Eletromagnetismo

Principais Materiais Magnéticos

Antonio Eduardo Alexandria de Barros
Pâmella Gonçalves Barreto

Antonio Eduardo Alexandria de Barros

Pâmella Gonçalves Barreto

ELETROMAGNETISMO: PRINCIPAIS MATERIAIS MAGNÉTICOS

1ª Edição

Araguaína – TO
2018

©2021 Érica Cupertino Gomes
1ª Edição - 2018
ISBN 978-65-00-35199-6

Ficha Catalográfica

Barros, Antonio Eduardo Alexandria de e Barreto, Pâmella Gonçalves
Eletromagnetismo: principais materiais magnéticos / Antonio Eduardo Alexandria de Barros e Pâmella Gonçalves Barreto – 1ª edição – Araguaína, TO: Editora Érica Cupertino Gomes, 2018.
66 p.;15 x 20 cm.
ISBN 978-65-00-35199-6
Conteúdo: Física

1. Materiais magnéticos 2. Magnetismo 3. Ensino de Física 4. Eletromagnetismo

Índices para catálogo sistemático: 530

Este material foi desenvolvido no Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) do Campus de Araguaína – TO, por Antonio Eduardo Alexandria de Barros com orientação da professora Dra Pâmela Gonçalves Barreto. Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado contemplada ao aluno Antonio durante o curso.

ANTONIO EDUARDO ALEXANDRIA DE BARROS

PÂMELLA GONÇALVES BARRETO

Eletromagnetismo

Principais Materiais Magnéticos

SUMÁRIO

Apresentação 08

Atividade 01 – Uma breve história do eletromagnetismo 09

1.1 A origem do magnetismo 09

1.2 O nascimento do eletromagnetismo 10

1.3 A indução eletromagnética 12

1.4 A lei de Lenz 13

Atividade 02 – Os mapas conceituais 15

2.1 Conhecendo os mapas conceituais 15

2.2 Construindo mapas conceituais 16

Atividade 03 – Momentos magnéticos: o magnetismo a nível fundamental 19

3.1 O spin do elétron e o magnetismo 19

3.2 Momento angular 20

3.3 Momento magnético 24

3.4 Momento magnético de spin 25

3.5 Momento Magnético Total 25

Atividade 04 – A magnetização e o campo magnético 28

4.1 A magnetização e os campos $\vec{H}$ e $\vec{B}$. 28

4.2 A suscetibilidade magnética 29

Atividade 05 – Os principais materiais magnéticos 32

5.1 Diamagnéticos 34

5.2 Paramagnéticos 42

5.3 Ferromagnéticos 45

5.3.1 Temperatura Curie 46

5.3.2 Histerese magnética 46

5.4 Antiferromagnético 50

5.4.1 Temperatura de Néel 50

5.5 Os materiais magnéticos e a tabela periódica 56

Apresentação

Este material procura disponibilizar ao professor e aos alunos várias ferramentas pedagógicas que possibilitem uma maior interação entre o ensino do eletromagnetismo, principalmente os materiais magnéticos, e a aprendizagem significativa. Entre eles podemos citar os mapas conceituais, os textos que abordam aplicações atuais desses fenômenos físicos, a interdisciplinaridade com a Química e a História das Ciências, experimentos de fácil realização, endereços eletrônicos de vídeos relacionados aos assuntos abordados, entre outros. Além de buscar esclarecer a origem atômica das propriedades magnéticas nos materiais e a não dissociação entre eletricidade e o magnetismo, conceito este ausente em vários livros didáticos. Isso reflete muitas vezes em desconhecimento por parte dos professores e, consequentemente, em um aprendizado distorcido e incompleto sobre esse assunto aos mesmos e aos seus alunos.

O material é organizado em atividades partindo do mais geral para o mais específico. À medida que os conteúdos vão sendo ministrados, eles passam a fazer parte do cognitismo do leitor servindo de ancoragem para os novos assuntos que virão posteriormente, assim, possibilitando que em um determinado grupo de leitores (porque possuem um conhecimento prévio sobre uma determinada atividade) possam iniciar seus estudos na atividade seguinte sem, prejudicar sua aprendizagem.

No início de cada atividade está uma pequena apresentação sobre os assuntos que serão abordados e no fechamento é disponibilizada a bibliografia.

Esperamos que este material contribua para um maior aprendizado do eletromagnetismo e que desperte o interesse por esse campo da física muitas vezes tachado de difícil e complexo.

ATIVIDADE 01

Uma breve história do eletromagnetismo

Esta atividade tem como objetivo apresentar alguns conceitos dentro do eletromagnetismo que servirão de conhecimentos prévios para o aprendizado sobre os materiais magnéticos. Quanto à abordagem, foi escolhida a História das Ciências com o intuito de desenvolver uma visão da constante evolução que envolve as ciências, ou seja, que uma descoberta leva a outra e assim sucessivamente e que ainda temos muito que aprender sobre tudo que nos cerca.

1.1 A origem do magnetismo

O nome magnetismo teve origem na Grécia Antiga, na região de Tessália que posteriormente chamou-se Magnésia, onde determinadas rochas eram capazes de atrair o ferro. Essas pedras foram chamadas de magnetita ou ímã natural. Atualmente a magnetita é representada quimicamente pela fórmula Fe_3O_4. Sua primeira utilização tecnológica foi através da bússola, aparelho que utilizava um ímã e sua propriedade de se alinhar com o campo magnético terrestre e sua origem é motivo de discordância entre historiadores. Grande parte deles acredita que foi utilizada primeiramente na China entre 2637 a.C. e 1100 d.C. Outros grupos alegam que a origem e utilização pertencem aos árabes e que somente depois foi introduzida na China a partir do século XIII.

O primeiro experimento, com o intuito de entender os fenômenos magnéticos, foi realizado por Pierre Pélerin de Maricourt conhecido como Petrus Peregrinus em meados do século XIII. Suas experiências envolviam uma esfera constituída de magnetita e ao colocar pedaços de ímãs em várias regiões foi traçando as linhas de campo em volta da esfera, verificando que estas incidiam em dois pontos, chamados por ele de polos do ímã, em analogia aos polos geográficos da Terra, observando que o polo norte do ímã apontava aproximadamente para o polo sul geográfico e o polo sul do ímã apontava aproximadamente para o norte geográfico.

Quanto ao estudo do magnetismo, dentre os filósofos naturais, destaca-se William Gilbert de Colchester, denominado "Pai do Magnetismo". Nascido em 1544, publicou por volta de 1600 o tratado chamado "De magnete", onde sistematizou todo o conhecimento sobre o magnetismo da época trazendo todos os resultados de suas pesquisas somados a todo conhecimento confiável sobre o assunto. Entre outros experimentos, foram reproduzidos aqueles realizados por Peregrinus com a esfera de magnetita que foi denominada de Terrella (pequena Terra) por Gilbert, pois ele a utilizou como sendo um modelo ideal e atual da Terra, o que o levou a afirmar que a Terra era um ímã, isto é, possuía seu próprio campo magnético.

William Gilbert foi o primeiro a afirmar que a Terra é um ímã, ou seja, possui um campo magnético próprio.

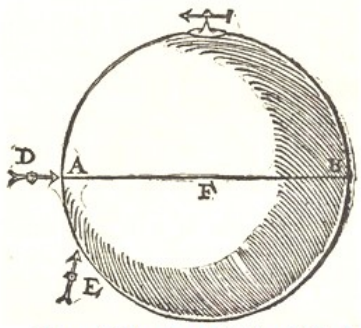


Figura 1.1 Terrela de William Gilbert
Fonte:
https://www.plasma-universe.com/Terrela

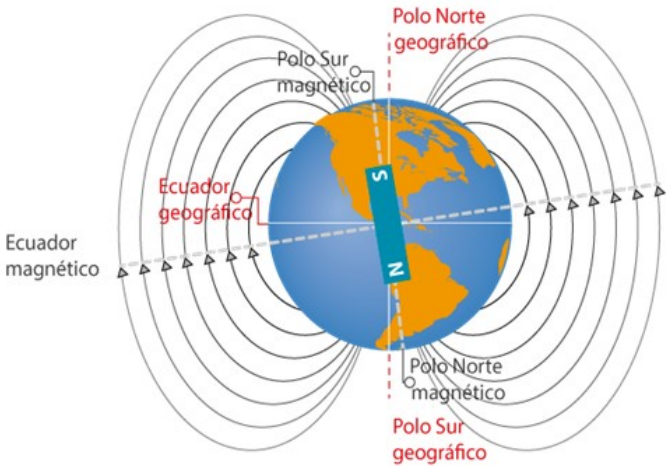


Figura 1.2: Campo magnético da Terra
Fonte:
https://web.ua.es/es/actualidad-universitaria/documentos/2016/octubre16/declinacion-cero.pdf

Observe que o polo norte geográfico e o polo sul magnético apontam para o mesmo lado, porém não coincidem, existindo um pequeno ângulo entre eles. Atualmente a teoria mais aceita no meio científico sobre esse fenômeno nos leva a uma região próxima ao centro do nosso planeta, onde temos um fluido em movimento formado principalmente por ferro fundido, esse movimento ocorre, principalmente, devido ao movimento de rotação da Terra e o atrito com as camadas sólidas. Esses deslocamentos de cargas geram correntes elétricas que por sua vez produzem um campo magnético.

1.2 O nascimento do eletromagnetismo

Desde 1807 Oersted buscava relacionar a eletricidade e o magnetismo, porém somente em 1820, em um curso de inverno sobre Eletricidade e Magnetismo na Universidade de Copenhagen, verificou a relação entre magnetismo e corrente elétrica. Seu erro inicial era colocar o fio condutor utilizado formando 90 graus sobre a agulha magnetizada, porém em abril de 1820, posterior a uma aula noturna do curso em questão, lhe ocorreu à idéia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha imantada, ao passar corrente pelo condutor, observou uma deflexão executada pela agulha, surgia ai o eletromagnetismo, pois se estabelecia a relação entre magnetismo e corrente elétrica. Posteriormente ele próprio confirmou seus resultados, através de equipamentos mais potentes, sendo anunciados publicamente em julho de 1820.

