo dos resultados obtidos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

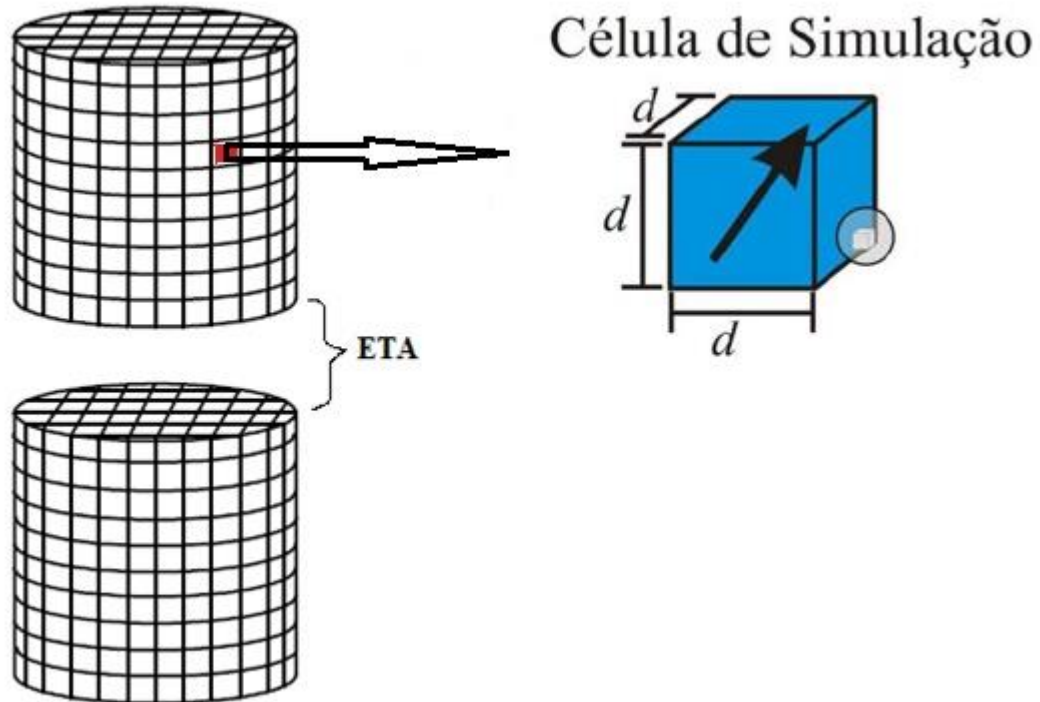
O presente capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização das simulações computacionais.

4.1 SISTEMA MAGNÉTICO EM ESTUDO

O sistema magnético estudado baseou-se em um modelo onde se considera dois cilindros de dimensões especificadas, aplica-se um campo magnético e analisa-se o que ocorre

quando variamos a distância entre os mesmos (ETA). A energia desse sistema é dado pela equação 12. Na Figura 14 é mostrado um esquema do sistema magnético em estudo. Onde, os pequenos cubos nos cilindros representam a célula de simulação.

Figura 14: Sistema Magnético em estudo



Fonte: Autoria Própria

4.2 MODELO COMPUTACIONAL

As simulações foram feitas em computador portátil, para se obter os resultados das simulações foi usado um programa em linguagem Fortran onde se calcula as energias e os campos.

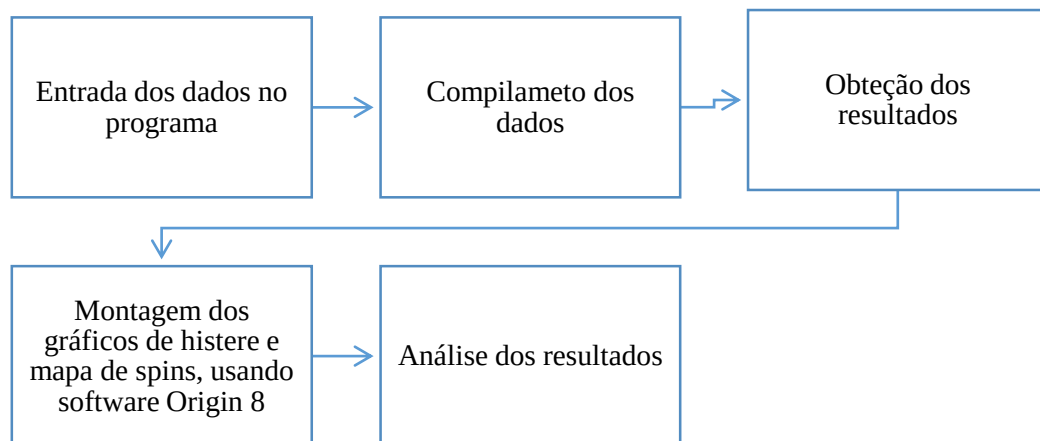
No programa, entra-se com os valores da intensidade do campo magnético, a dimensão dos dois cilindros (N_x , N_y , N_z), o tamanho das células de simulação (d) [nm] e a distância entre os cilindros (ETA) [nm].

