



**FACULDADE DE EDUCAÇÃO E MEIO AMBIENTE**

**MARCOS ROBERTO MOREIRA ALVES**

**MAGNETISMO:**

**DOS TEMPOS ANTIGOS À ERA DOS FILMES FINOS**

ARIQUEMES-RO

2011

**Marcos Roberto Moreira Alves**

**MAGNETISMO:  
DOS TEMPOS ANTIGOS À ERA DOS FILMES FINOS**

Monografia apresentado ao curso de graduação em Licenciatura em Física da Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

Prof. Orientador: Ms. Gustavo Farias

Ariquemes-RO

2011

**Marcos Roberto Moreira Alves**

**MAGNETISMO:**

**DOS TEMPOS ANTIGOS A ERA DOS FILMES FINOS**

Monografia apresentada ao curso de graduação em Licenciatura em Física, da Faculdade de Educação e Meio Ambiente como requisito parcial à obtenção do título de licenciado em Física.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Orientador: Ms. Gustavo José Farias

Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

---

Prof. Ms. Thiago Nunes Jorge

Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

---

Prof<sup>a</sup>. Ms. Nathália Vieira Barbosa

Faculdade de Educação e Meio Ambiente – FAEMA

Ariquemes, 4 de julho 2011

*Às pessoas que me apoiaram nos momentos mais difíceis e me deram força para que eu chegasse ao meu objetivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e irmãos que me deram apoio nesta empreitada.

Aos amigos e colegas que nas horas difíceis se reuniram e incentivaram, não deixando o desânimo interromper nossa jornada acadêmica.

A todos que colaboraram de algum modo para a realização deste trabalho.

*Qual é o sentido da vida? Tem um sentido a minha vida? A vida de um homem tem sentido? Posso responder a tais perguntas se tenho espírito religioso. Mas fazer tais perguntas tem sentido? “Respondo: Aquele que considera sua vida e a dos outros sem qualquer sentido é fundamentalmente infeliz, pois não tem motivo algum para viver”.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

O magnetismo faz parte de um dos principais pilares da física: o eletromagnetismo. O avanço dos estudos científicos nessa área só foi possível devido a constantes pesquisas desses fenômenos, porém a utilização do magnetismo nos primórdios era feito por mágicos e para fins religiosos. No decorrer da história, os desenvolvimentos no campo do magnetismo provocaram grandes alterações nas sociedades. A partir do século XIX, com a industrialização e o desenvolvimento da teoria eletromagnética, o magnetismo começou a tomar ares de ciência, porém a compreensão dos fenômenos magnéticos da matéria só foi possível com o surgimento da física quântica. Atualmente, grande parte da pesquisa nessa área se concentra na confecção de filmes finos magnéticos e da Spintrônica, que acabaram por proporcionar novos métodos de armazenamento de grandes quantidades de informações digitais.

**Palavras-chave:** Magnetismo, Filmes Finos, Spintrônica.

## ABSTRACT

Magnetism is one of the pillars of physics: the electromagnetism. Advanced scientific studies in this area have only been made possible thanks to the continuing investigations of these phenomena, but the utilization of magnetism was initially performed by magicians and field of magnetism have caused major changes in society. As of the Nineteenth Century, and with the advent of industrialization and the development of electromagnetic theory, the study of magnetism was categorized as science; however, the understanding of the magnetic phenomena of matter only became possible with the birth of Quantum Physics. Currently, much of the focus in this area is employed in the making of thin magnetic film strips and spintronics, which will eventually provide new methods of integrating and storing masses of digital information.

Key words: Magnetism, thin films, spintronics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática dos arranjos dos spins em um material paramagnético.....	22
Figura 2: Representação esquemática do campo magnético induzido (Representado pelas setas mais finas) por um campo externo $\mathbf{H}$ em um material diamagnético....	24
Figura 3: Representação esquemática dos spins em um material Ferromagnético..	25
Figura 4: Representação esquemática dos domínios Magnéticos.....	26
Figura 5: Representação esquemática do efeito do campo magnético sobre materiais ferromagnéticos compostos de domínios magnéticos.....	26
Figura 6: Representação esquemática de um ciclo de histerese.....	27
Figura 7: Representação esquemática do arranjo dos spins em um material Antiferromagnético.....	28
Figura 8: Representação esquemática do arranjo dos spins em um material ferrimagnético.....	29
Figura 9: Diagrama esquemático de epitaxia de feixe molecular.....	31
Figura 10: Representação esquemática de uma válvula de spin.....	36
Figura 11: Representação esquemática da orientação dos spins up e spin down em órbita de um átomo.....	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MBE- Epitaxia de Feixe Molecular

CD- Compact Disc.

HD- Hard Disc.

MB- Mega Bite

GMR- Magneto Resistência Gigante

T- Temperatura

K- Kelvin

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	15
2.1 OBJETIVO GERAL .....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
3. METODOLOGIA.....	16
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	17
4.1 MAGNETISMO.....	17
4.1.1 Aspectos Históricos do Magnetismo .....	17
4.1.2 O Magnetismo na Europa e Grécia Antiga.....	17
4.1.3 O Magnetismo na China.....	18
4.1.4 O Magnetismo na América Central .....	19
4.1.5 O Magnetismo como Ciência .....	19
4.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	21
4.2.1 Materiais Paramagnéticos.....	22
4.2.2 Materiais Diamagnéticos .....	23
4.2.3 Materiais Ferromagnéticos .....	24
4.2.4 Materiais Antiferromagnéticos.....	28
4.2.5 Materiais Ferrimagnéticos .....	29
4.3 FILMES FINOS MAGNÉTICOS .....	29
4.3.1 Filmes Finos de Multicamadas Magnéticas.....	29
4.3.2 Deposições por Sputtering .....	30
4.3.3 Filmes Finos de Silício .....	32
4.3.4 Aplicações Tecnológicas dos Filmes Finos .....	32
4.4 MAGNETO RESISTÊNCIA GIGANTE .....	33
4.4.1 Magneto Resistência Gigante e Spintrônica .....	33
4.5 MAGNETISMO E SUAS APLICAÇÕES.....	35

CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
REFERÊNCIAS.....	38

## INTRODUÇÃO

A observação dos primeiros efeitos do magnetismo se deu há mais de 2800 anos, nas proximidades do vilarejo chamado de Tessália, que mais tarde veio a se chamar Magnésia, cidade situada ao norte do mar Egeu, na Turquia, fenômeno o qual foi observado primeiramente em um minério chamado magnetita. (NOVAK, 2003). Esse minério foi considerado possuidor de poderes mágicos, onde o filósofo Grego Tales de Mileto considerava esses poderes oriundos da alma. (FERREIRA, 2010). A atração e repulsão magnética observada na época eram explicadas com sendo devido à secura da magnetita que se alimentava do ferro.

As observações dos fenômenos magnéticos realizadas pelos chineses culminaram na construção da primeira bússola, que a partir de 1100 começou a ser utilizada para a navegação náutica na China. Na América Central o magnetismo já era utilizado pela civilização Olmeca entre 1400 e 1000 a.c. (PESSOA JÚNIOR, 2010). O magnetismo nessas sociedades se calcou em sua utilização para fins mágicos e religiosos.

Através do médico inglês William Gilbert o magnetismo começou a tomar ares de ciência. Realizando experiências práticas, Gilbert veio a derrubar muitos mitos e lendas, sendo que um deles era que as pedras ímã atraíam a carne, madeira e ouro. (MARTINS, 2004).