Oersted teve a idéia de colocar o fio condutor de forma paralela a direção da agulha imantada; observando uma razoável deflexão da agulha.

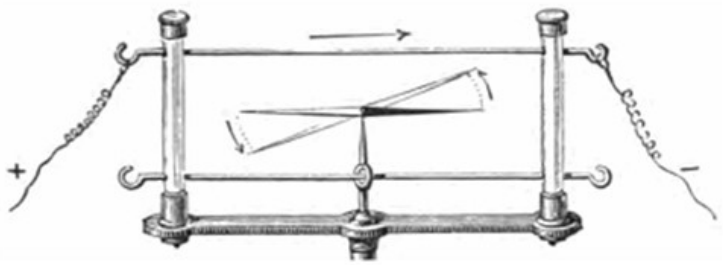


Figura 1.3: Experimento de Oersted.

Fonte: http://cienciaviva.org/tag/electromagnetismo/

No ano de 1820, o físico Andre-Marie Ampère (1775-1836), levou ao conhecimento da Academia Francesa suas conclusões sobre o efeito magnético associado à corrente elétrica. Explicou a diferença entre tensão elétrica, associada aos efeitos eletrostáticos, e corrente elétrica responsável pelos efeitos magnéticos observados por Oersted. Mostrou que em fios condutores paralelos ao serem percorridos por correntes de mesmo sentido sofrem a ação de uma força de atração e se as correntes tiverem sentidos contrários tem-se uma força de repulsão, observou ainda que se uma corrente elétrica passa por uma bobina circular esta passa a se comportar como um ímã e quando uma corrente percorre um solenóide, gera um campo magnético interno, fazendo com que este se comporte como uma barra magnetizada.

Ampère chegou a importantes resultados, como: o do comportamento de uma bobina circular de fio metálico percorrida por corrente elétrica, equivalente a um ímã comum.

A intensidade do campo indução magnética no centro de uma espira é dado por

$$B = \frac{\mu . I}{2r} \qquad (1.1)$$

Quando temos varias espiras juntas temos uma bobina circular cuja a intensidade do campo é dada por

$$B = \frac{n.\mu . I}{2r} \qquad (1.2)$$

Sendo
μ - a permissividade magnética do meio;
r – o raio da espira ou da bobina;
I – intensidade da corrente elétrica;
n – número de espiras.

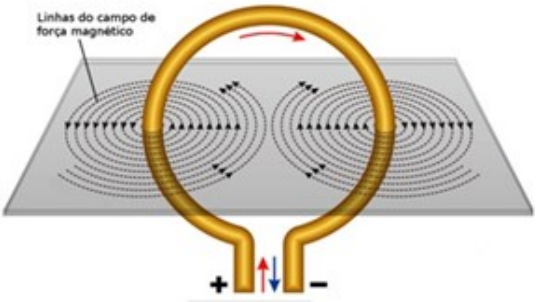


Figura 1.4: Campo magnético gerado por uma espira circular.

Fonte: Fouad A. Saad / Shutterstock.com

. . . o do comportamento de um fio enrolado na forma de espiral como se fosse uma barra imantada, ao qual deu o nome de solenóide.

A intensidade do campo indução magnética no interior do solenoide é dado por

$$B = \frac{n.\mu.I}{L} \qquad (1.3)$$

Sendo
μ - a permissividade magnética do meio;
L – o tamanho do solenoide;
I – intensidade da corrente elétrica;
n – número de espiras.

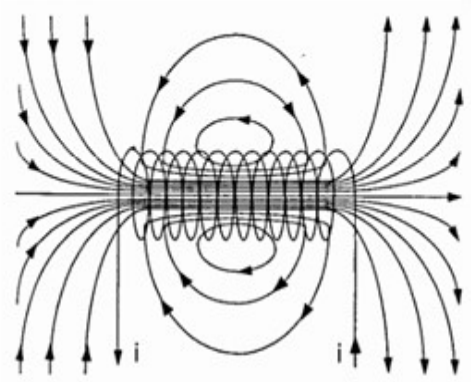


Figura 1.5 : Campo magnético gerado por um solenóide

Fonte: Nussenzveig (1997).

1.3 A indução eletromagnética

Faraday baseado nas experiências de Oersted e Ampère, que verificaram que a passagem de corrente elétrica por um condutor gerava campo magnético, buscou determinar se o inverso era válido, ou seja, se campo magnético pode gerar corrente elétrica. Em suas pesquisas, no ano de 1831, verificou que se um ímã se desloca próximo a um fio condutor surgia no fio uma corrente induzida e se tivesse uma bobina onde circulava uma corrente elétrica variável esta induzia o aparecimento de uma corrente induzida em outra bobina próxima. Esse fenômeno físico ficou conhecido por indução eletromagnética.

Idealizou a figura de um campo, que ocupava o espaço vazio, composto por linhas de forças que quando estavam próximas geravam um campo mais intenso, posteriormente em 1837, levou essa ideai a eletricidade, onde se teria um campo elétrico com suas respectivas linhas de forças.

De acordo com a lei de Faraday, se o fluxo do campo magnético que atravessa uma superfície limitada por um circuito varia com o tempo, aparece nesse circuito uma força eletromotriz (fem) induzida.

Matematicamente temos:

$$\varepsilon = \Delta\varphi / \Delta t \qquad (1.4)$$

Onde

ε - é a força eletromotriz;
$\Delta\varphi$ – variação do fluxo magnético;
Δt – variação de tempo.

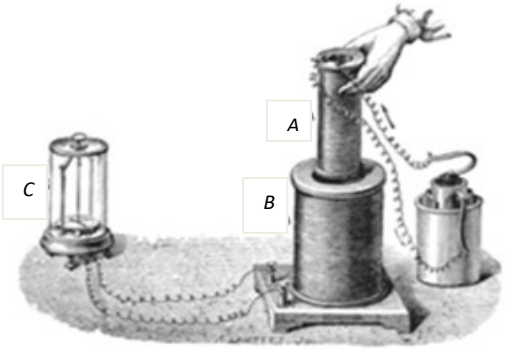


Figura 1.6 : Ilustração de um dos experimentos de Faraday com bobinas concêntricas. A bateria alimenta a bobina A e na ocorrência de uma corrente induzida na bobina B, ocorre uma pequena deflexão na agulha magnética do galvanômetro C.

Fonte: Arthur William Poyser (1892).

1.4 A Lei de Lenz

O físico germano-russo Heinrich Friedrich Emil Lenz estudou a lei de indução de Faraday e em 1833 anunciou à Academia de Ciências de São Petersburgo, seu trabalho sobre eletromagnetismo, que mostrava que a corrente elétrica induzida, em uma espira, tem sentido oposto ao sentido da variação do campo magnético que a gera, ou seja, se ocorrer uma diminuição do fluxo magnético, que atravessa a espira, a corrente induzida terá um sentido que criará um campo magnético com o mesmo sentido do fluxo, porém se ocorrer o aumento do fluxo magnético o campo terá sentido oposto ao do fluxo.

Lenz observou que a corrente induzida tem um sentido que gera um campo que se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu.

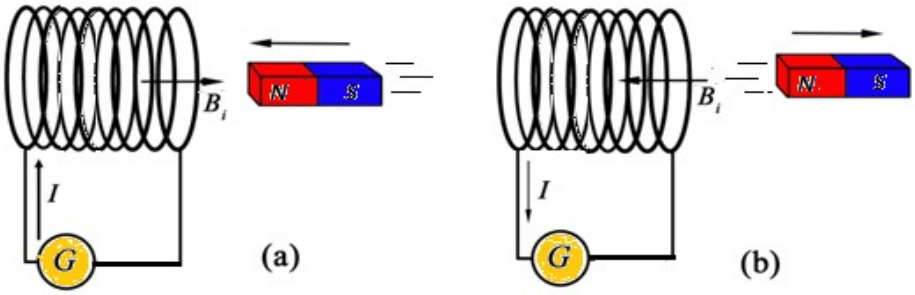


Figura 1.7: Lei de Lenz

Bibliografia

- BASSALO, J. M. F., A Crônica da Física do Estado Sólido IV Magnetismo. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 16, 1a. Ed., n◦ (1-4), 1994.

- BASSALO, J. M. F., Nascimentos da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 20, n◦ 4, 1998.

- COEY, J. M. D. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge, 2009.

- GRAÇA, C. Eletromagnetismo. Série Didática, Santa Maria, 1a. Ed., 2012.

- GUALTER, NEWTON, HELOU, Física 3. Editora Saraiva, São Paulo, 1a. Ed., 2010.

- JACINTO, V. M., Laboratório de eletricidade e magnetismo – uma abordagem prática de alguns conceitos de eletricidade e de magnetismo na sala de aula. Dissertação de mestrado - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2017.

- LOURENÇO, I. M., A história da Física no Ensino de Física: A Evolução da Descoberta do Eletromagnetismo na História e no Ensino da Física. Dissertação de mestrado - Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.

- NUSSENZVEIG, H. M., Curso de Física Básica 3, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1ª. Ed., 1997.

- POYSER, A. W., Magnetism and electricity: A manual for students in advanced classes, Longmans, Green, & Co., New York, p.285, fig.248, 1892.

- RAMALHO, J. F., NICOLAU, G., TOLEDO, P. A., Os Fundamentos da Física 3. Editora Moderna, São Paulo, 8a. Ed., 2003.

- RIBEIRO, G. A. P., As Propriedades Magnéticas da Matéria: um Primeiro Contato. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 3, Setembro, 2000.

ATIVIDADE 02

Os mapas conceituais

Nesta atividade será apresentada uma ferramenta poderosa no que diz respeito à aprendizagem, os mapas conceituais. É importante destacar que estes podem auxiliar no estudo de qualquer disciplina facilitando sua compreensão. É uma ferramenta que todo aluno de qualquer nível de ensino deveria conhecer e utilizar e todo professor deveria ensinar e estimular sua utilização. Além disso, é um excelente instrumento de avaliação, pois permitem, ao professor, analisar quais e como estão organizados os conceitos no cognitivismo dos alunos, possibilitando ao professor intervir de maneira mais eficiente para sanar qualquer deficiência na aprendizagem.