Foram feitas 4 (quatro) simulações variando apenas os valores do ETA. Nas simulações foram usadas os seguintes valores de entrada:

- Intensidade do campo magnético: variando de -3, a 3 oersted;
- Tamanho da célula de simulação de $d = 3 \text{ nm}$;
- Dimensões dos cilindros, $N_x = 10$ ($N_x = dx10 = 30 \text{ nm}$), $N_y = 7$ ($N_y = dx7 = 21 \text{ nm}$) e $N_z = 5$ ($N_z = dx5 = 15 \text{ nm}$);
- Foram usados 4 (quatro) valores de ETA, $ETA = 0.1$ ($ETA = 0.1xd = 0.3 \text{ nm}$), $ETA = 0.5$ ($ETA = 0.5xd = 1.5 \text{ nm}$), $ETA = 1$ ($ETA = 1xd = 3 \text{ nm}$) e $ETA = 5$ ($ETA = 5xd = 15 \text{ nm}$).

Ao obter-se os resultados do programa, foram feitos os gráficos de histerese e mapa de spins no software Origin 8. Na figura 15 mostra o esquema da sequência do programa da entrada dos dados até a análise.

Figura 15 Diagrama de blocos do programa

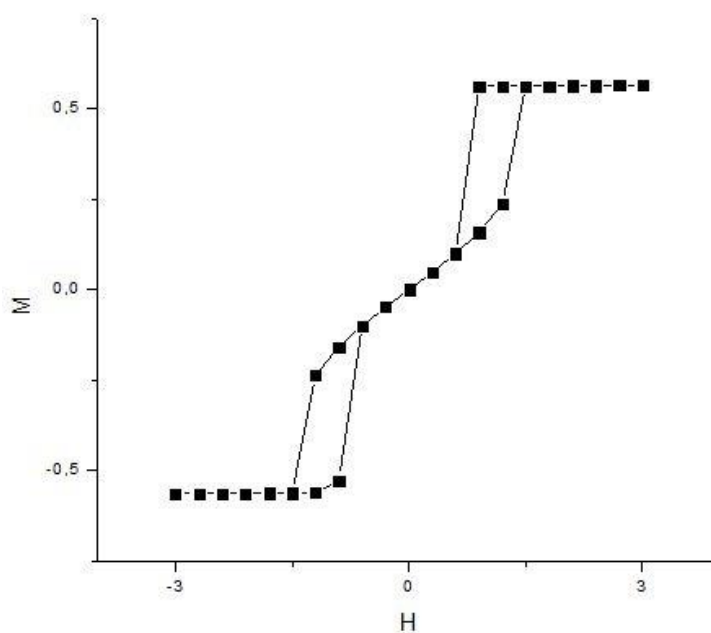


Fonte: Autoria Própria

4.3 HISTERESE E REMANÊNCIA DO MODELO ESTUDADO

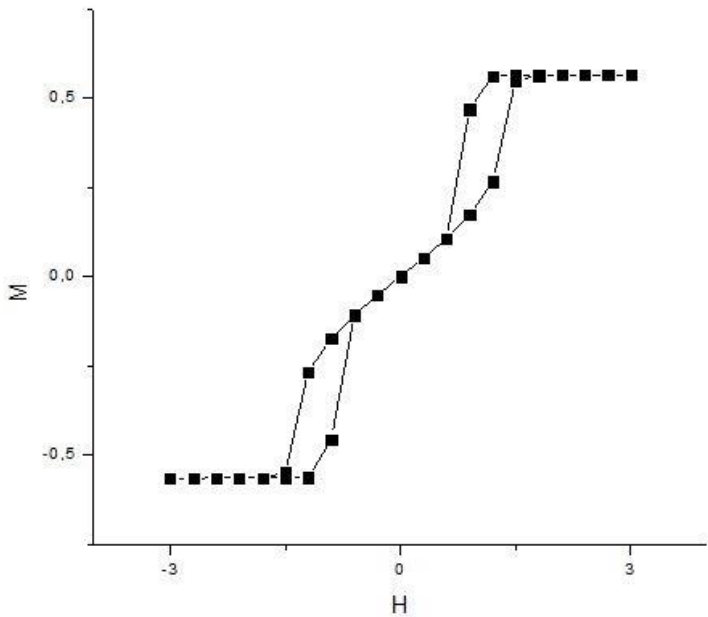
Com os dados coletados foram feitos os gráficos de histerese com os valores de entrada fixos, variando apenas o ETA. Nas Figuras 16 a 19 são apresentados os gráficos de histerese dos cilindros com $\text{ETA} = 0.1, 0.5, 1$ e 5 , respectivamente.