No século XIX Oersted e Ampère, definiram o conceito de campo magnético, e obtiveram um meio de produzir fenômenos magnéticos através de fenômenos elétricos. Assim formaram-se as bases para uma nova ciência, o eletromagnetismo, demonstrando que a eletricidade e o magnetismo não são independentes, são fenômenos complementares. No início do século XX, com o surgimento da mecânica quântica, descobriram-se novos conceitos para a ciência do magnetismo. (NOVAK, 2003).

Na natureza, os diferentes tipos de minérios reagem de forma diferente quando submetidos a um campo magnético externo, sendo assim eles possuem basicamente a seguinte classificação: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos.

Atualmente vêm-se buscando meios de guardar informações, sons, vídeos em espaços cada vez menores, para isso é necessário desenvolver novos equipamentos. Os filmes finos são uma boa opção para armazenar altas quantidades de dados em espaços cada vez menores. (BUENO, 2007). Uma das técnicas mais utilizadas para a fabricação desses filmes é conhecida como Sputtering.

A epitaxia de feixe molecular (MBE) é uma das técnicas mais avançadas de deposição a vácuo utilizada para a construção dos filmes finos. (BUENO, 2007). Através das técnicas de deposição é que se alcançou êxito na construção de filmes finos, conseguindo aumentar a quantidade de informações armazenadas e a diminuição no espaço utilizado. Com essas técnicas conseguiram a redução e a qualidade nos equipamentos de gravação e leitura de dados melhorando a reprodução. (LANDI, 2009).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre os aspectos históricos do magnetismo, mostrando suas aplicações em diversas civilizações, assim como fazer um estudo sobre os diferentes materiais magnéticos e as principais pesquisas feitas atualmente na área de filmes finos magnéticos e Spintrônica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Buscar pelas épocas onde houve um avanço e descobertas nas observações dos fenômenos magnéticos;
- Mostrar as contribuições de certos personagens da história, que deram grandes contribuições ao desenvolvimento dessa área;
- Entender a construção de filmes finos, e suas aplicações comerciais;
- Determinar o desenvolvimento e as técnicas de gravação e leitura avançadas de dados.

### **3 METODOLOGIA**

Esse estudo trata-se de uma revisão bibliográfica onde foram utilizados alguns referenciais teóricos disponibilizados em livros, periódicos revistas eletrônicas artigos científicos, teses de mestrado e doutorado, congressos, e bases de dados eletrônicos, publicados a partir do ano de 1972, como tempo inicial, tendo o último ano citado o ano de 2011.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 MAGNETISMO**

#### **4.1.1 Aspectos Históricos do Magnetismo**

O magnetismo faz parte de um dos pilares da física conhecido como eletromagnetismo. O magnetismo vem sendo estudado pelo menos há 2800 anos. (COELHO, 2007). Os homens da época observavam que certo tipo de minério (magnetita) tinha uma força misteriosa que os diferenciava dos demais, o qual exercia uma atração nos objetos metálicos que se aproximavam. Esse tipo de minério foi encontrado por um pastor chamado Magne que ao pastorear suas ovelhas próximas ao vilarejo, em um lugar da Grécia antiga chamado Magnésia, observou que aproximando a ponta metálica de seu cajado, o mesmo exercia uma forte atração, ficando o cajado grudado no minério. A esse minério se deu o nome de magnetita ( $\text{FeO Fe}_2\text{O}_3$ ). (NOVAK, 2003).

#### **4.1.2 O Magnetismo na Europa e Grécia Antiga**

No início, os fenômenos magnéticos desse estranho minério encontrado na Magnésia eram considerados mágicos. Tales designou essa força de atração magnética do minério como sendo um fenômeno da alma. Com o desconhecimento dos mecanismos físicos que atuam na magnetita, na época, dava-se a esses fenômenos visíveis características sobrenaturais. Empédocles descrevia os fenômenos magnéticos como efeito do amor que, trabalhando junto com o ódio, regia o universo. Alexandre de Afrodisias e Galeno por volta de 200 a.c. acreditavam que o ferro retirava sua nutrição da pedra ímã, supondo assim que tal minério teria uma força vital.

Os filósofos Diógenes de Apolônia, Anaxágoras de Clazômenas, Sócrates de Atenas, Platão de Atenas, o poeta Tito Lucrécio Caro e o sábio Plínio, acreditavam na propriedade da “secura”, atribuída à magnetita, que se alimentava da “umidade” do ferro, por isso a propriedade de atração da pedra. Essa opinião era compartilhada com vários filósofos da época. Platão e Lucrécio observaram que a magnetita, além

de atrair objetos metálicos, poderia também os repelir. Nesta época ainda não se conhecia o conceito de pólo magnético. (PESSOA JÚNIOR, 2010).

#### **4.1.3 O Magnetismo na China**

A descoberta do magnetismo na China, ocorreu no ano de 220 a.c. um século após esta data, os chineses já tinham visto também a repulsão entre os minérios magnéticos. A China estava se nivelando a Europa em conhecimentos sobre o magnetismo. Os chineses conheciam a pedra ímã como pedra do amor ou amantes, pela atração exercida sobre as substâncias metálicas aproximadas dela.

No século III a.c. à pedra ímã, muito utilizada pelos mágicos e adivinhos em seus espetáculos e truque mágicos, era creditado poderes sobrenaturais. Com o passar do tempo foi-se verificando novas utilizações para a pedra ímã. Construíram uma agulha de pedra ímã e a colocaram para flutuar em água e um pouco de graxa para garantir que a agulha não afundasse, assim observou-se que a agulha estava apontando sempre para uma única direção, através desta observação abriram caminho para novas formas de se utilizar os fenômenos magnéticos, começaram o empregando como equipamento de navegações, passando a ser usada na orientação de navios que cruzavam os mares.

A construção da primeira bússola de precisão aconteceu no período de 400 d.c.. Nessa época os chineses imantavam agulhas de ferro esfregando-as em um pedaço de pedra ímã, levando ao desenvolvimento da primeira forma precisa de uma bússola magnética. Em 983 tem-se o relato de uma agulha magnetizada e suspensa por um fio de seda, grudado por uma pequena porção de uma cera, em um lugar fechado, isento de vento, onde estava a agulha sempre apontada para o norte. Essa é a descrição mais antiga de uma bússola precisa da história.

Em 1088, o astrônomo chinês Shen Kua mencionou duas bússolas suspensa por um fio e também a bússola flutuante, onde uma agulha imantada flutuando em cima de uma folha de junco, demonstrando sempre a mesma direção norte. O uso da bússola como ferramenta náutica de orientação foi concretizado somente a partir de 1100 d.c. na China. O desenvolvimento da bússola de precisão com novas observações feitas no uso diário permitiu aos chineses verificar que a agulha não aponta para o norte ou sul celeste, mas que possui certo desvio angular, esse

fenômeno é conhecido como declinação magnética. Na Europa a declinação magnética foi descoberta em 1450, como indicam os relógios de sol portáteis fabricados em Nuremberg e Augsburg. Os chineses descobriram a declinação magnética 180 anos depois do desenvolvimento da bússola de precisão, desenvolvimento da bússola náutica na Europa se deu 100 anos após a China, na Europa passou-se 270 anos do desenvolvimento da bússola para descobrirem a declinação, isto a partir de 1180. (PESSOA JUNIOR, 2010).

#### **4.1.4 O Magnetismo na América Central**

O descobrimento do magnetismo na América Central tem suas evidências na civilização Olmeca no período entre 1400 e 1000 a.c. O desenvolvimento do magnetismo nessa parte se deu mais pela prática religiosa do mercúrio, que era utilizado em seus ritos religiosos. Eles colocavam um pedaço de ímã no mercúrio e utilizavam como bússola as suas construções. (PESSOA JÚNIOR, 2010).