Os mapas conceituais foram desenvolvidos por Novak como uma maneira de aplicar a teoria da aprendizagem significativa de David Ausubel.

2.1 Conhecendo os mapas conceituais

O que é um mapa conceitual?

É um diagrama que busca hierarquizar e relacionar conceitos. Nos mapas conceituais Hierarquizar significa que existem conceitos mais importantes, mais gerais, mais estruturantes, do que outros. Observe que essa hierarquia não é obrigatoriamente vertical, ou seja, de cima para baixo, embora esta construção seja muito utilizada.

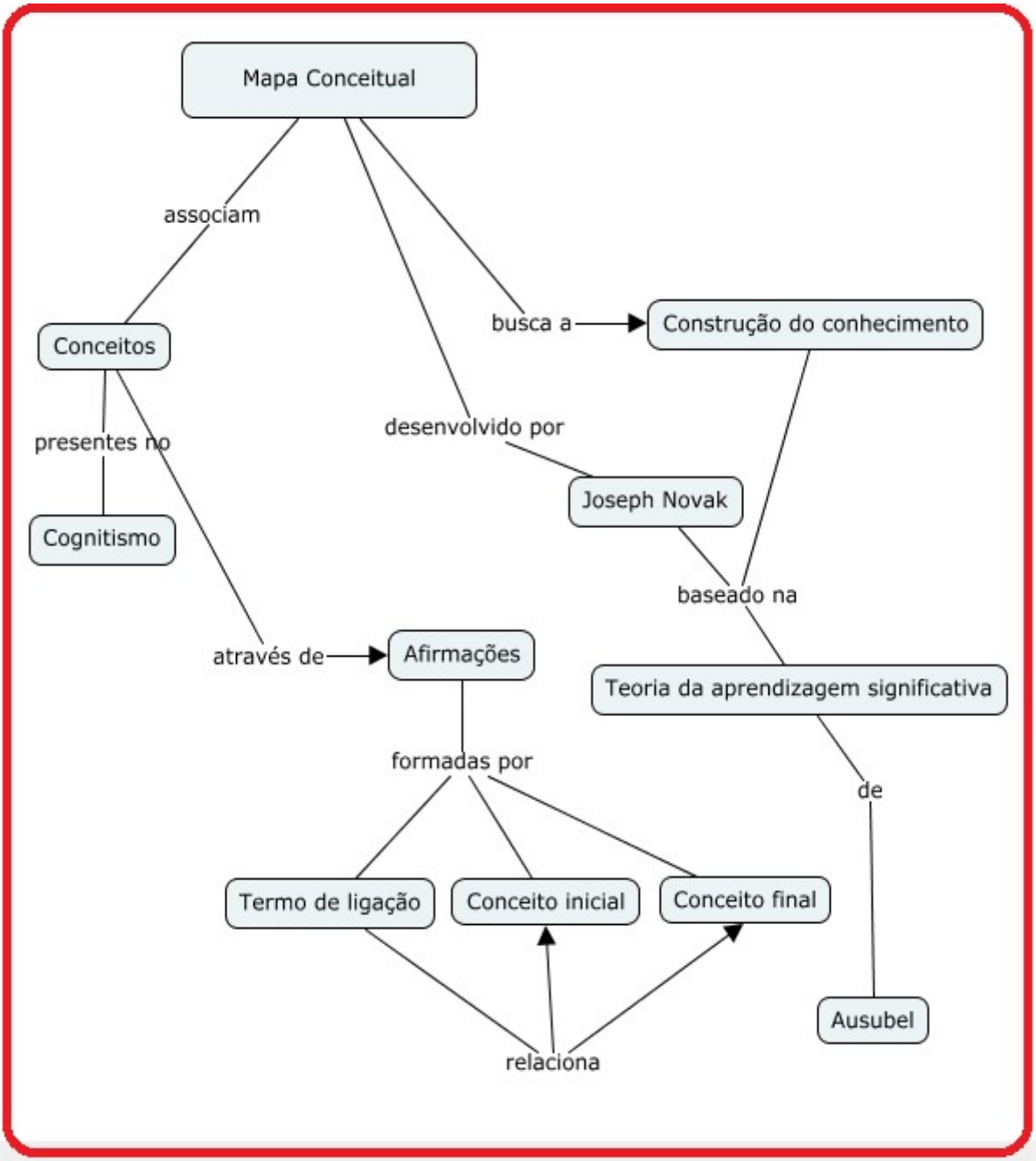
Como podem ser aplicados?

É um recurso de aprendizagem que pode ser utilizado pelo professor para demonstrar as relações entre os conceitos principais que envolvem os conteúdos, observando que devem ser introduzidos quando os alunos já tiverem contato com o material a ser aprendido. Também pode ser usado como meio de avaliação, onde esta se dá através da analise dos mapas conceituais confeccionados pelos estudantes, destacando a importante da explicação desses mapas para o restante da turma e que tenham a oportunidade de refazerem seus mapas incorporando conceitos novos. Observando que, em cada uma dessas aplicações os mapas conceituais funcionem como instrumentos de negociação de significados. Os mapas conceituais também podem ser utilizados pelos alunos para fazer apresentações, anotações, planejamento de estudos e para estudarem para avaliações.

2.2 Construindo mapas conceituais

Os mapas conceituais são instrumentos que refletem a organização e representação dos conhecimentos presentes no cognitivo do indivíduo e tem como base a hierarquização de conceitos, sendo estes anotados no interior de figuras geométricas, como elipses e retângulos. Sendo estes ligados através de linhas e palavras que conectam esses conceitos e que representam as relações entre estes.

Mapa conceitual 1 – estrutura de um mapa conceitual



Vamos construir um mapa conceitual?

Siga os seguintes passos:

- *Vamos escolher um tema de um conteúdo trabalhado anteriormente, um bom tema seria o eletromagnetismo.*

- *Agora vamos criar uma lista de conceitos ligados ao tema.*

- *Coloque o(s) conceito(s) mais abrangente(s) no topo.*

- *Ligue conceitos que estejam subordinados aos mais abrangentes.*

- *Use conectivos (palavras ou pequenas frases) que expliquem as ligações entre os conceitos.*

- *Avalie seu mapa conceitual e o modifique se necessário.*

- *Finalmente seu mapa conceitual está pronto.*

Bibliografia

- ALMEIDA, V. O., MOREIRA, M. A., Mapas conceituais no auxílio à aprendizagem significativa de conceitos da óptica física. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 30, no. 4, 2008.

- MENDONÇA, C. A. S. O uso do mapa conceitual progressivo como recurso facilitador da aprendizagem significativa em Ciências Naturais e Biologia. 2012. 349 f. Tese (Programa internacional de doctorado Enseñanza de las ciencias) – Departamento de Didácticas Específicas, Universidad de Burgos, Burgos, 2012.

- MOREIRA, M. A., Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa. Editora Centauro, São Paulo, 2010.

- MOREIRA, M. A., Mapas Conceituais. Cad. Cat. Ens. Fis., Florianópolis, 3(1): 17-25, abr. 1986.

- MOREIRA, M. A., Teorias de aprendizagem. Editora Pedagógica e Universitária, São Paulo, 2a ed, 2011b.

- NOVAK, J. D. e GOWIN, D. B., Aprender a aprender. Lisboa: Plátano Edições Técnicas. 1999.

- TAVARES. R., Construindo mapas conceituais. Ciências & Cognição; Ano 04, Vol. 12, 2007.

ATIVIDADE 03

Momentos magnéticos: o magnetismo a nível fundamental

Quando falamos de eletromagnetismo, vem normalmente em nossa mente a relação entre corrente elétrica e campo magnético a nível macroscópico, normalmente envolvendo um fio condutor reto ou em forma de espira, bobina ou solenóide. Este capítulo vem mostrar que a relação entre as propriedades elétricas e magnéticas tem origem atômica. Estudaremos movimentos referentes ao elétron que geram momento angular e que associado a carga elétrica faz surgir o momento magnético, manifestação mais fundamental do eletromagnetismo. Para compreender melhor a origem e todo o potencial que envolve os materiais magnéticos sugerimos que assista à palestra, "Ímãs permanentes: a força que impulsiona o desenvolvimento", no endereço eletrônico https://www.youtube.com/watch?v=w-0W9izRPZo .

3.1 O Spin do Elétron e o Magnetismo

Para compreendermos a origem das propriedades magnéticas temos que olhar para os átomos, mais especificamente para os movimentos dos elétrons dentro dos átomos. Para isso, iremos adotar o modelo semi-clássico de Rutherford-Bohr, onde temos um núcleo positivo, composto por prótons e nêutrons e uma região em sua volta denominada de eletrosfera, onde encontramos os elétrons.

Quanto ao movimento dos elétrons, neste modelo, temos o movimento de translação em torno do núcleo, denominado de spin-órbita e o movimento de rotação denominado simplesmente de spin (definição clássica de spin, visto que este é uma propriedade intrínseca das partículas quânticas).

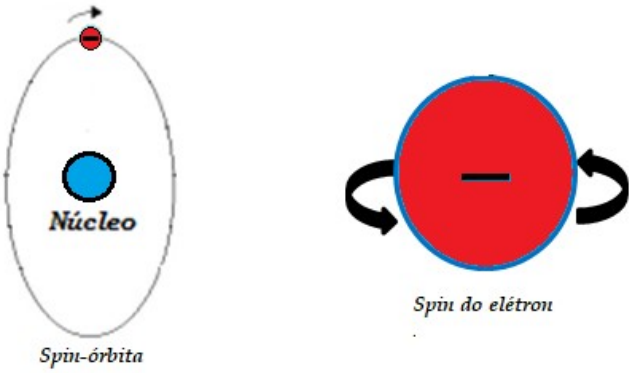


Figura 3.1: Representação clássica dos movimentos de Spin-órbita (translação) e Spin (rotação) do elétron.