Figura 16: Histerese $\text{ETA} = 0.1$



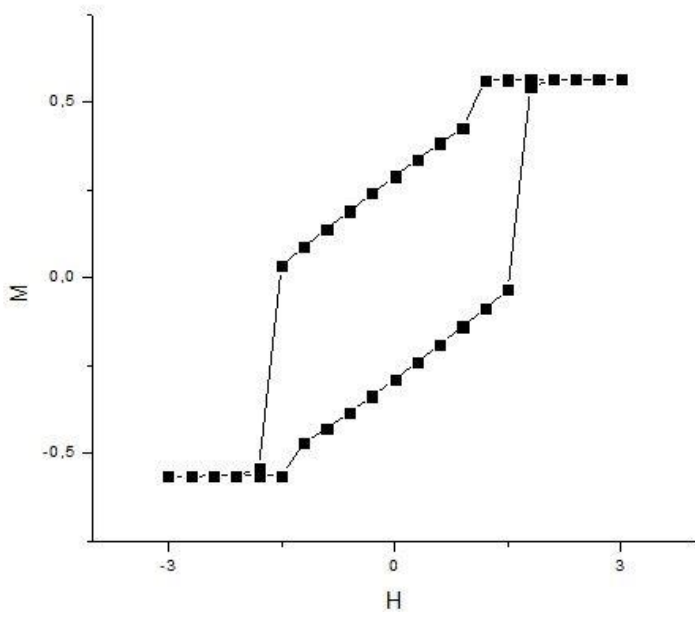
Fonte: Autoria própria

Figura 17: Histerese $\eta = 0.5$



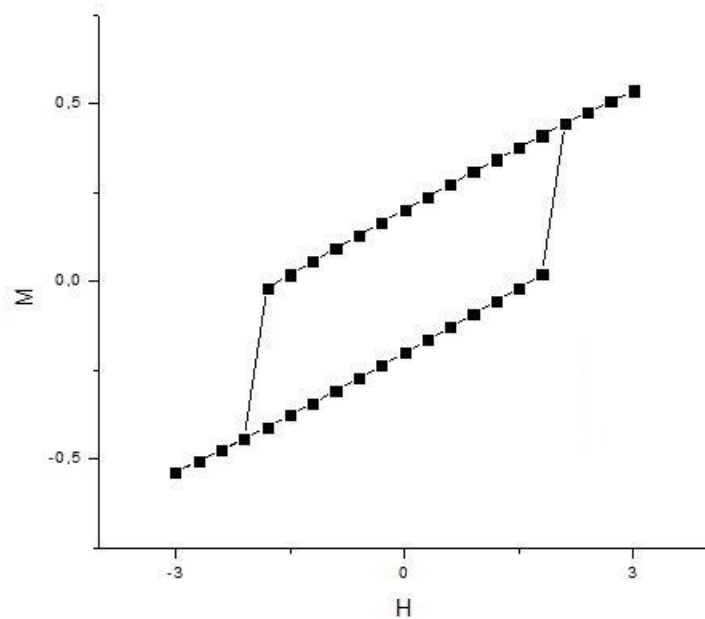
Fonte: Autoria própria

Figura 18: Histerese $\eta = 1$



Fonte: Autoria própria

Figura 19: Histerese $\text{ETA} = 5$



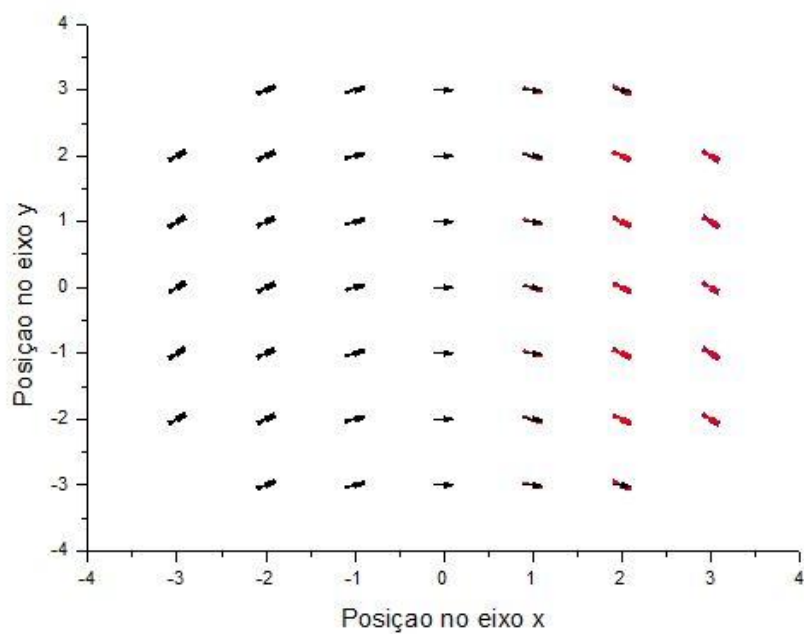
Fonte: Autoria própria

4.4 FASES MAGNÉTICAS OBTIDAS

Com os dados coletados foram feitos os mapas de spins para os cilindros e os gráficos para o campo dipolar, mostrado nas figura 20 a 28, para tanto, escolhe-se o ponto onde a intensidade do campo magnético (H) é 0 (zero). É feito o mesmo padrão da sessão 4.3, variando apenas o ETA.

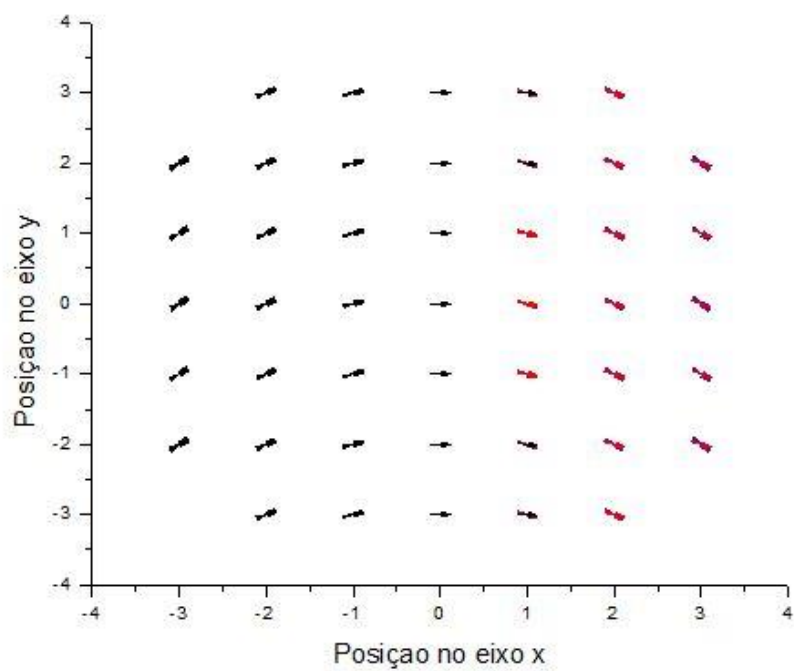
As Figuras 20 a 22 mostram a configuração de spins para $\text{ETA} = 0.1$. Sendo a figura 20 a configuração do cilindro inferior, a figura 21 a configuração do cilindro superior e a figura 22 a configuração do campo dipolar.