#### **4.1.5 O Magnetismo como ciência**

As descobertas descritas nas seções anteriores ocorreram em pontos distintos: América Central, Europa e China, pois em cada um desses pontos existiam depósitos de pedra ímã. O uso do magnetismo no princípio por mágicos e para fins religiosos culminou em um desenvolvimento na área do magnetismo, que atualmente é um grande ramo da ciência.

Petrus Peregrinus ou Pierre de Maricourt escreveu o mais importante tratado medieval sobre o magnetismo. Esse tratado foi lavrado através das experiências que realizou sobre a terrella, uma esfera de pedra ímã. Em seu experimento ele colocou uma agulha imantada em diferentes pontos da terrella. Desenhando as orientações da agulha na superfície da esfera, obtendo linhas iguais aos meridianos terrestres. Em outra experiência, colocou a esfera mergulhada em um prato fundo, boiando na água de tal forma que o pólo norte da pedra se orientava para o pólo norte celeste. Dividindo a esfera ao meio têm-se dois pólos o norte e o sul, e os pólos diferentes se atraem, acreditavam que um ímã apontava diretamente para o

pólo norte celeste, pois não conheciam a declinação magnética. Peregrinus foi o construtor de uma bússola flutuante feita de pedra ímã e uma bússola com agulha de ferro e pivô seco, ambas com escala com divisões de dois graus. (PESSOA JÚNIOR, 2010).

Em 1600 o médico inglês William Gilbert, reuniu uma grande quantidade de observações feitas dos ímãs e efeitos magnéticos, através de muitas experiências, conseguiu distinguir cinco fenômenos magnéticos: atração, direção ou verticidade, variação declinação, inclinação ou dip e a revolução da terra que seria explicada pela sua energia magnética. Gilbert escreveu uma das obras científicas mais importantes de todos os tempos o livro “De magnete Magneti cisque corporibus Et de magno magnete tellure physiologia nova”. A criação dessa obra completa do magnetismo foi um marco da evolução do século XVI e XVII, e buscava uma nova cosmologia com enfoque central no magnetismo ou uma nova filosofia da natureza.

Em seus primeiros capítulos o autor revisou criticamente os escritores anteriores sobre o magnetismo, derrubando os mitos e as falsidades criadas para enganar as populações das regiões onde vivem e trabalham. Uma das fábulas que ele aboliu era da existência de rochas ímã que atrainham carne, ouro e madeira. Gilbert usa uma esfera de ímã natural para as suas experiências que representava a terra e a chamava de terrella que era um modelo experimental em escala da terra. Através de suas experiências ele conclui que a terra é um grande ímã. Essa descoberta era surpreendente por vários pontos de vista, e era um gigantesco passo no conhecimento da terra, com essas observações consegue o conhecimento de que seria a terra redonda. Com suas observações ele descreveu as propriedades do espaço ao redor de sua esfera ímã, o que hoje é conhecido como campo magnético ele chamou de orbis virtutis. (NOVAK, 2003).

William Gilbert com suas observações e métodos práticos deu nova visão à ciência, e muitos pensadores, astrônomos, matemáticos, cientistas, filósofos foram influenciados por suas idéias e métodos revolucionários, ele é considerado o fundador do método experimental e o introdutor da teoria de Copérnico. Após as experiências de Gilbert, o conhecimento sobre o magnetismo avança pouco nos próximos 200 anos. (MARTINS, 2004).

Somente no começo do século XIX com o impulso nos estudos do eletromagnetismo, e através de processos paralelos, é que se obtêm novas compreensões dos fenômenos magnéticos. Foram Biot Savart, Arago, Weber e

Ampère que introduziu a noção de campo magnético e sugeriu que o magnetismo seria devido a correntes microscópicas. (NOVAK, 2003).

No final do século XIX Faraday, o primeiro a utilizar o termo campo magnético, fez várias contribuições e a mais importante foi à lei da indução, indo mais longe, afirmando que se poderia produzir energia invertendo o sentido do fluxo magnético dentro de bobinas e caracterizou vários materiais com seus comportamentos magnéticos. Os conceitos de modelos de carga e dipolo magnéticos só foram introduzidos no início do século XX. Oersted e Ampère definiram e conseguiram um meio para produção dos fenômenos elétricos e magnéticos. Os estudos desses fenômenos levaram dois brilhantes cientistas a quantificar os fenômenos magnéticos, descrevendo-os matematicamente, Maxwell foi quem descreveu os fenômenos magnéticos na forma de equações, as quais fizeram uma revolução no eletromagnetismo. Com essas experiências construíram um dínamo dando um grande impacto na sociedade. Com a invenção do dínamo começaram a construção de grandes termoelétricas iniciando a distribuição de energia elétrica às indústrias, aos lares das pessoas, nas ruas iniciou-se a troca dos lampiões por lâmpadas elétricas. As cidades foram retiradas das trevas. O eletromagnetismo se tornou uma área muito importante da física, mostrando que os fenômenos magnéticos e elétricos não devem ser vistos separadamente.

Já no início do século XX, precisamente nos anos 30, identificaram o spin eletrônico da matéria, novos conhecimentos do magnetismo se tornaram claro para a ciência. Com o surgimento da mecânica quântica, abriram-se novos horizontes para a compreensão e utilização de técnicas e estudos, possibilitando o possível entendimento moderno sobre o magnetismo. (NOVAK, 2003).

## 4.2 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os vários tipos de materiais existentes na natureza, sejam eles magnéticos ou não magnéticos, reagem de forma diferente a um campo magnético externo. Nos materiais as fontes de fluxo magnético são três: movimento orbital, spins dos elétrons e spins nucleares. (MARTINI, 2008). A rotação dos elétrons em torno do átomo causa um momento magnético dipolar intrínseco.

Os efeitos causados pelo movimento orbital dos elétrons em torno do núcleo e do spin dos elétrons são as principais causas da classificação dos materiais em

cinco principais e distintos grupos. Esses materiais podem ser classificados em: paramagnéticos, diamagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos. (HALLIDAY, 2009).

#### 4.2.1 Materiais Paramagnéticos

Nos materiais paramagnéticos os átomos têm momentos magnéticos permanentes interagindo entre si fracamente, resultando em uma susceptibilidade magnética positiva muito pequena e dependente da temperatura. Esse comportamento explica-se em consequência de dois efeitos opostos: os momentos magnéticos que tendem a se orientar no sentido do campo, e a agitação térmica que tende a quebrar essa orientação.

Nesses materiais, os momentos magnéticos dos átomos são diferentes de zero. Na presença de um campo magnético externo, os spins desses materiais tendem a se alinhar fracamente com o campo. Quando não existe um campo magnético externo, os momentos magnéticos estão aleatoriamente orientados como se apresenta na figura 1. (TIPLER, 2006).

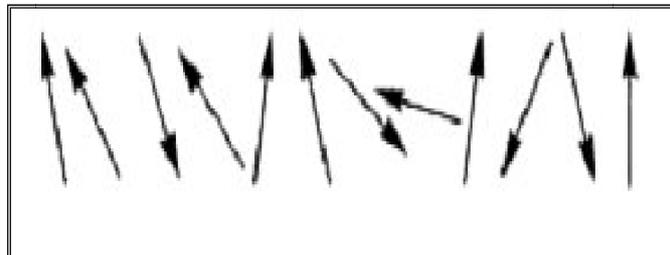


Figura 1: Representação esquemática dos arranjos dos spins em um material paramagnético

Fonte: Propriedades Magnéticas e elétricas da Ferrita de  $\text{MgGa}_{(2-x)}\text{Fe}_x\text{O}_4$  (RIBEIRO, 2005).