3.2 Momento Angular

O momento angular $\vec{L}$ é uma grandeza física associada a rotações e é definida como o produto vetorial do vetor posição $\vec{r}$ e do vetor quantidade de movimento $\vec{p}$.

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \qquad (3.1)$$

Onde $\vec{p} = m.\vec{v}$

Logo, podemos escrever:

$$\vec{L} = m.\ \vec{r} \times \vec{v} \qquad (3.2)$$

Sendo o vetor momento angular $\vec{L}$ perpendicular ao vetor $\vec{r}$ e ao vetor $\vec{p}$. Seu módulo é dado por:

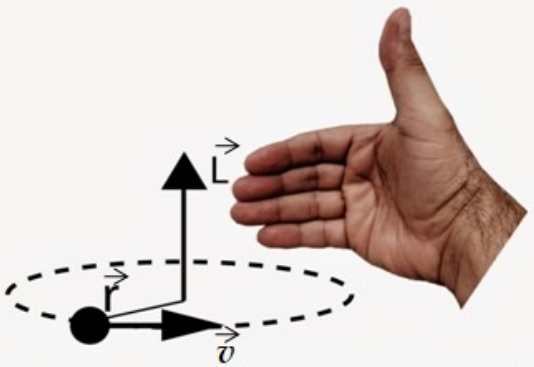
$$L = m.r.v.sen\theta = m.r.v \qquad (3.3)$$

Podemos escrever o módulo do momento angular em termos de velocidade angular ***(ω)****, sendo* $v = \omega.r$.

Logo,

$$L = m.\ \omega.\ r^2 \qquad (3.4)$$

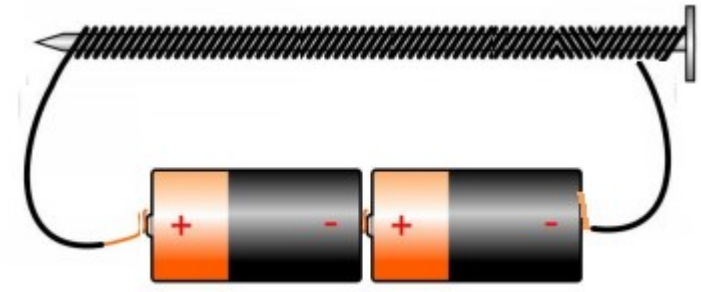
$$\vec{L} = m.\ \vec{r} \times \vec{v}$$



Enquanto o polegar indica a direção e sentido do momento angular, os demais dedos, levemente encurvados, indicararão o sentido da velocidade.

Figura 3.2: Regra da mão direita
Fonte:
http://fisicadaressonanciamagnetica.blogspot.com.br/2015/02/bases-fisica-da-ressonancia-magnetica.html

Experimento 1 – Construindo um eletroímã



1. Material:

- Prego grande de ferro;
- Fio de cobre;
- Pilhas grandes e
- Clipes.

2. Objetivos:

Confeccionar um eletroímã simples em sala de aula.

3. Procedimentos:

- Enrolar o fio de cobre no prego em forma de um solenóide, deixando livre as duas pontas do fio condutor de aproximadamente 10cm com as extremidades descascadas para a conexão com a pilha.
- Ligar as extremidades do fio com os polos da pilha. Para fixar melhor você pode usar uma fita isolante.
- Aproxime o eletroímã dos clipes observando o que acontece.

Texto 1

Eletroímã

Quando uma corrente elétrica percorre um solenóide cria um campo magnético (Figura a) passando a ter um comportamento semelhante a um ímã em forma de barra. Então dizemos que ele se constitui um eletroímã, ou seja, um ímã obtido por meio de corrente elétrica. Observando que o eletroímã possui uma vantagem sobre o ímã comum, pois, equivale a um ímã que pode ser ligado e desligado.

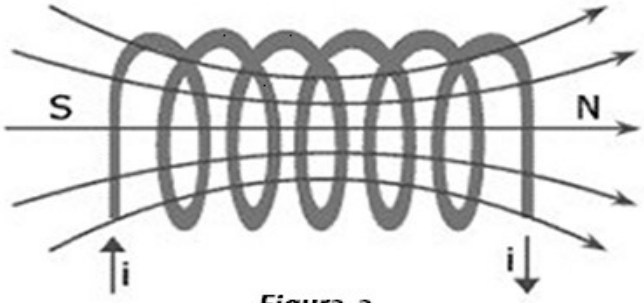


Figura a

Sabemos, de maneira geral, que os eletroímãs utilizados em diversas aplicações apresentam em seu interior um núcleo de ferro, ou de cobalto, ou de níquel, ou com ligas formadas por esses elementos químicos. Esse procedimento foi adotado porque quando colocamos um desses metais no interior do solenóide o campo magnético do eletroímã torna-se mais intenso. Então, quando ligamos um eletroímã com um núcleo de metal a uma bateria, as extremidades desse núcleo passam a ter um comportamento semelhante aos polos de um ímã forte, atraindo alguns objetos de ferro. Há várias aplicações práticas para os eletroímãs, por exemplo, em ***campainhas, motores, geradores, guindastes, etc.***

Substância imantada

Tomando como modelo, o átomo de Rutherford-Bohr, onde temos os elétrons orbitando o núcleo do átomo. Sabemos que quando os elétrons se movimentam, eles criam uma corrente elétrica muito pequena dando origem a um campo magnético também muito pequeno. Desta forma podemos dizer que cada átomo se comporta como um pequeno ímã.

Se tomarmos, por exemplo, uma barra de ferro que não esteja magnetizada, implica dizer que em seu interior os ímãs elementares associados aos átomos estão orientados de forma desorganizada (aleatória), como mostra a Figura b. Por estarem dessa forma, os campos magnéticos associados a cada ímã elementar tendem a se anular, fazendo com que esse metal não apresente qualquer efeito magnético.

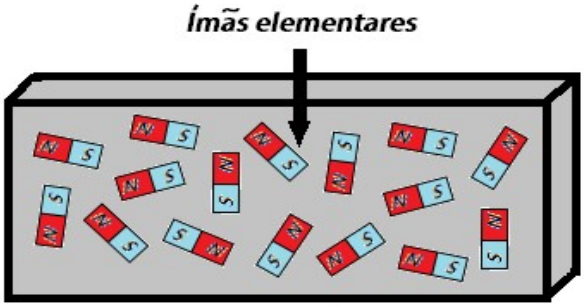


Figura b

Ao colocarmos uma barra de ferro no interior de um campo magnético, que pode ser gerado no interior de um solenóide, este atuará sobre cada um dos ímãs elementares dos átomos, deixando-os orientados como mostra a Figura c. Então esses campos magnéticos, associados aos átomos, se juntam formando um campo magnético mais forte (intenso) e perceptível. Passando a apresentar efeitos magnéticos capazes de atrair ou repelir outros materiais.

Desta maneira, temos uma substância imantada ou magnetizada. Logo, para que tenhamos uma barra de ferro comum semelhante a um ímã, basta orientar os seus ímãs elementares.

Figura c

Bibliografia

http://brasilescola.uol.com.br/fisica/eletroima.htm

3.3 Momento Magnético Orbital ($\vec{\mu}$)

O momento angular orbital está associado à rotação de uma partícula em torno do centro de força. Mas cargas em rotação dão origem a campos magnéticos. A fonte mais simples de campo magnético é o chamado dipolo magnético. O seu protótipo é um anel de corrente. Se uma corrente circula em torno de uma área o (vetor) momento magnético associado é:

$$\vec{\mu} = I\,\vec{A} \qquad (3.5)$$

Vamos considerar um átomo em que um elétron de massa m e carga –e descreve uma órbita circular de raio r com uma frequência angular ω. O vetor momento angular será perpendicular ao plano da órbita. Podemos definir o vetor frequência angular, perpendicular ao plano da órbita e com o sentido dado pela regra da mão direita em relação ao movimento da partícula. O módulo do vetor momento angular fica:

$$L = m.v.r = m.r^2.\omega \qquad (3.6)$$

A carga passa por um ponto qualquer da órbita $\omega/2\pi$ vezes por unidade de tempo, de forma que a corrente correspondente é $I = -e\,.\,\omega/2\pi$. Assim, a intensidade do momento magnético associado é:

$$\mu = I\,A = -e\,.\,(\omega/2\pi)\,.\,\pi\,.\,r^2 = -e\,.\,\omega\,.\,r^2/2 \qquad (3.7)$$

Como $L/m = r^2.\omega$, temos substituindo em 3.7 que o momento magnético é dado por:

$$\vec{\mu} = -e\,.\,\vec{L}/2m \qquad (3.8)$$

Ao analisarmos a equação 3.8 vemos que os vetores momento magnético e momento angular são proporcionais e, devido à carga do elétron ser negativa, possuem sentidos opostos.

Momento angular e o momento magnético gerados pelo movimento orbital do elétron

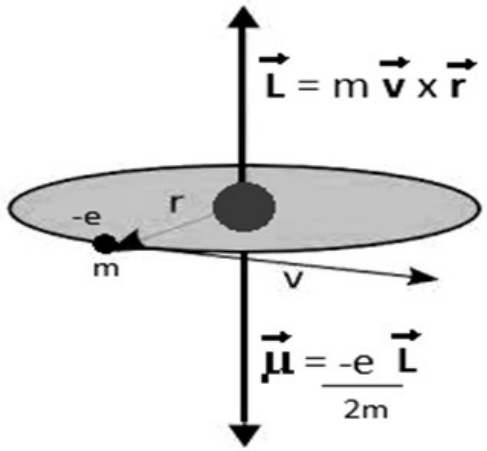


Figura 3.3: Spin-órbita

Fonte: Barros (2017)

3.4 Momento Magnético de Spin ($\vec{\mu}_S$)

Iremos apresentar o momento magnético intrínseco ou de spin, destacando que o spin do elétron é uma propriedade intrínseca quântica e seu tratamento matemático extrapola os objetivos desse material. Por esse motivo, iremos apenas apresentá-lo sem se deter ao formalismo matemático, lembrando que a ideia do elétron como uma bolinha girando é apenas um análogo, pois o elétron no formalismo quântico é visto como uma onda de probabilidades.