Figura 20: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ no cilindro inferior



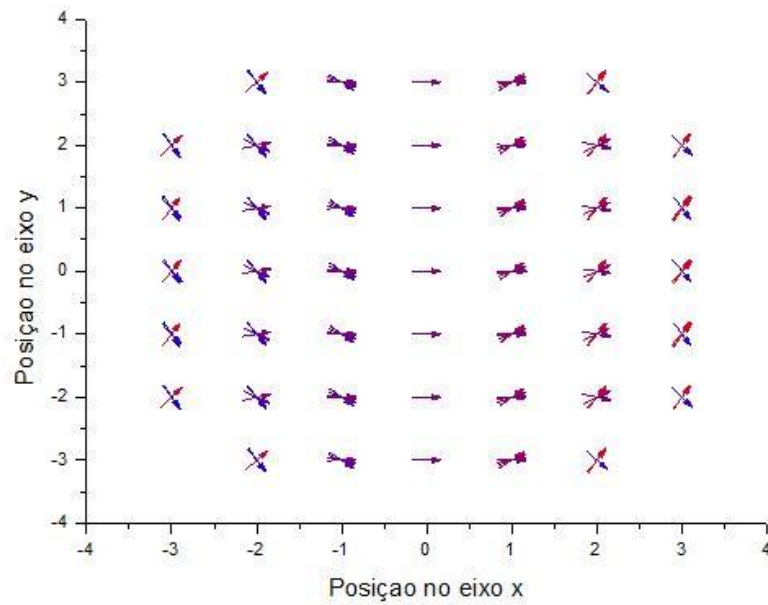
Fonte: Autoria própria

Figura 21: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ no cilindro superior



Fonte: Autoria própria

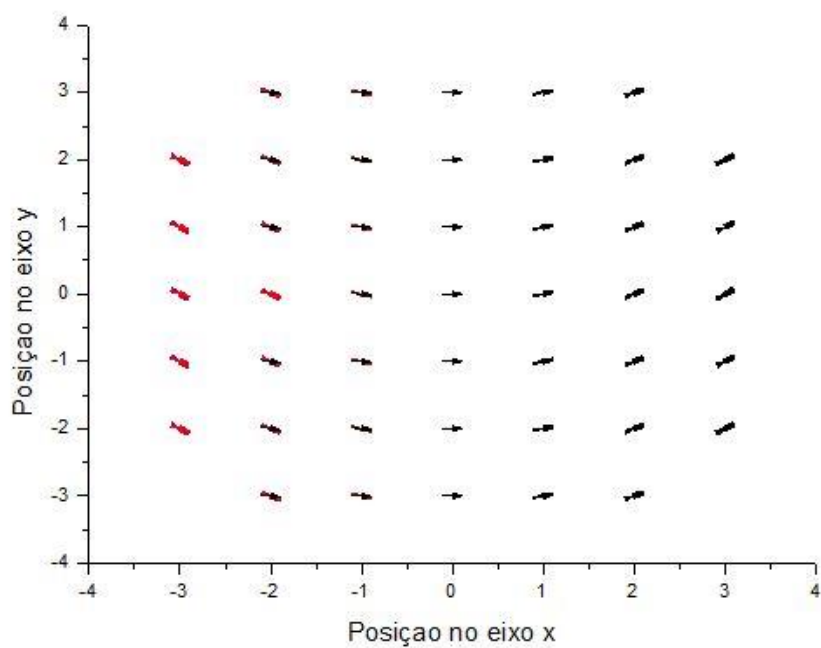
Figura 22: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.1$ campo dipolar



Fonte: Autoria própria

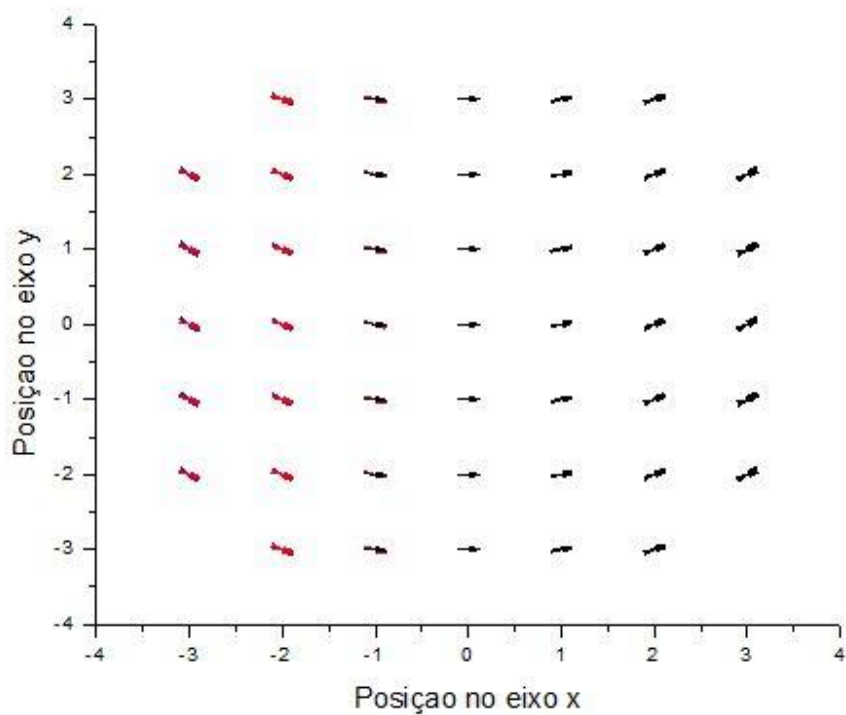
As Figuras 23 a 25 mostram a configuração de spins para $\text{ETA} = 0.5$. Sendo a figura 23 a configuração do cilindro inferior, a figura 24 a configuração do cilindro superior e a figura 25 a configuração do campo dipolar.