A susceptibilidade magnética em materiais paramagnéticos obedece à Lei de Curie:

$$\chi = \frac{C}{T}$$

C → Constante Curie

T → Temperatura

$\chi$  → Susceptibilidade magnética

A magnetização de um paramagnético é diretamente proporcional ao campo magnético externo e inversamente proporcional a T (temperatura em Kelvin). A agitação térmica é uma barreira para o alinhamento dos spins. A agitação térmica gera uma oscilação nos átomos, isto os leva a colidirem com outros átomos nas suas proximidades, através destas colisões há uma transferência de energia cinética a qual rompe o alinhamento dos átomos já alinhados. O termo material paramagnético é dado aos materiais que apresentam apenas propriedades diamagnéticas e paramagnéticas. (HALLIDAY, 2009). O paramagnetismo é observado nos metais de transição, terras raras e actínídeos.

#### 4.2.2 Materiais Diamagnéticos

Mos materiais diamagnéticos o momento angular total é nulo ( $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S} = \mathbf{0}$ ). Os átomos desse tipo de material somente apresentam momento angular diferente de zero quando expostos a um campo magnético externo. Quando isso acontece, aparecem *momentos de dipolo magnéticos induzidos*, os quais produzem um campo magnético que é sempre oposto ao campo magnético externo aplicado (figura 2). Materiais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e de pequenos valores, da ordem de  $10^{-5}$  para sólidos e  $10^{-8}$  para gases. (NETO. 2003).

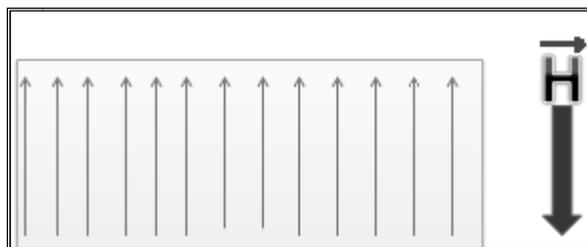


Figura 2: Representação esquemática do campo magnético induzido (representado pelas setas mais finas) pela presença de um campo magnético externo  $\mathbf{H}$ , em um material diamagnético

O fato de o momento magnético induzido ser oposto do sentido do campo indutor é visto como consequência da lei de Lenz atuando em uma escala atômica. O diamagnetismo é a manifestação da lei de indução de Faraday atuando sobre os elétrons dos átomos. Em uma visão clássica do movimento, se equivale a uma espira de corrente. A lei de Faraday e Lenz, diz que enquanto o módulo do campo magnético está aumentando do zero a um valor máximo, um campo elétrico é induzido nas órbitas eletrônicas. Com o aumento do campo magnético externo, a velocidade dos elétrons também aumenta. Com a diminuição da corrente orientada para cima criada pela corrente convencional e o momento magnético, onde a aplicação do campo magnético há a criação de um momento dipolar magnético com a orientação para baixo. Removendo o campo magnético tanto o momento dipolar como as forças, desaparecem. (HALLIDAY, 2009).

#### 4.2.3 Materiais Ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos possuem *magnetização espontânea*, abaixo da temperatura de Curie ( $T_c$ ). A magnetização espontânea surge devido ao fato de os spins dos elétrons interagirem entre si fortemente, onde tal interação força os spins a se alinharem paralelamente, mesmo na ausência de um campo magnético externo (figura 3).

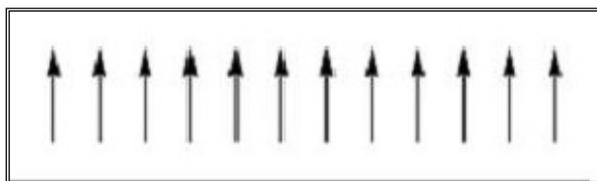


Figura 3: Representação esquemática dos spins em um material ferromagnético

Fonte: Propriedades Magnéticas e elétricas da Ferrita de  $MgGa_{(2-x)}Fe_xO_4$  (RIBEIRO, 2005).

Os spins dos elétrons de um átomo interagem com os átomos vizinhos, apesar da agitação provocada pelo aumento da temperatura ainda há um alinhamento dos momentos dipolares magnéticos dos átomos, a persistência do alinhamento é o responsável pela magnetização permanente dos ferromagnéticos.

Quando a temperatura ultrapassa o ponto de Curie (ponto crítico de temperatura de uma substância) a agitação térmica prevalece sobre o acoplamento. Com o aumento da temperatura em um sólido, aumentam-se as

vibrações nos átomos. Na temperatura de Curie as forças de pareamento do spin são completamente destruídas, e quando isso acontece o material torna-se paramagnético. A temperatura Curie do ferro é de 1043 K ou 770°C.

Os domínios magnéticos são as menores unidades dos materiais caracterizados por uma única orientação magnética, onde os dipolos atômicos são perfeitos, e os domínios não estão alinhados no mesmo sentido como indica na figura 4. (HALLIDAY, 2009). Os átomos deste domínio se comportam como pequenos ímãs. Os materiais magnéticos possuem orientação ao acaso, no qual os momentos magnéticos se anulam. Os domínios magnéticos estão separados por limites chamados de paredes de Bloch.

O balanço de energia dentro do material determina a quantidade de domínios. A aplicação de um campo magnético externo sobre o material, estando os domínios desalinhados, começa a se orientar no sentido do campo, alinhando-os como indicado na figura 5(a) e (b).

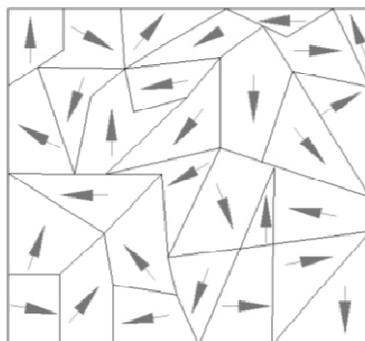


Figura 4: Representação esquemática dos domínios magnéticos

Fonte: Estudo analítico/ experimental de um protótipo de rotor magneto. (ALÉCIO, 2011).

A obtenção de novos alinhamentos através do aumento do campo externo torna se cada vez mais difícil e começa-se um procedimento de saturação magnética figura 5(c). Isso ocorre quando os domínios magnéticos estão todos imantados espontaneamente em uma única direção.

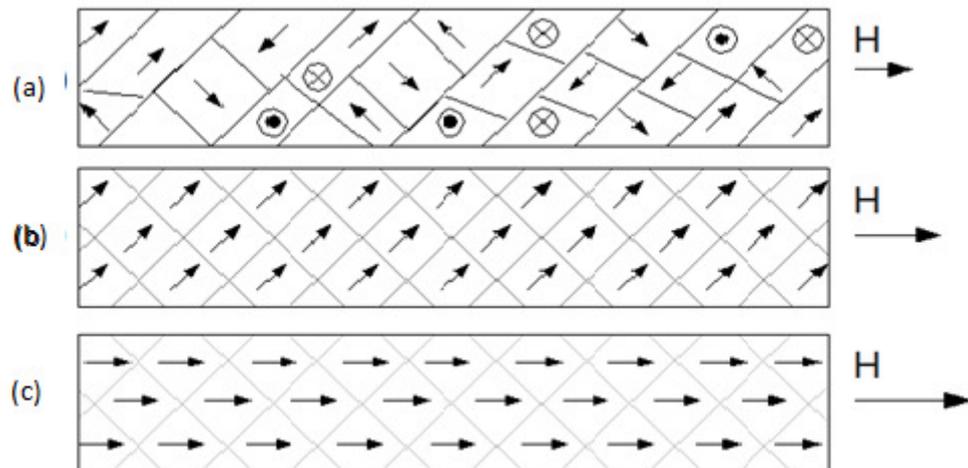


Figura 5: Representação esquemática do efeito do campo magnético sobre materiais ferromagnéticos compostos de domínios magnéticos. Em (a) com aplicação de um campo magnético externo fraco, (b) campo externo forte onde os domínios estão se alinhando com o campo, (c) saturação total dos domínios

Fonte: Construção de um susceptômetro AC e a susceptibilidade magnético de micro fios amorfos recobertos por vidro. (GOMES, 2010).