O momento magnético intrínseco ou de spin de um átomo é dado por

$$\vec{\mu}_S = \frac{-e}{m} . \vec{S} \qquad (3.9)$$

Onde $\vec{S}$ é o momento angular intrínseco do elétron.

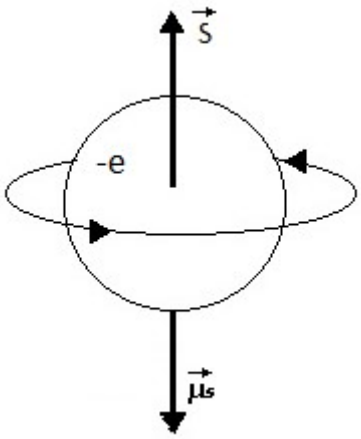


Figura 3.4: Uma visão clássica do momento magnético de spin.

3.5 Momento Magnético Total ($\vec{\mu}_t$)

O momento magnético total do átomo é a soma do momento magnético orbital e do spin. O momento orbital é normal ao plano da órbita e o do spin é paralelo ao eixo de rotação.

O momento magnético resultante associado a esses movimentos é uma quantidade vetorial e pode ser escrito como:

$$\vec{\mu}_t = \vec{\mu} + \vec{\mu}_S = \frac{-e}{2m} . \vec{L} + \frac{-e}{m} . \vec{S} = \frac{-e}{2m} . (\vec{L} + 2\,\vec{S}) \qquad (3.10)$$

A resultante dos momentos magnéticos orbitais e de spin associados a todos os elétrons de um átomo é o momento magnético atômico.

Importante!

O momento magnético de um átomo possui três origens principais:

- O spin com o qual o elétron é dotado;

- O momento angular orbital em torno do núcleo;

- A variação do momento orbital induzido pela aplicação de um campo magnético externo.

Bibliografia

- *BARBOSA, M. B. Um Estudo do Magnetismo ao Nanomagnetismo e suas Aplicações. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2009.*

- *BARROS, A.E.A., BARRETO, P.G. Eletromagnetismo: uma viagem do macro ao micro. São Paulo: Livraria da Física, 1a. Ed., 2017.*

- *EISBERG, R. e RESNICK, R. Física Quântica. Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 27a. Ed., 1979.*

- *GUALTER, NEWTON, HELOU,* Física 3*. Editora Saraiva, São Paulo, 1a. Ed., 2010.*

- *HALLIDAY, RESNICK, WALKER,* Fundamentos da Física, v.3: Eletromagnetismo*. Editora LTC, Rio de Janeiro, 8a. Ed., 2009.*

- *JUNIOR, J. V. Álgebra Geométrica do Espaço Euclidiano e a Teoria de Pauli. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 19, no. 2, 1997.*

- *PIRES, A. S. T. Evolução das idéias da física. Editora Livraria da Física, São Paulo, 2008.*

- *RAMALHO, J. F., NICOLAU, G., TOLEDO, P. A.,* Os Fundamentos da Física 3*. Editora Moderna, São Paulo, 8a. Ed., 2003.*

ATIVIDADE 04

A magnetização e o campo magnético

Correntes elétricas geram campos magnéticos, sendo o vácuo o meio que circunda os condutores. Contudo, bobinas existentes em transformadores, motores, geradores e eletroímãs quase sempre usam núcleos de ferro para aumentar o campo magnético e confiná-lo em determinadas regiões. Os ímãs permanentes, as fitas de gravação magnética e os discos dos computadores estão ligados diretamente as propriedades magnéticas dos materiais: quando você armazena informações no disco de um computador, na verdade você está criando uma rede de ímãs microscópicos no interior do disco. Portanto, é importante examinar alguns aspectos das propriedades magnéticas dos materiais, tais como a magnetização e a susceptibilidade magnética.

4.1 A magnetização e os campos $\vec{H}$ e $\vec{B}$

A magnetização *é uma propriedade macroscópica que representa a soma vetorial dos momentos magnéticos dos átomos no material. Para que haja magnetização é necessário que a média dos momentos magnéticos seja diferente de zero.*

O campo magnético *é representado por $\vec{H}$ e é gerado por um circuito de corrente ou por um ímã de barra. A unidade no sistema internacional (SI) de $\vec{H}$ é o ampère por metro (A/m).*

A indução magnética*, ou* ***densidade do fluxo*** *magnético, indicada por $\vec{B}$, representa a magnitude da força do campo magnético no interior de uma substância que é submetida a um campo magnético externo $\vec{H}$. As unidades para $\vec{B}$ é o tesla. Tanto $\vec{B}$ como $\vec{H}$ são vetores de campo magnético, sendo caracterizados não somente pela sua magnitude, mas também pela sua direção no espaço.*

O campo magnético e a densidade do fluxo estão relacionados de acordo com

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \qquad (4.1)$$

onde μ é a permeabilidade magnética, uma propriedade do meio específico através do qual o campo $\vec{H}$ passa e onde $\vec{B}$ é medido.

Resumindo a magnetização de um material está ligada a orientação dos momentos magnéticos. Ela cresce à medida que os momentos magnéticos passam a ter a mesma orientação e para que isso ocorra é necessário um campo magnético externo $\vec{H}$ aplicado ao material. Este campo ao interagir com o material gera em seu interior um campo indução magnética $\vec{B}$

proporcional a magnetização. A relação entre os campos se dá através de uma grandeza relacionada a propriedade do meio chamada de permeabilidade magnética (μ).

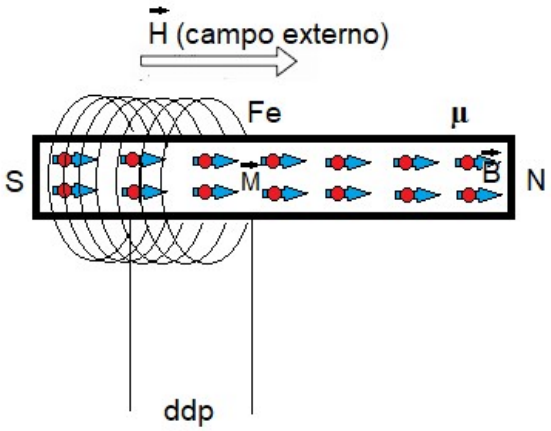


Figura 4.1: Campo magnético $\vec{H}$ e indução magnética $\vec{B}$ em um eletroímã.

4.2 A Suscetibilidade Magnética

A susceptibilidade magnética *(χ_m) é uma resposta do material a aplicação de um campo magnético externo $\vec{H}$.*

Observe que a relação entre a magnetização e o campo magnético externo $\vec{H}$ é dada por:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \qquad (4.2)$$

Sendo que a ***susceptibilidade magnética*** *(χ_m) é uma grandeza adimensional.*

Podemos relacionar as grandezas $\vec{M}$, $\vec{B}$ e $\vec{H}$, através da equação:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \qquad (4.3)$$

Onde se substituirmos a Eq. (4.2) na Eq. (4.3), obtemos que:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} \qquad (4.4)$$

Considerando que:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi_m) \qquad (4.5)$$

Onde μ é a permeabilidade magnética do meio e μ_0 a do vácuo.

Como a permeabilidade magnética relativa é dada por $\mu_r = \mu / \mu_0$, temos que,

$$\mu_r = (1 + \chi_m) \qquad (4.6)$$

Observe que a Eq. (4.5) indica que quando a suscetibilidade magnética é nula $\chi_m=0$ a permeabilidade do meio fica igual a do vácuo (onde não há partículas para se magnetizarem) $\mu = \mu_0$.

Bibliografia

- *BARROS, A. E. A., BARRETO, P. G. Eletromagnetismo: uma viagem do macro ao micro. São Paulo: Livraria da Física, 1a. Ed., 2017.*

- *CALLISTER, JR., WILLIAM D.,* Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução*. Editora LTC, Rio de Janeiro, 7a. Ed., 2008.*

- *REITZ, J. R., MILFORD, F. J., CHRISTY, R. W.,* Fundamentos da Teoria Eletromagnética*. Editora Elsevier, Rio de Janeiro, 17a. Ed., 1982.*

ATIVIDADE 05

Os principais materiais magnéticos

Conhecer sobre os materiais magnéticos nos permite entender melhor o eletromagnetismo, pois passamos a compreender sua origem no nível mais fundamental da matéria, relacionando-o aos movimentos dos elétrons dentro dos átomos. A partir dessa visão se torna mais fácil entender as manifestações macroscópicas do magnetismo. Além disso, permite que mudemos nosso entendimento, errôneo, de que os materiais magnéticos se resumem a ímãs e materiais que podem se tornar magnetizados, como o ferro. Um ponto importante é que todo material é constituído de átomos e consequentemente possuem momentos magnéticos. Portanto, quando falamos de materiais magnéticos estamos nos referindo a todos os materiais, o interessante é que determinados grupos de materiais interagem de forma diferente quando expostos a um campo magnético externo $\vec{H}$*, esses comportamentos permitem classificar a maioria das substâncias nos seguintes grupos de materiais magnéticos: os diamagnéticos, os paramagnéticos, os ferromagnéticos e os antiferromagnéticos, destacando que existem outros tipos de materiais magnéticos que não serão abordados neste trabalho. Para começarmos nosso estudo sugerimos que assista ao vídeo do professor Kaled, da Universidade Federal Fluminense (UFF), cujo título é "Materiais para, ferro e diamagnéticos: visões macro e microscópica", disponível no endereço eletrônico https://www.youtube.com/watch?v=KmQ2cNKQaiQ. Esse vídeo traz características de alguns materiais magnéticos. Em seguida, observe o mapa conceitual 2 que complementa o vídeo e que estabelece o primeiro contato com esse assunto. Baseando-se no vídeo e no mapa conceitual responda as seguintes questões:*