Figura 23: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ cilindro inferior



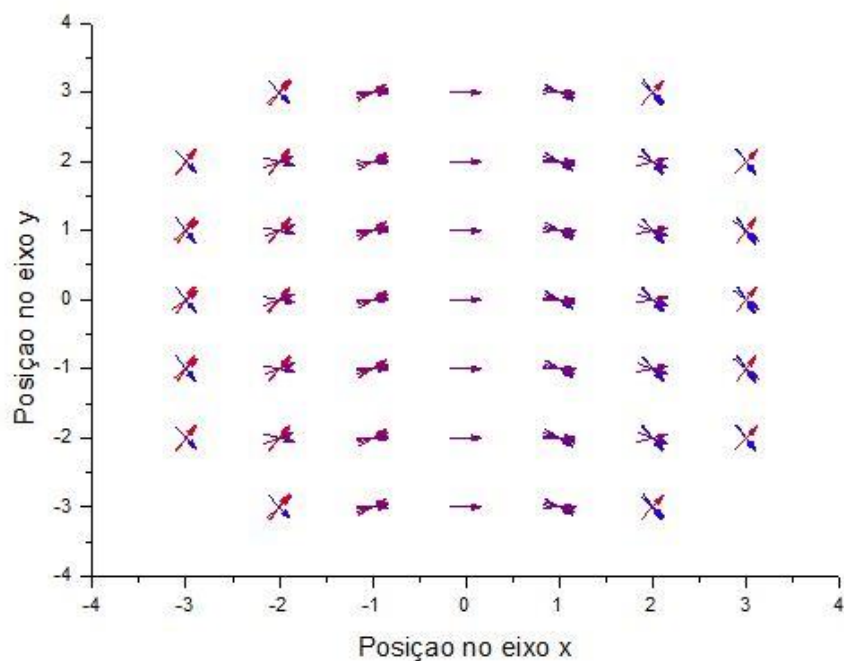
Fonte: Autoria própria

Figura 24: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ cilindro superior



Fonte: Autoria própria

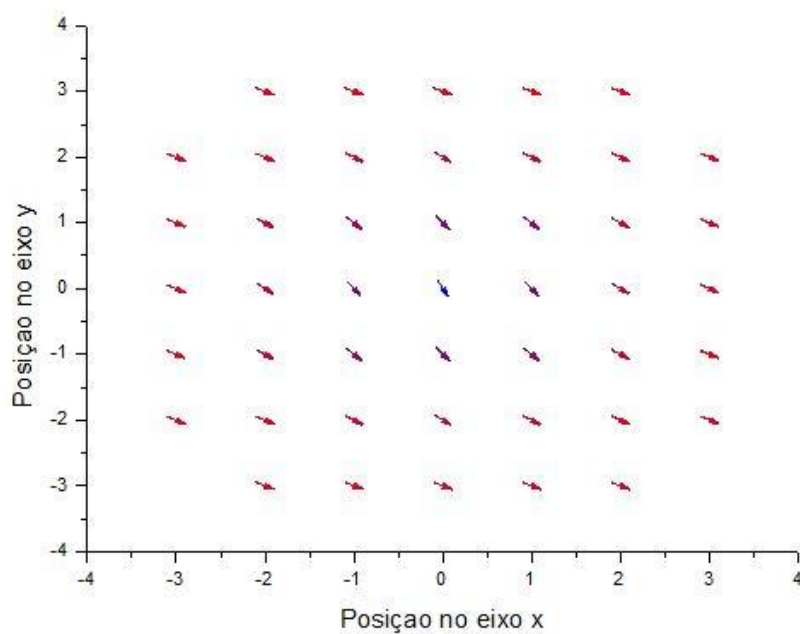
Figura 25: Mapa de spins para $\text{ETA} = 0.5$ campo dipolar