Com a exposição do material ao campo externo podemos identificar dois tipos de materiais magnéticos: materiais magnéticos duros, que são aqueles que ao retirar o campo externo os domínios continuam ainda alinhados. E os materiais magnéticos moles, que acabando a influência externa terminam a orientação interna dos domínios. Com a introdução de energia no objeto ele sofreu uma reestruturação nos seus átomos. Aplicando uma quantidade de energia reversa consegue que o campo magnético se torne nulo. (HALLIDAY, 2009).

A aplicação de um campo magnético externo provoca uma curva de magnetização nos materiais ferromagnéticos, descrevendo um ciclo que vai desde a magnetização nula, a saturação, voltando em sentido inverso até a magnetização de saturação como descrito na figura 6. Esse efeito é observado nas substâncias ferromagnéticas e há manifestação do magnetismo permanente e são demonstrados através de curvas descritas através do gráfico.

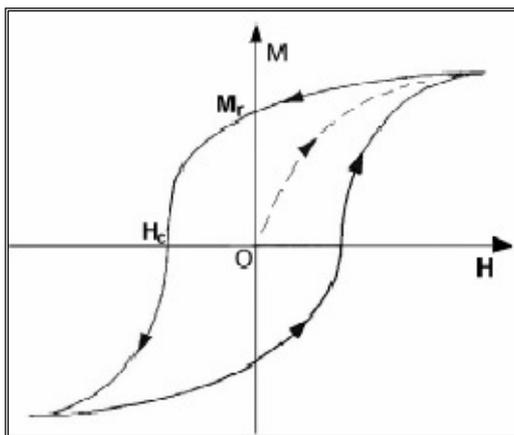


Figura 6: Representação esquemática de um ciclo de histerese

Fonte: Propriedades magnéticas de sistemas unidimensionais. (NETO, 2003).

Ao aplicar em um material magnético um campo magnético externo para medir sua magnetização. No campo inicial a magnetização é nula (0), mas vai aumentando gradualmente até a saturação, depois se reduz até o valor nulo novamente. Após a magnetização não é a mesma da inicial, ( $M_r$ ) magnetização remanente. O sentido do campo é invertido, aumentando mais uma vez o campo. O campo coercivo ( $H_c$ ) é necessário para que a magnetização reversa chega ao valor nulo, o campo continua sendo aumentado até chegar a saturação no sentido inverso. O campo é reduzido e invertido até fechar o ciclo. (KNOBEL, 2005).

A histerese tem sua compreensão a partir do conceito de domínios magnéticos. A reversibilidade dos fenômenos causados pela magnetização da substância fica quase que impraticável, pois ao retirar a energia externa ainda permanece resíduo de energia que mantém a orientação dos átomos dentro dos domínios magnéticos, não permitindo a desorganização em seu interior. Comprovando que a magnetização não se repete no aumento e queda de um campo magnético externo a um material, pois mantém uma memória do alinhamento que possuía antes da exposição ao campo magnético externo.

A memória dos alinhamentos nos domínios dos ferromagnéticos acontece naturalmente e são utilizados na preservação de informações em aparelhos magnéticos. (HALLIDAY, 2009).

O momento dipolar magnético do elétron e de outras partículas elementares podem ser expressos pelo *magnéton de Bohr*  $\mu_B$ :

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T.}$$

$\mu_B$  = Magnéton de Bohr

e = Carga elementar ( $1,6 \times 10^{-19}$  C)

h = Constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J. s)

m = massa do elétron ( $9,11 \times 10^{-31}$  kg)

#### 4.2.4 Materiais Antiferromagnéticos

Em materiais antiferromagnéticos a ordenação dos dipolos é por pares apontando em direções contrárias como na figura 6. Os dipolos adjacentes se alinham antiparalelamente em baixas temperaturas, e em altas temperaturas, mais especificamente acima de sua temperatura crítica, esses materiais se tornam paramagnéticos.

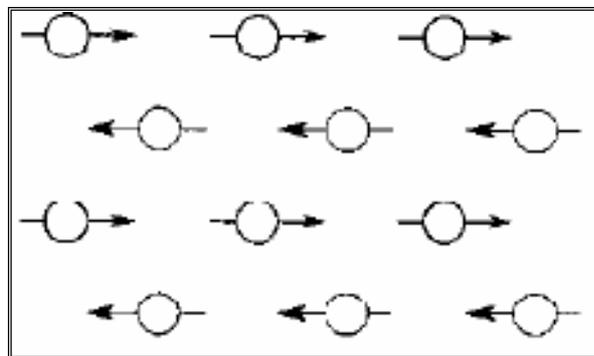


Figura 7: Representação esquemática do arranjo dos spins em um material antiferromagnético

Fonte: Propriedades magnéticas de sistemas unidimensionais. (NETO, 2003)

Os momentos magnéticos opostos se cancelam uns com os outros, e, como consequência, o sólido como um todo não possui magnetização espontânea. (RIBEIRO, 2005). O interesse da indústria pelos antiferromagnéticos é muito restrito. (NETO, 2003).

### 4.2.5 Materiais Ferrimagnéticos

Os materiais ferrimagnéticos possuem magnetização permanente. Os ferromagnetos e os ferrimagnetos são semelhantes, a diferença está na fonte dos momentos magnéticos

Esse fenômeno aparece em alguns materiais cerâmicos onde seus íons possuem diferentes momentos magnéticos entre suas redes, havendo um momento magnético resultante. O momento ferrimagnético tem sua origem no cancelamento incompleto dos momentos spins, como na figura 7. (RIBEIRO, 2005). Esses materiais, também conhecidos como ferritas, têm baixa condutividade elétrica. Na indústria são usadas na eletrônica. São substâncias que possuem um ordenamento magnético correspondente a duas sub-redes antiparalelas, e seu momento magnético total é diferente de zero.

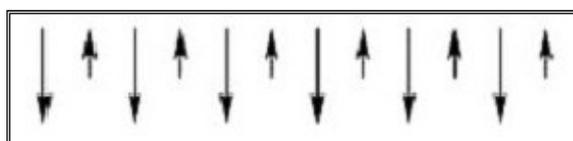


Figura 8: Representação esquemática do arranjo dos spins em um material ferrimagnético

Fonte: Propriedades Magnéticas e elétricas da Ferrita de  $\text{MgGa}_{(2-x)}\text{Fe}_x\text{O}_4$  (RIBEIRO, 2005).

Como no antiferromagnetismo, a susceptibilidade das regiões paramagnéticas nas sub-redes tem uma constante de Curie diferente. (COELHO, 2007).

## 4.3 FILMES FINOS MAGNÉTICOS

### 4.3.1 Filmes Finos de Multicamadas Magnéticas

Os filmes finos de multicamadas magnéticas tiveram sua primeira aparição na história em 1884, seu idealizador foi o alemão August Kundt que também determinou a velocidade do som em um tubo com serragem, e mediu a polarização da luz transmitida pelos filmes. As multicamadas são compostas de diferentes materiais intercalados, um sobre outro, em um material utilizado como suporte onde se faz a deposição, que é chamado de substrato.

Esses filmes têm sua valorização pela diferença de comportamento em relação aos outros sistemas, onde o volume de armazenamento em relação aos mesmos materiais lhe confere a vantagem de ter menores dimensões e com grande desempenho e funcionalidade superior aos outros.