1. Defina materiais magnéticos.

2. Quais os principais materiais magnéticos apresentados no mapa conceitual?

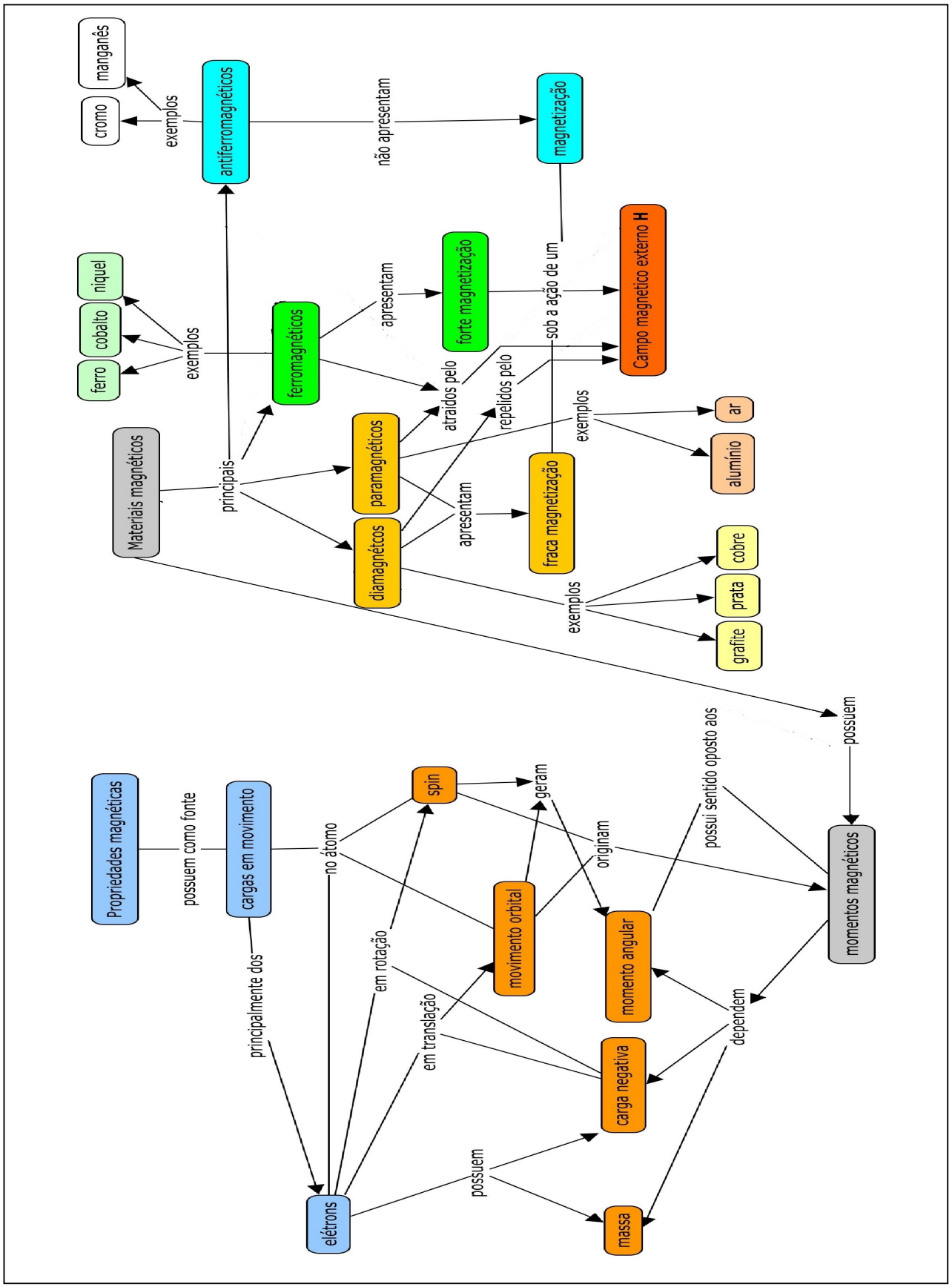
3. Se um material for aproximado de um ímã de neodímio (super-ímã) e este for repelido, pode-se afirmar que este é um material _____.

4. Quais os materiais magnéticos que apresentam uma forte magnetização na presença de um campo externo $\vec{H}$*?*

5. Quais os materiais magnéticos que apresentam uma fraca magnetização na presença de um campo externo $\vec{H}$*?*

6. Qual material que não apresenta magnetização na presença de um campo externo $\vec{H}$*?*

Mapa conceitual 2 – primeiro contato com os principais materiais magnéticos



A partir de agora vamos aprofundar um pouco mais sobre cada material magnético, estudando suas características e aplicabilidades.

5.1 Diamagnéticos

Os materiais diamagnéticos apresentam um magnetismo muito fraco, que somente se manifesta na presença de um campo magnético externo $\vec{H}$. Esses materiais apresentam uma magnetização contrária ao sentido do campo magnético aplicado a ele. Essa característica faz com que esse tipo de material magnético seja repelido pelo objeto que gera esse campo externo.

Sua magnetização é associada à variação do movimento orbital dos elétrons e não ocorre contribuição do spin do elétron.

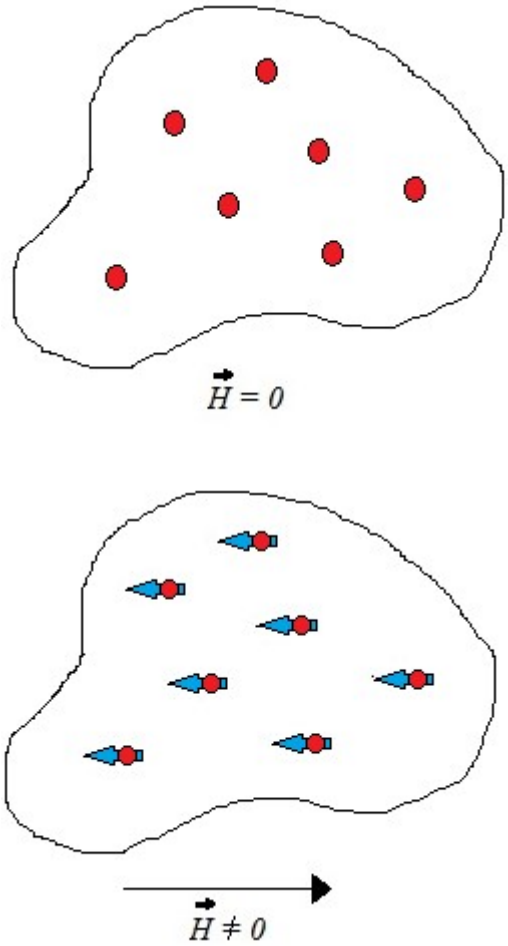


Figura 5.1: Configuração dos momentos magnéticos em um material diamagnético com e sem a presença de um campo magnético externo $\vec{H}$.

Por que não ocorre a contribuição do spin do elétron nos materiais diamagnéticos?

Para compreendermos essa característica dos materiais diamagnéticos, temos que utilizar o conceito quântico de orbital (regiões onde temos maior probabilidade de encontrarmos elétrons), Em cada orbital pode-se ter no máximo dois elétrons e quando o orbital está completo, ou seja, com dois elétrons, estes terão momentos magnéticos com sentidos contrários, produzindo neste orbital um momento magnético resultante nulo, ou seja, não contribuindo para a magnetização deste átomo.

Os átomos dos materiais diamagnéticos possuem orbitais completos no subnível mais energético, portanto os momentos magnéticos de spin não contribuem para a magnetização desses materiais.

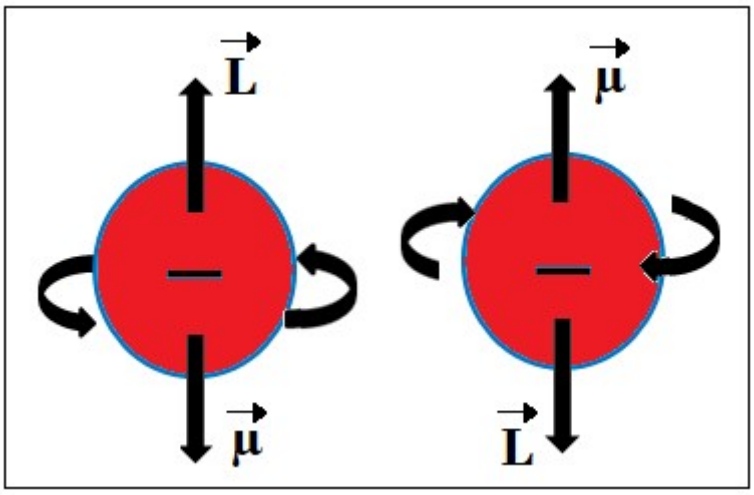
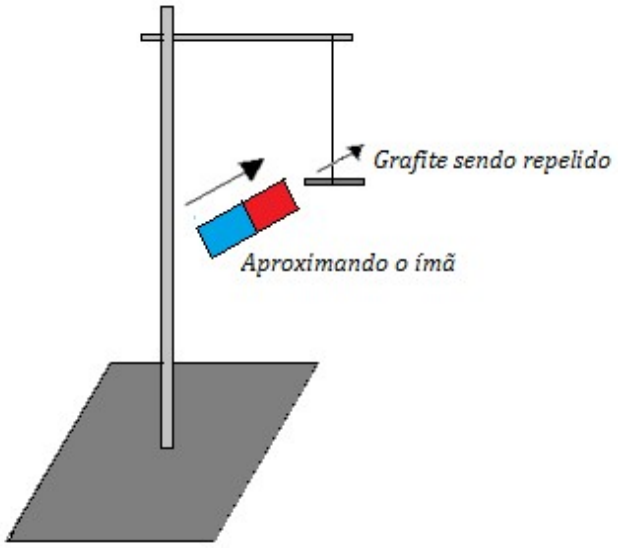


Figura 5.2: Representação dos momentos magnéticos e angulares dos elétrons em um orbital completo.

Experimento 2 – Repelindo o Grafite



1. Material:

- Suporte;
- Linha de costura;
- Ímã de neodímio;
- Grafite de lapiseira.

2. Objetivos:

Demonstrar que um material diamagnético é repelido por um ímã devido ao alinhamento de seus momentos magnéticos contrário ao campo externo.