Fonte: Autoria própria

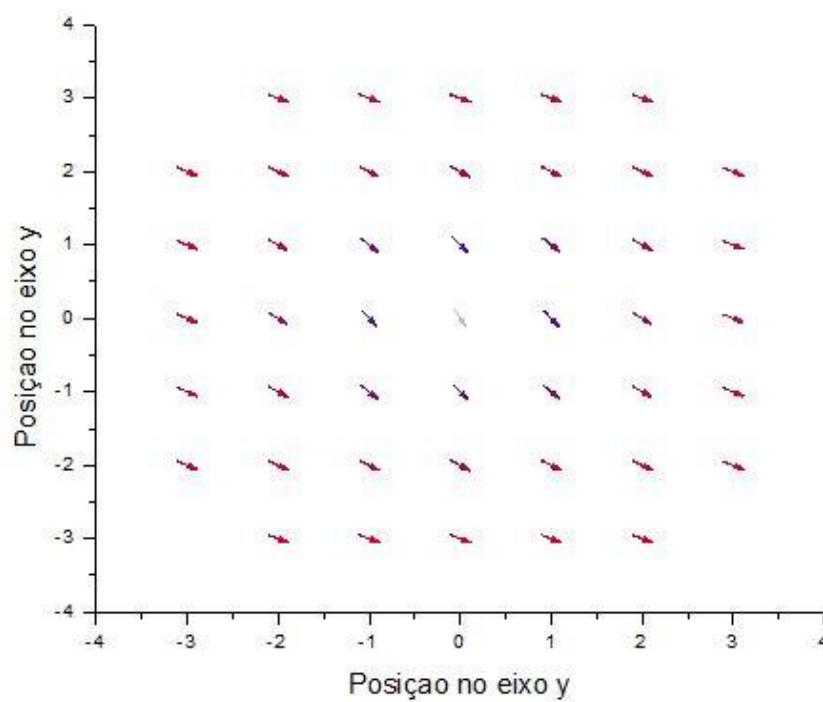
As Figuras 26 a 28 ilustra a configuração de spins para $\text{ETA} = 5$. Sendo a figura 26 a configuração do cilindro inferior, a figura 27 a configuração do cilindro superior e a figura 28 a configuração do campo dipolar.

Figura 26: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ cilindro inferior



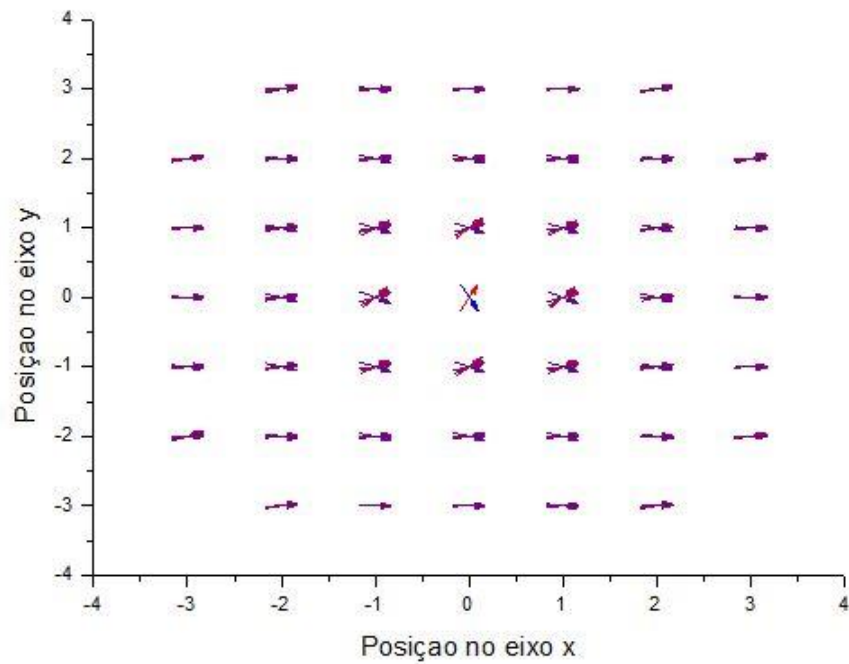
Fonte: Autoria própria

Figura 27: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ cilindro superior



Fonte: Autoria própria

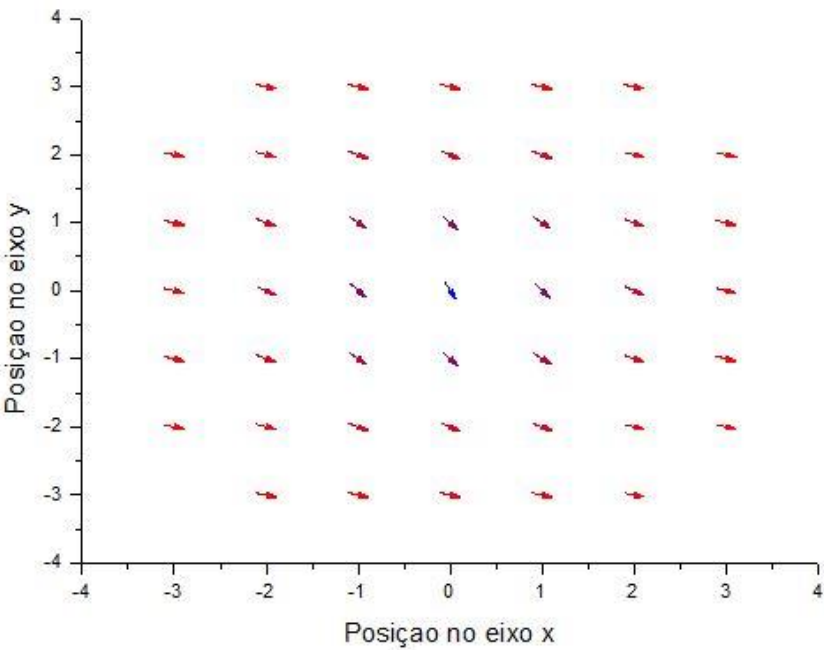
Figura 28: Mapa de spins para $\text{ETA} = 1$ campo dipolar