Os filmes constituídos de ferro possuem uma forte energia anisotrópica. Podendo a energia dipolar ser superada pela anisotropia das películas muito finas, surgindo à reorganização dos spins paralelamente a superfície do filme. Os filmes finos podem ser classificados por sua espessura: filme ultrafino menor que 5µm; filme fino maior que 5µm, filme de 1 a 100 µm, e folha 0,1 a 1µm e lâmina menor que 1 mm. Tendo sua maior utilização na eletrônica. (BUENO, 2007).

#### **4.3.2 Deposições por Sputtering**

Sputtering é a técnica mais utilizada na confecção de filmes finos, desenvolvida há 150 anos. Era chamada de desintegração catódica, tendo como seu idealizador Sr Willian Robert Grove.

Sua qualidade está na boa aderência do filme ao substrato, podendo ser reproduzido com muita facilidade e pode ser utilizada com diferentes tipos de metais, permitindo o uso prolongado em temperaturas altas. (OLIVEIRA, 2006).

Com o uso das câmeras de alto vácuo (como representado na figura 8) se atinge pressões muito baixas em torno de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$  Torr, permitindo a deposição de camadas de átomos ou moléculas. A matéria que será utilizada para a formação do filme é evaporada através de um processo térmico que pode ser plasma, laser, ou bombardeio de elétrons ou íons acelerados. O material através dessas fontes de calor é transformado em vapor que será transportado para o substrato, onde ocorrerá uma reação química e dessa reação surgirá o filme.

As características técnicas de MBE (Epitaxia de Feixe Molecular) dependem da qualidade do vácuo obtido, para que possa evaporar sobre um substrato diferente. Esta técnica está sob a influência de vários fatores. A pressão interna da câmara (vácuo); controle das taxas de deposição dos diferentes materiais temperatura do substrato no procedimento; pré-disposição limpeza da superfície através de tratamento térmico, sendo de silício poderá ser aquecida a 1200 °C.

A técnica MBE, de baixa pressão (vácuo), e baixos percentuais de deposição, impõem a fixação uma condição de desequilíbrio termodinâmico, sendo a cinética na superfície do substrato que domina os fenômenos. O processo de fixação se divide em três: zona de evaporação; zona de mistura; zona da superfície do substrato.

A zona de geração, onde há evaporação dos materiais para em seguida ser direcionado ao substrato.

A segunda é a zona de mistura que está localizada entre as fontes e o substrato, onde as substâncias se mesclam antes de alcançarem o substrato.

E a Terceira é a zona ou superfície do substrato onde os processos físico-químicos ocorrem, chamada por zona de cristalização. (FIORENTINI, 2008).

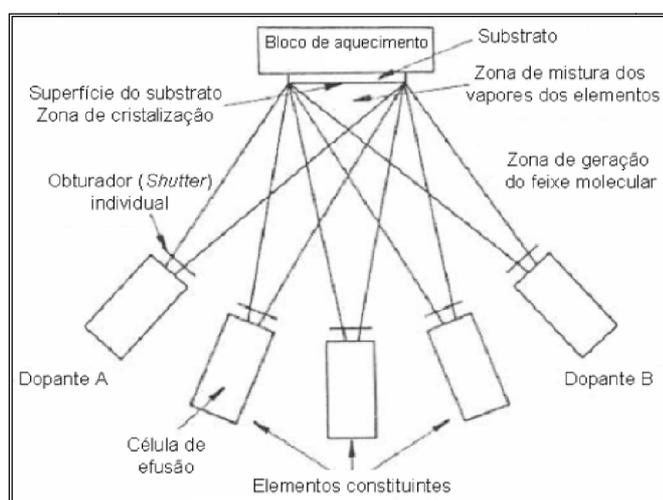


Figura 9: Diagrama esquemático de epitaxia de feixe molecular

Fonte: Construção de um sistema de epitaxia por feixe molecular. (FIORENTINI, 2008).

O diagrama acima mostra o esquema de um sistema básico de MBE e ilustração das zonas nas quais ocorrem os processos de deposição epitaxial. Uma das técnicas mais avançadas é a de Epitaxia de Feixe Molecular (MBE), onde as substâncias são aquecidas em uma câmara de alto vácuo, individualmente, existindo uma cavidade em uma ponta, com a fusão das substâncias forma-se um vapor a alta pressão dentro do crisol passa-se esse vapor pela cavidade no vácuo formando uma nuvem de átomos e moléculas que se depositam no substrato. Conseguindo assim a formação de cristais, alternando os materiais instantaneamente, podem-se formar várias camadas, alternando em camadas, magnéticas e não magnéticas metálicas ou isolantes, e tem sua utilização em aparelhos de gravação. (BUENO, 2007).

### 4.3.3 Filmes Finos de Silício

Filmes finos de silício podem ser classificados em três categorias devido ao seu desenvolvimento e produção que são elas: deposição de camadas em temperaturas baixa; deposição de camadas em substratos resistentes a altas temperaturas transferência para vidro de camada de silício mono cristalino.

A absorção da luz pelo silício, em comparação aos outros semicondutores, é muito baixa. As células de silício tinham divisões entre suas camadas muito espessas, impedindo uma boa absorção de luz, devido ao alto índice de refração.

As células de filmes finos de silício são classificadas pelo tamanho de seus cristais: sem cristais; silício amorfo (n-Si), que tem seu diâmetro abaixo de  $0,1\mu\text{m}$ , silício nano cristalino (n-Si); os cristais estão entre  $0,1$  e  $50\mu\text{m}$ , silício poli cristalino (pc-Si); onde seus cristais estão na faixa de  $100$  a  $1000\mu\text{m}$ , silício multi cristalino (mc-Si); e cristal único, silício cristalino (c-Si). (TOLEDO, et. al., 2006).

A taxa de deposição no substrato tem que ser monitorada a qualquer tempo, para que não ocorram deformações no filme que esta sendo construído em cima do substrato.

### 4.3.4 Aplicações Tecnológicas dos Filmes Finos

Os filmes finos tiveram sua primeira aplicação e maior desenvolvimento na gravação magnética de áudio e vídeo. Valdemar Pulsem, engenheiro Dinamarquês, em 1898 patenteou o método de gravação magnética. Pulsem utilizou um fio de aço sendo magnetizado por um sinal elétrico emitido por um microfone. Seu aparelho gravava sinais de voz no fio de aço magnetizável, porém a reprodução do sinal deixava muito a desejar.

Em 1940 com o aperfeiçoamento da técnica as fitas magnéticas conseguiram destacar-se comercialmente, através dos aparelhos de gravação de áudio. A informática foi que mais avançaram nas pesquisas e na utilização dos filmes magnéticos desde 1979 os filmes magnéticos, vêm sendo utilizados na fabricação dos discos rígidos HDs (Hard Disc.) dos computadores. Em 1956 surgiu o primeiro computador que usava o sistema de gravação permanente. A gravação era feita em 50 discos com diâmetro de  $60\text{ cm}$  com capacidade de armazenamento de  $5\text{ MB}$ .

Filmes finos magnéticos em relação a seu tamanho deixam margem para aplicação no armazenamento de dados. A necessidade de se aumentar a

capacidade da memória dos instrumentos eletrônicos, leva à pesquisa, onde se busca o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novas técnicas de produção, buscando a melhoria dos meios de gravações e aumentando a velocidade, de acesso em disco magnético.