3. Procedimentos:

- Amarra-se com a linha o grafite ao suporte;
- Aproxima-se bem o ímã do grafite.

Observação: *É importante que o ímã seja de neodímio (super-ímã), pois o magnetismo em um material diamagnético é muito fraco.*

Qual a relação entre a suscetibilidade magnética e os materiais diamagnéticos?

Outra característica dos materiais diamagnéticos é de possuírem ***suscetibilidades magnéticas negativas****, como podemos verificar na Tabela 5.1. As suscetibilidades magnéticas dos diamagnéticos são praticamente independentes da temperatura.*

Tabela 5.1: Suscetibilidades magnéticas χ_m de alguns materiais diamagnéticos.

Material Diamagnético	$\chi_m(10^{-5})$
Bismuto	- 16,6
Mercúrio	- 2,9
Prata	- 2,6
Chumbo	- 1,8
Cobre	- 1,0

Importante!

No diamagnetismo não temos a contribuição do spin do elétron, apenas da variação do movimento orbital do elétron provocada pela atuação de um campo magnético externo.

O efeito do campo magnético em orbitais atômicos

Agora vamos entender, através de uma analise matemática, a contribuição do campo magnético para a magnetização dos materiais.

Iniciaremos adotando o modelo semi-clássico de Rutherford-bohr.

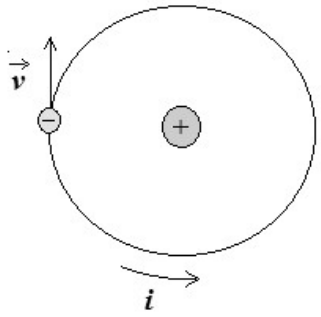


Figura 5.3: Representação do modelo atômico de Rutherford-Bohr

Agora, vamos calcular a corrente associada ao movimento orbital do elétron:

$$i = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{-e}{T} \qquad (5.1)$$

Observe que a variação de tempo Δt corresponde ao período T e ele pode ser escrito como a distância percorrida sobre a velocidade, pois v=Δs/Δt.

$$i = \frac{-e}{\frac{2\pi R}{v}} = -\frac{ev}{2\pi R} \qquad (5.2)$$

Veja que a força elétrica está fazendo o papel da força centrípeta, logo:

$$F_e = F_{cp} \qquad (5.3)$$

$$\frac{1}{4\pi\xi_0}\frac{e^2}{R^2} = \frac{mv^2}{R} \qquad (5.4)$$

Quando ligamos o campo magnético externo, aparece atuando sobre o elétron uma força de natureza magnética F_m = e v'B, que altera a velocidade do elétron de v para v'. Logo:

$$F_e + F_m = F_{cp} \qquad (5.5)$$

$$\frac{1}{4\pi\xi_0}\frac{e^2}{R^2} + ev'B = \frac{mv'^2}{R} \qquad (5.6)$$

Substituindo (5.4) em (5.6), teremos:

$$\frac{mv^2}{R} + e\,v'B = \frac{mv'^2}{R} \qquad (5.7)$$

$$ev'B = \frac{m}{R}\left(v'^2 - v^2\right) = \frac{m}{R}(v'-v).(v'+v) \qquad (5.8)$$

Perceba que a mudança da velocidade de v para v' é muito pequena, logo podemos considerar que (v'+ v) é aproximadamente 2v' e como (v'- v) é a variação de velocidade. Logo teremos:

$$ev'B = \frac{m}{R}\Delta v 2v' \qquad (5.9)$$

Isolando a variação de velocidade, teremos:

$$\Delta v = \frac{eRB}{2m} \qquad (5.10)$$

Sabendo que a intensidade do momento magnético orbital vale:

$$\mu = iA = -\frac{ev}{2\pi R}\pi R^2 \qquad (5.11)$$

Encontramos a variação do momento magnético orbital como sendo:

$$\Delta\mu = -\frac{eR}{2}\Delta v \qquad (5.12)$$

Substituindo a Eq. (5.10) na Eq. (5.12), temos que:

$$\Delta\mu = -\frac{e^2R^2B}{4m} \qquad (5.13)$$

Considerando os valores envolvidos, obtêm-se um pequeno valor para a variação do momento, indicando que esta influencia pouco na magnetização comparada com o spin do elétron. Além disso, o sinal negativo indica que este se opõe ao campo magnético, explicando porque os materiais diamagnéticos, cuja magnetização depende apenas do momento magnético orbital, tem seus momentos magnéticos orientados em um sentido contrário ao campo indução magnético $\vec{B}$ *e, consequentemente, ao campo externo magnético* $\vec{H}$.

Texto 2

Supercondutividade e o diamagnetismo

Quando se tem uma cerâmica supercondutora colocada sobre um ímã de terras raras e se passa a esfriá-la com nitrogênio líquido, observa-se uma propriedade presente nos materiais diamagnéticos, onde sob a ação de um campo externo um material diamagnético passa a apresentar uma magnetização com sentido contrário ao campo e consequentemente é repelido. Sendo que o fenômeno da supercondutividade carrega consigo uma grande estabilidade, portanto sem necessidade de utilização de atuadores ou controladores.

Para compreender melhor esse fenômeno recomenda-se que assista aos vídeos disponíveis nos seguintes endereços eletrônicos: https://www.youtube.com/watch?v=lepiBYcirOc&t=910s e https://www.youtube.com/watch?v=sS6s_mETeAI.

Os Trens Maglev (Magnetic Levitaton)

As tecnologias empregadas nos trens que utilizam a levitação magnética, chamados de Maglev, podem ser divididas em três grupos: de levitação eletrodinâmica, eletromagnética e na supercondutora.

Maglev que utiliza a Levitação Eletrodinâmica

Nestes trens inicialmente se utiliza rodas e trilhos convencionais, porém ao atingirem uma velocidade de aproximadamente 120 km/h passam a levitar, Este fenômeno está baseado no movimento relativo entre um ímã e uma lamina condutora, por exemplo o alumínio, a variação deste campo magnético gera uma corrente induzida no condutor e associado a essa corrente se tem outro campo magnético, que de acordo com a lei de Lenz, terá sentido contrário a variação do campo criado pelo ímã. Quanto a sua utilização, o Japão possui desde 1997, uma linha experimental, onde foi batido o recorde de velocidade para essa categoria de transporte (581 km/h) em 2003. Observa-se que se trata de sistema cuja implantação e manutenção são de custo elevado.

Maglev que utiliza a levitação eletromagnética?

Essa tecnologia explora a força de atração entre eletroímãs e materiais ferromagnéticos. Para se obter a estabilidade do veículo é necessário um sofisticado sistema de controle. Quanto a sua utilização, tem-se um trem de levitação na alemã e em Xangai (China), entre o aeroporto internacional e o centro da cidade.

Maglev que utiliza a levitação magnética supercondutora?

*Este tipo de levitação somente foi possível com o desenvolvimento das cerâmicas supercondutoras de elevada temperatura crítica e de supercondutores do tipo II, que apesar de terem forças de levitação menores, promovem uma maior estabilidade. A base física é a propriedade diamagnética dos materiais, no caso os supercondutores, que realizam a exclusão do campo magnético d*o seu interior. *Observando que para os supercondutores de tipo II essa exclusão é parcial.*

Trem de levitação magnética da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) aberto ao público no Rio

O Brasil, através da Coppe/UFRJ, tem investido em pesquisas referente aos Meglev's que utilizam a supercondutividade e no ano de 2016 passou a oferecer viagens demonstrativas abertas ao público em geral.

O Maglev brasileiro recebeu o nome de Maglev-Cobra e no seu primeiro dia de teste recebeu cerca de 160 passageiros, o percurso ocorre entre os dois centros de tecnologia no campus da UFRJ, em um total de 25 viagens. Sua capacidade atual é de até 30 passageiros por viagem e desenvolve uma velocidade de 10 km/hora em um trajeto de 200 metros.

Toda a estrutura que envolve o funcionamento do Maglev-Cobra utiliza como fonte de alimentação quatro painéis de energia solar fotovoltaica. Seu deslocamento se dá de forma suave, silenciosa e sem a emissão de poluentes.

O Maglev-Cobra flutua cerca de um centímetro acima dos trilhos. Sendo a tecnologia brasileira mais estável, mais econômica e possibilita uma aceleração ou frenagem mais rápidas do que os outros Maglev's desenvolvidos na Alemanha, China e Japão.

A sua implantação é outro fator favorável, visto que, o seu custo é equivalente a cerca de 1/3 do valor necessário para implantação de um metrô subterrâneo, considerando a mesma extensão.

Bibliografia

http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=trem-levitacao-magnetica-aberto-publico-rio&id=010175160224#.WbTiSMiGPIU

http://www.maglevcobra.coppe.ufrj.br/veiculo-como-funciona.html

5.2 Paramagnéticos

Os materiais paramagnéticos somente apresentam magnetização na presença de um campo magnético externo. Isso se deve a distribuição aleatória dos momentos magnéticos, que somente se orientam na presença desse campo, tendo o mesmo sentido dele. A magnetização apresentada por esses materiais é fraca e tem contribuição do momento orbital e do spin do elétron.

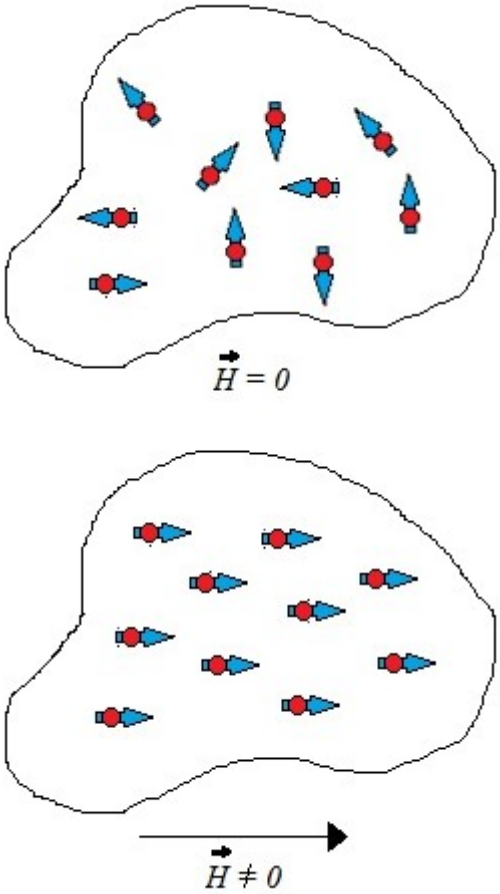


Figura 5.4: Configuração dos momentos magnéticos em um material paramagnético com e sem a atuação de um campo magnético externo $\vec{H}$.