Fonte: Autoria própria

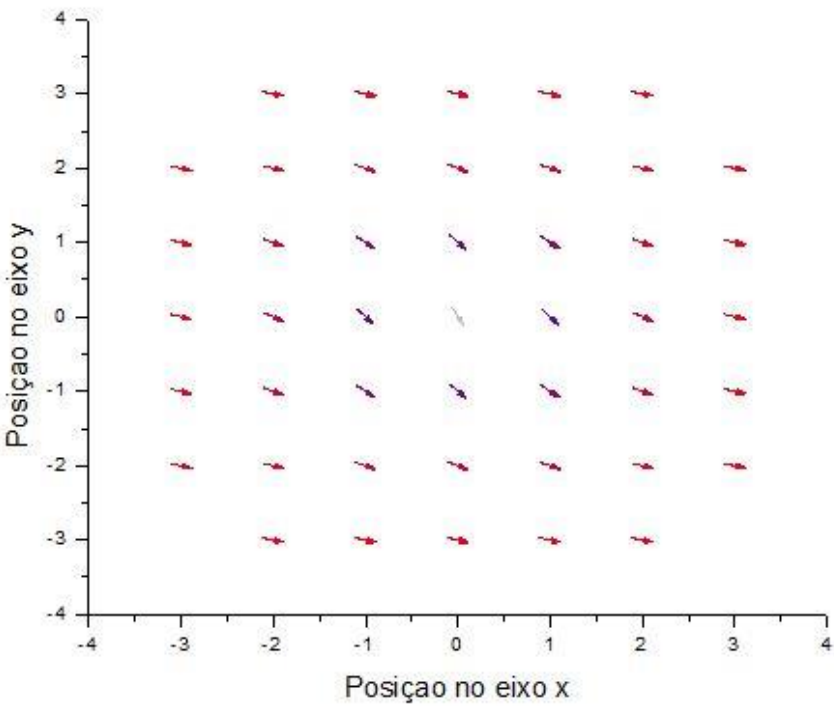
As Figuras 29 a 31 ilustra a configuração de spins para $\text{ETA} = 5$. Sendo a figura 29 a configuração do cilindro inferior, a figura 30 a configuração do cilindro superior e a figura 31 a configuração do campo dipolar.

Figura 29: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ cilindro inferior



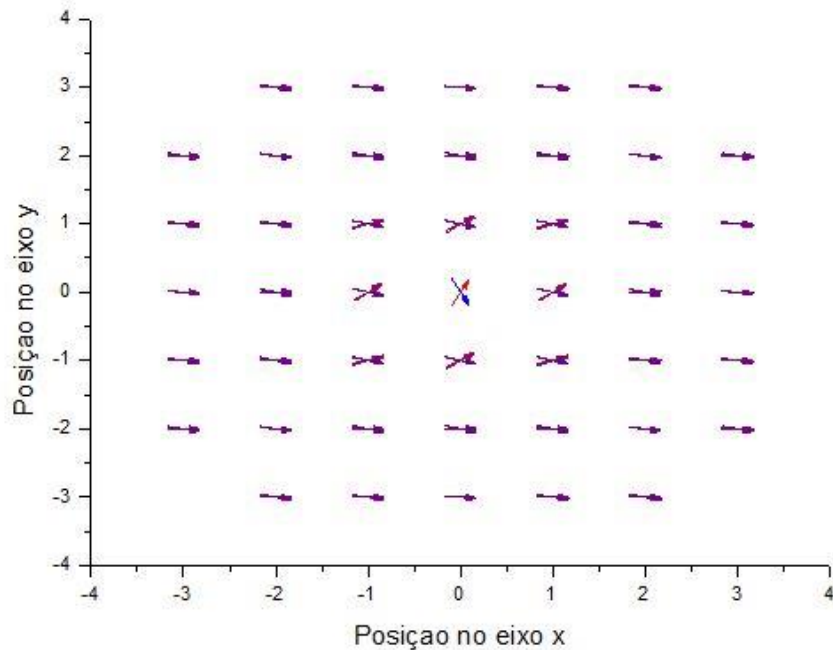
Fonte: Autoria própria

Figura 30: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ cilindro superior



Fonte: Autoria própria

Figura 31: Mapa de spins para $\text{ETA} = 5$ campo dipolar



Fonte: Autoria própria

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DAS HISTERESES

Analisando o gráfico de histerese para $\text{ETA} = 0.1$ e $\text{ETA} = 0.5$ (Figura 16 e 17), observa-se uma curva do tipo gravata, onde temos um ponto em que o eixo x (H) e o eixo y (M) são iguais a 0 (zero), para obtenção do gráfico de mapa de spin é analisado exatamente esse ponto. A curva é quase a mesma para ambos casos, porém identifica-se ocorre uma pequena mudança na curva de magnetização.

Para $\text{ETA} = 1$ e $\text{ETA} = 5$ (Figura 18 e 19) a curva de magnetização muda bruscamente comparado às anteriores, na curva temos dois pontos onde o eixo x (H) é igual a 0 (zero).

Percebe-se que a influência do efeito dipolar a uma distância da ordem de grandeza da altura começa a se torna desprezível.