#### 4.4 MAGNETO RESISTÊNCIA GIGANTE

##### 4.4.1 Magneto Resistência Gigante e Spintrônica

Magneto resistência gigante é o fenômeno que altera a resistência sobre a ação de um campo magnético. Em 1988, Peter Grunberg na Alemanha e Albert Fert na França, constataram a variação do magneto resistência  $\Delta R/R$  (Variação da Resistência / Resistência) em temperatura ambiente. Conseguindo um magneto resistência de 1,5% e 10% que até o momento era uma coisa inédita, isso foi conseguido em uma tri-camada de (Ferro/Cromo/Ferro). E usando uma multicamada de  $(Fe/Cr)_n$ , com uma quantidade de 60 camadas obtiveram um magneto resistência na ordem de 50% em temperatura de 4,2 K. Na equipe de cientistas estava um brasileiro, Mario Baibich, o fenômeno foi batizado de Magneto Resistência Gigante. Essa descoberta proporcionou uma evolução nos sistemas de leitura de discos rígidos. (LANDI, 2009).

O magneto resistência gigante (GMR), é a base de todas as tecnologias chamadas de spintrônica é responsáveis pelos processos de leituras magnéticas dos equipamentos computacionais existente atualmente. O acoplamento antiferromagnético tem relação direta com o sistema GMR de multicamadas magnéticas, onde utiliza um isolante entre as camadas magnéticas como indicado na figura 9.

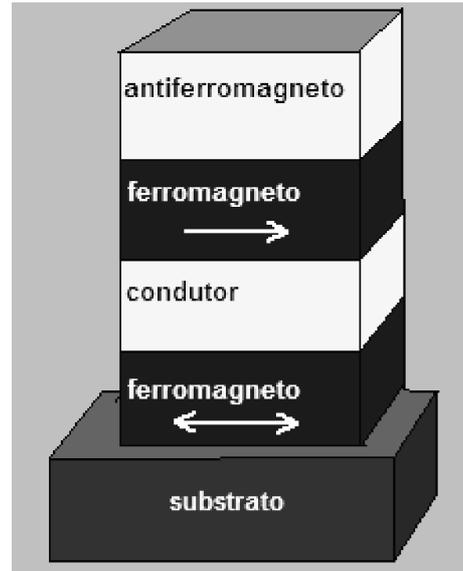


Figura 10: Representação esquemática de uma válvula de spin

Fonte: Propriedade de spintrônica do gás de elétrons e dinâmica de íon Mn e nano estruturas semicondutoras magnéticas. (SOUTO, 2006).

A mudança de orientação da magnetização relativa altera a configuração antiparalela em paralela através da aplicação de um campo magnético tem-se uma queda na resistência. O acoplamento antiferromagnético não é fundamental para o surgimento do magneto resistência gigante. O momento magnético das entidades magnéticas formadoras do sistema é fundamental para que se possa ser alterado através de um campo magnético externo. O magneto resistência gigante tem sua origem no espalhamento de spins dos elétrons de condução localizado no interior dos materiais magnéticos. O magneto resistência gigante mais utilizada em uma associação de sistema magnético e circuito elétrico equivalente, onde os elétrons com configuração up e down, figura 10 em um material ferromagnético não se misturam. Não existindo espalhamento que faça a transição spin up e spin down.

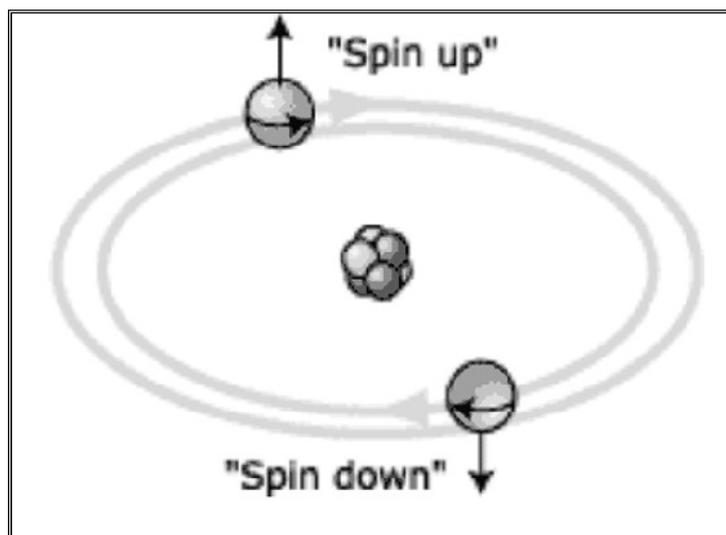


Figura 11: Representação esquemática da orientação dos spins up e spin down em órbita de um átomo

Fonte: Spintrônica- Parte I: Uma Introdução. (MARTINI et. al, 2008).

Spin é uma forma de momento angular intrínseco de todas as partículas. A condutividade nos ferromagnéticos aparece somente em vias independentes uma para spin up e outra spin down, no plano e na perpendicular de uma multicamada. Sua resistência elétrica é atravessada por correntes de elétrons de spin up e spin down.

#### 4.5 MAGNETISMO E SUAS APLICAÇÕES

Desde as primeiras observações do magnetismo, há mais de 2000 anos, a utilização das forças magnéticas está inserida no cotidiano das pessoas. As ferramentas que foram produzidas através dos fenômenos magnéticos vêm tornando-se indispensáveis. O magnetismo moderno tem seu emprego nos objetos mais simples aos mais sofisticados, variando do tamanho atômico a equipamentos gigantescos.

Nos lares, há um grande número de equipamentos que torna o trabalho diário mais fácil, entre eles a escova elétrica, barbeador, liquidificador, forno de micro ondas, forno elétrico, aspiradores de pó, etc. Ao entrar em um veículo começamos a utilizar um número grande de aparelhos magnéticos, que em um carro moderno ultrapassa a mais de trinta, os quais utilizam as forças magnéticas para seu

funcionamento. (KNOBEL, 2005). Ao fazer uma transação financeira precisa-se de um cartão magnético para efetuar a movimentação, pagar contas no débito ou a crédito, sacar dinheiro, fazer transferências eletrônicas, essas são as comodidades que o uso das leis do magnetismo permite.

Os trens bala de transporte de pessoas da Europa, e no Japão flutuam acima dos trilhos. Potentes ímãs os mantêm levitando, permitindo que as viagens de longas distâncias tornem rápidas, pelas altas velocidades desenvolvidas por eles.

Na medicina com o aparecimento de diversas doenças são necessários equipamentos que consigam identificar lesões e tumores, com dimensões muito pequenas, para isso foram desenvolvidos os equipamentos de tomografia computadorizada, ressonância magnética e muitos outros que facilitam o diagnóstico médico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução do magnetismo na história da humanidade vem alterando o conhecimento e a visão da sociedade sob vários aspectos dos fenômenos naturais. Desde sua primeira observação, há mais de 2800 anos, em cada época e lugar, o magnetismo contribuiu com a evolução de uma ciência que a cada dia faz novas descobertas.

Atualmente, com a produção de filmes finos magnéticos e o consequente desenvolvimento da spintrônica, bem como com a descoberta da magnetorresistência gigante, o armazenamento e leitura de dados digitais alcançou um patamar nunca antes visto, onde grandes quantidades de dados são gravados em espaços cada vez menores. A spintrônica ainda está abrindo as portas para a construção de novos equipamentos e tecnologias promissoras, como o computador quântico, onde a capacidade de processamento de dados aumentará exponencialmente.

## REFERÊNCIAS

ALONSO, Marcelo. **Física um curso universitário**. São Paulo: Bluncher, 1972.

ALÉCIO, Roberto. **Estudo analítico/ experimental de um protótipo de rotor magneto**. 2011. 92. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica). Universidade Federal do Pernambuco. Recife, PE, 2011. Disponível em: < [http://www.ufpe.br/mecfluamb/resources/dissertacao\\_Roberto.pdf](http://www.ufpe.br/mecfluamb/resources/dissertacao_Roberto.pdf)> Acesso em 29 junho 2011

BUENO, Maria. **Filmes finos magnéticos: Interações Competitivas em sistemas Magnéticos Bidimensionais**. 2007. 58. Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. MT. Fevereiro de 2007. Disponível em: <[http://fisica.ufmt.br/mestrado/index.dhp?option=com\\_docman&task=doc\\_details&gid=30&tmpl=component&Itemid=235](http://fisica.ufmt.br/mestrado/index.dhp?option=com_docman&task=doc_details&gid=30&tmpl=component&Itemid=235)> Acesso em: 22 abril 2011.

BASSALO, José. **Propriedades Magnéticas Clássicas da Matéria: Para, Dia e Ferromagnetismo**. Disponível em < <http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore261.htm>> Acesso em 10 maio 2011.

COELHO, João. **Modelo de ising de spins mistos com interação aleatória de campo cristalino**. 2007.63. Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, MT, Agosto de 2007. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/52616552/Dissertacao-walter>> Acesso em: 22 abril 2011

SOUZA SÁ, Darcio. **Preparação e medidas magnéticas do sistema magnético frustrado  $\text{Fe}_x\text{Ni}_{1-x}\text{TiO}_3$** , 2008. 67. Dissertação (Mestrado em física). Universidade Federal de Sergipe. São Cristovão, SE, 2008. Disponível em <http://www.fisica.ufs.br/npgfi/documentos/dissertacoes/darcio.pdf> > Acesso em: 12 julho 2011.

FERREIRA, Norberto. Magnetismo e Eletricidade. **Ciência hoje das crianças**. v.12. 2010. São Paulo, SP. Disponível em < <http://chc.cienciahoje.uol.com.br/noticias/fisica-e-quimica/magnetismo-e-eletricidade/> > Acesso em: 23 abril 2011.

FIORENTINI, Giovanni. **Construção de um sistema de epitaxia por feixe molecular**. 2008.79. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, setembro de 2008. Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000443031&fd=y>> Acesso em: 18 abril 2011

GOMES, Rafael. **Construção de um susceptômetro AC e a susceptibilidade magnética de micro fios amorfos recobertos por vidro**. 2010. 77. Dissertação (mestrado em física). Santa Maria, RS, 2010. Disponível em <<http://www.ufsm.br/pgfisica/alunos/dissertacabreira.pdf>> Acesso em: 12 julho 2011.

HALLIDAY, David. **Fundamentos de física volume 3: eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HINRICHS, Roger A. **Energia e meio ambiente**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

KNOBEL, Marcelo. Aplicações do magnetismo, **ciência hoje**, v. 36 • nº 215 maio, 2005. Campinas, SP. Disponível em <[http://www.google.com.br/#hl=pt-BR&q=marcelo+knobel+ciencia+hoje+18%2C+2005&oq=marcelo+knobel+ciencia+hoje+18%2C+2005&aq=f&aqi=&aql=undefined&gs\\_sm=e&gs\\_upl=43751159381012812813124127101547154715111&bav=on.2,or.r\\_gc.r\\_pw.&fp=60adb8eb161bacca&biw=1023&bih=604](http://www.google.com.br/#hl=pt-BR&q=marcelo+knobel+ciencia+hoje+18%2C+2005&oq=marcelo+knobel+ciencia+hoje+18%2C+2005&aq=f&aqi=&aql=undefined&gs_sm=e&gs_upl=43751159381012812813124127101547154715111&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.&fp=60adb8eb161bacca&biw=1023&bih=604)> Acesso em 20 junho 2011

LANDI, Salmon. **Ressonância ferromagnética em super-redes NiFe/Ru**. 2009, 65, Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2009. Disponível em <[http://bdtd.ufg.br/tesesimplificado/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=548](http://bdtd.ufg.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=548)> Acesso em 20 abril 2011.

MARTINS, Luciano. **Os 400 anos do De Magnete**. A. P. Guimarães Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Joinville-SC: 2004. Disponível em <<http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/index.php?idSecao=9&idSubSecao=&idTexto=242>> Acessado em: 20 abril 2011

MARTINI, Sandro. Júlio Cesar Lucchi, Ângelo Eduardo Battistini Marques, Lara kull Telles. Spintrônica- Parte I: Uma Introdução. **Integração**. n.53. p 171-174. Abr. mai. Jun.2008. São Paulo, SP, 2008. Disponível em [ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/171\\_53.pdf](ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/171_53.pdf) Acesso em: 30 Maio 2011

**Materiais magnéticos**, disponível em <<http://saulojm.brinkster.net/materialmag.aspx>> Acesso em: 15 maio 2011.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física básica eletromagnetismo: vol.3**. São Paulo: Edgard Luncher, 1997.

NOVAK, A. Miguel. **Introdução ao magnetismo**. 2003. Disponível em <<http://www.cbpf.br/~labmag/miguel.pdf>> Acesso em: 22 abril 2011

NETO, Samuel. **Propriedades magnéticas de sistemas unidimensionais**. 2003. Dissertação (mestrado em Física). 2003.87. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão SE. Fevereiro de 2003. Disponível em <<http://www.fisica.ufs.br/npgfi/documentos/dissertacoes/Samuel.pdf>> Acesso em: 29 junho 2011

OLIVEIRA, João. **Filmes finos de óxidos de vanádio depositados por “sputtering” reativo**. 2006.76. Dissertação (mestrado em Física). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS 2006. Disponível em <<http://www.ufsm.br/pgfisica/alunos/filmesfinosoxidosvanadio.pdf>> Acesso em: 20 abril 2011.

PESSOA JÚNIOR, Osvaldo. Modelo causal dos primórdios da ciência do magnetismo, São Paulo: **Scientiae Studia**. v.8. n: 2. p195-212, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-31662010000200003&script=sciarttext> Acesso em: 22 abril 2011.

RIBEIRO, Giuliano. As propriedades Magnéticas da Matéria: um primeiro contato. **Revista Brasileira de ensino de física**, v.22, nº3, p.299-305, setembro, 2000. São Carlos-SP. Disponível em <[http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22\\_299.pdf](http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_299.pdf)> Acesso em: 21 abril 2011.

RIBEIRO, Vander Alkmin. **Propriedades Magnéticas e elétricas da Ferrita de  $MgGa_{(2-x)}Fe_xO_4$** . 2005.123. Dissertação (Mestrado em Cerâmicas). Instituto de ciências, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG. 2005. Disponível em < <http://adm-net-a.unifei.edu.br/phl/pdf/0029392.pdf> > Acesso em: 01 julho 2011.

SANTOS, Carlos. **Ciência Hoje**. Histerese magnética: Perdas e Ganhos: São Paulo: 2009: Disponível em < <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/histerese-magnetica-perdas-e-ganhos>> Acesso em: 29 maio 2011

SOUTO, Eduardo. **Propriedades de spintronica do gás de elétrons e dinâmica de íon Mn e nano estruturas semicondutoras magnéticas**. 2006. 149. Tese (Doutorada em física). Instituto de Física, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2006. Disponível em < [http://www.fis.unb.br/teses/2007/Eduardo\\_Souto1.pdf](http://www.fis.unb.br/teses/2007/Eduardo_Souto1.pdf) > Acesso em: 07 julho 2011.

TIPLER, Paul Allan. **Física vol.2: Eletricidade e magnetismo**, ótica. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

TOLEDO, T.F; Ramanery, F.P; Cunha, M.A.; Branco, J.R.T. Efeito da distância de deposição na espessura e microestrutura de filme fino de silício obtido por evaporação por feixe de elétrons. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT)**. 17<sup>o</sup>, 2006. Foz do Iguaçu, PR. Disponível em <[http:// www .metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-306-023.pdf](http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-306-023.pdf) > Acesso em: 18 abril 2011.