5.2 RESULTADOS DOS MAPAS DE SPINS

Analisando o ponto em que temos a intensidade de campo magnético igual a 0 (zero), plota-se o mapa de spins. Foram 3 (três) mapas de spins para cada ETA, sendo 1 (um) mapa de spin para cada cilindro, inferior e superior, e 1 (um) mapa de spin para campo dipolar.

Para $ETA = 0.1$ (Figura 20 e 21) e $ETA = 0.5$ (Figura 23 e 24), temos orientações de spins dos cilindros semelhantes, mudando apenas em algumas cores dos spins, onde essa cor representa o ângulo do spin. Como existe um ponto na curva de histerese (Figura 16 e 17) em que o eixo y (magnetização) e o eixo x (intensidade do campo magnético) são iguais a zero, os mapas de spins dos cilindros deveriam ser contrários para anularem-se, o que não ocorreu nos resultados, isso pode não ter acontecido por falhas na simulação por exemplo.

Para $ETA = 1$ (Figura 26 e 27) e $ETA = 5$ (Figura 29 e 30), o mapa de spins apresenta uma mudança notória, comparado aos anteriores, pois apresenta orientação em formato de S, a diferença entre ambos é a mesma dos anteriores, apenas no ângulo dos spins.

No mapa de spin dipolar (Figuras 22, 25, 28 e 31) apresenta-se a orientação dos spins dos 2 (dois) cilindros sobrepostos, onde obtemos uma visualização melhor da orientação dos mesmos.

Estes gráficos dos mapas de spins confirmam que com o aumento do afastamento, e atingindo a ordem de grandeza da altura dos cilindros, o efeito dipolar começa a se tornar desprezível frente às outras interações existentes.

CONCLUSÃO

O estudo desse tema é de suma importância para a área da nanotecnologia, como a spintrônica. Uma proposta para a continuação deste trabalho é o estudo das excitações topológicas do tipo de vórtices nestes nanoelementos e sua relação com as dimensões e materiais dos cilindros.

Pelos gráficos de histereses, percebe-se que a influência do efeito dipolar a uma distância da ordem de grandeza da altura, começa a se torna desprezível.

Pelos mapas de spins, confirma-se que com o aumento do afastamento, e atingindo a ordem de grandeza da altura dos cilindros, o efeito dipolar começa a se tornar desprezível frente às outras interações existentes.

Por fim, a partir das simulações, análise dos gráficos pode-se concluir que os resultados obtidos neste trabalho mostraram que dependendo da distância entre os cilindros, ocorrem uma significativa mudança na magnetização desses nanoelementos, mudando sua histerese e mapa de spin.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIBICH e o Nobel de Física de 2007. EDITORA HARBRA – HARBRANews. 2008. Disponível em: <<http://www.harbra.com.br/HARBRANews/vernews.php?id=21>>. Acesso em: 08 fev. 2014.

BARBOSA, Mateus Bruno. Um Estudo do Magnetismo ao Nanomagnetismo e Suas Aplicações – Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Física – Universidade Federal do Acre – Rio Branco – 2009.

EYRE, Walkiria. Nanoestruturas Magnéticas. 2013. Disponível em: <<http://nano.wikispaces.com/file/view/nanomag.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

FARIA, R. N. e LIMA, L. F. C. P.; Introdução ao Magnetismo dos Materiais. Livraria da Física. São Paulo 2005.

FERREIRA, Luiz Fernando Silva. Simulação Computacional de Nanodiscos Magnéticos – Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Química e Exatas – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – Jequié – 2012.

FIGUEIREDO, José Longras. As inimagináveis potencialidades da Nanotecnologia. **Mundus**, Viana do Castelo, ago. 2006. Disponível em: <<http://w3.uaig.pt/~jlongras/Entrevista-Mundus.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

HALLIDAY, D., RESNICK, R. e WALKER, J.; Fundamentos de Física Vol.3, LTC, 2007.

INTEL. Architecture Leads the Microarchitecture Innovation Field. Disponível em: <<http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/microarchitecture/microarchitecture-overview-general.html>>. Acesso em: 28 out. 2013.

MACHADO, Tiago Siman. Portas Lógicas Magnéticas – Dissertação de Mestrado – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – Rio de Janeiro – 2006.

NOVAK, Miguel A. Introdução ao Magnetismo – II Escola Brasileira de Magnetismo – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

OLIVEIRA. Capítulo 9 – Ferromagnetismo. Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://fig.if.usp.br/~oliveira/mes09.pdf>> Acesso em: 10 fev. 2014.

PIROTA, Kléber Roberto. Introdução ao Nanomagnetismo – VII Escola Brasileira de Magnetismo Jorge André Swieca – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – 2009.

REBOUÇAS, Gustavo de Oliveira Gurgel. Nucleação de Vórtices e Paredes de Domínio em Nanoestruturas Magnéticas – Tese de Doutorado – Departamento de Física Teórica e experimental – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Natal – 2010.

ROCHA, Alexandre Reily; CAETANO, Rodrigo André. Fronteiras em Gravação Magnética. **Unicamp**, Campinas, 2013. Disponível em: <<http://www.ifi.unicamp.br/~knobel/FI204/magrec.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

RODRIGUES, S.; Mini-Curso Propriedades Magnéticas dos Materiais. XIV ENSEF, 2009.

SILVA, Ricardo Lopes da. Dinâmica de Spins na Presença de Defeitos em Estruturas Magnéticas Confinadas: Aplicações a Nanodiscos Magnéticos – Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada – Universidade Federal de Viçosa – Viçosa – 2009.