Como os momentos de dipolos magnéticos se alinham com o campo externo, há um aumento da magnetização, dando origem a uma permeabilidade relativa μ_r maior que a unidade e a uma suscetibilidade magnética relativamente pequena e positiva.

Os materiais paramagnéticos têm susceptibilidade magnética com ordem de grandeza entre 10^{-5} e 10^{-2} no Sistema internacional de unidades (SI) e permeabilidades relativas entre 1 e 1,01. A tendência ao alinhamento encontra oposição na agitação térmica, assim a susceptibilidade magnética deve depender da temperatura (T), diminuindo quando esta aumenta.

Tabela 5.2: Suscetibilidades magnéticas χ_m de alguns materiais paramagnéticos à temperatura ambiente.

Material Paramagnético	χ_m
Alumínio	$2,07.10^{-5}$
Cloreto de Cromo	$1,51.10^{-3}$
Sódio	$8,48.10^{-8}$
Titânio	$1,81.10^{-6}$

A maioria das substâncias são paramagnéticas, por exemplo, o estanho, o alumínio, o ar, etc.

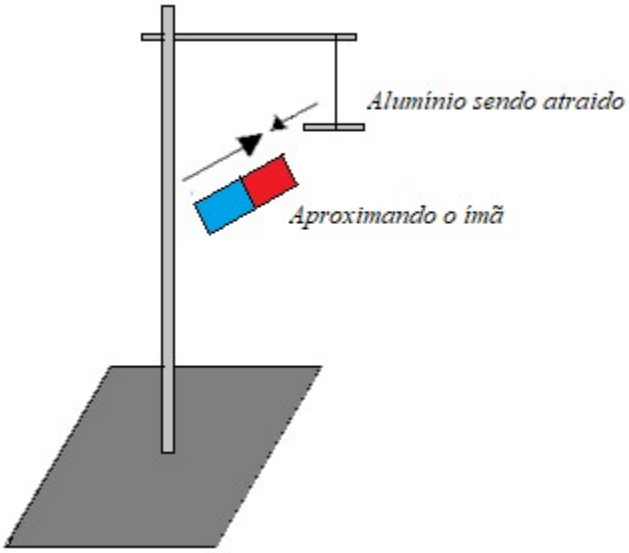
Importante!

Os efeitos que contribuem para o paramagnetismo são:

- O spin com o qual o elétron é dotado.

- O momento angular orbital em torno do núcleo.

Experimento 3 – Atraindo o Alumínio



1. Material:

- Suporte;
- Linha de costura;
- Ímã de neodímio;
- Lata de refrigerante de alumínio;
- Tesoura.

2. Objetivos:

Demonstrar que um material paramagnético é atraído por um ímã devido ao alinhamento de seus momentos magnéticos serem no sentido do campo externo.

3. Procedimentos:

- Pegue a tesoura e a lata de refrigerante e dela corte uma tira bem fina;
- Com um pedaço de linha amarre a tira de alumínio ao suporte;
- Aproxime o ímã de neodímio.

Observação: *É importante que o ímã seja de neodímio (super-ímã), pois, a magnetização em um material paramagnético é fraca.*

5.3 Ferromagnéticos

Os materiais ferromagnéticos são aqueles que se magnetizam fortemente na presença de um campo magnético, sendo ***atraídos fortemente por ímãs****. Os principais exemplos de materiais ferromagnéticos são* ***o ferro (Fe), o níquel (Ni) e o cobalto (Co)****.*

Por que os materiais ferromagnéticos possuem uma forte magnetização?

Nos materiais ferromagnéticos, temos regiões nas quais os momentos magnéticos se encontram orientados, regiões chamadas de ***domínios magnéticos ou domínios de Weiss.*** *Nestas regiões os spins estão espontaneamente orientados. Quando esses domínios estão orientados de forma aleatória sua magnetização total é nula. Quando submetemos esse material a um campo magnético externo* $\vec{H}$*, seus domínios magnéticos passam a se orientar no mesmo sentido dando origem a uma forte magnetização.*

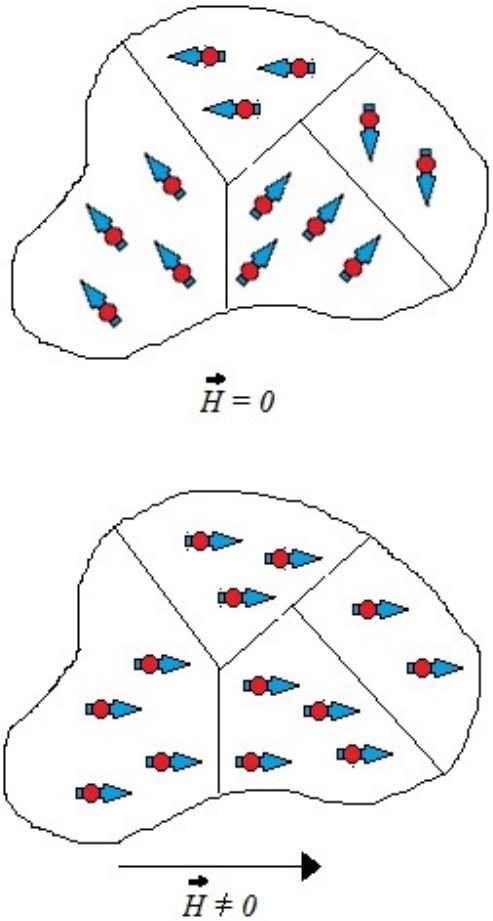


Figura 5.5: Configuração dos momentos magnéticos distribuídos em domínios magnéticos em um material ferromagnético com e sem a atuação de um campo magnético externo $\vec{H}$***.***

Importante!

- *Os materiais ferromagnéticos possuem valores altos de suscetibilidade magnética χ_m (χ_m>>1) e o campo de magnetização mantêm-se quando se remove o campo externo aplicado.*
- *A suscetibilidade magnética de um material ferromagnético não é constante e seu valor depende da intensidade de campo magnético $\vec{H}$ a que está submetido.*

5.3.1 Temperatura de Curie

O aumento da temperatura em um material ferromagnético provoca, devido à agitação térmica, desestruturação dos domínios magnéticos. Ao atingir a temperatura Curie este material deixa de ter propriedades ferromagnéticas e se torna um material paramagnético.

Tabela 5.3: Ponto Curie de alguns materiais.

Material ferromagnético	Ponto de Curie (°C)
Ferro	770
Cobalto	1130
Níquel	358
Nicromo	300
Gadolínio	16
Disprósio	-168

5.3.2 Histerese magnética

Quando se retira o campo magnético externo ao material ferromagnético, os domínios magnéticos não retornam totalmente a sua posição de origem, fazendo com que se tenha uma magnetização residual e esta pode ser praticamente desprezível como no caso do ferro doce (ferro praticamente puro), considerável como no caso do aço e intensa como nos casos do alnico (liga de alumínio, níquel, cobalto, cobre e ferro), do permalloy (liga de ferro e níquel). Essa propriedade de manter essa magnetização residual é chamada de histerese magnética.

A Figura 5.6 traz o gráfico denominado de curva de histerese, que relaciona a magnetização de materiais ferromagnéticos pela variação de um campo magnético externo $\vec{H}$ aplicado. Agora vamos analisar o gráfico:

1 *- Neste ponto, temos, inicialmente, uma magnetização nula quando não temos um campo externo $\vec{H}$ aplicado sobre o material ferromagnético.*

2 *– Passamos a aumentar a intensidade do campo externo $\vec{H}$ e consequentemente temos um aumento da magnetização do material.*

3 *– Chega-se a um ponto em que todos os domínios magnéticos estão alinhados com o campo $\vec{H}$ e, consequentemente, temos uma magnetização máxima que chamamos de magnetização de saturação (M_s).*

4 *– Passamos agora a reduzir a intensidade do campo aplicado $\vec{H}$ até zerá-lo ($\vec{H}$=0). Observa-se que neste momento ainda resta uma magnetização residual no material, denominada de magnetização remanescente (M_r).*

5 *– Passamos a inverter o sentido do campo $\vec{H}$ chegando a uma intensidade em que os domínios se desorientam (apontam para direções diferentes) nesse momento o material perde sua magnetização. O campo magnético que anula a magnetização é chamado de campo coercitivo (-**H_c**).*

6 *– continuando a aumentar a intensidade do campo $\vec{H}$ chegamos novamente à magnetização de saturação (**-M_s**).*

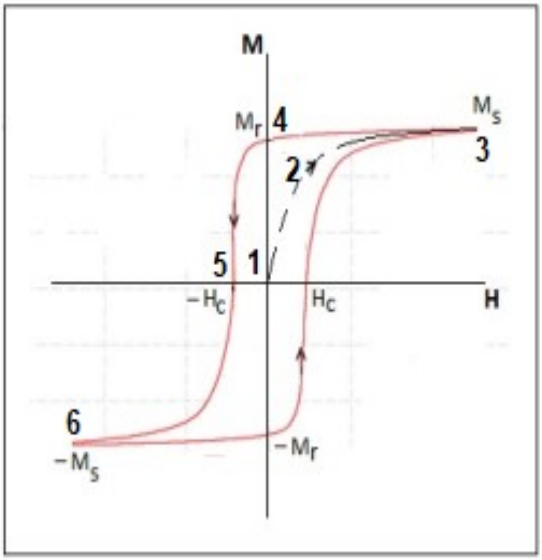


Figura 5.6: Curva de Histerese.

Texto 3

Dínamos ou geradores mecânicos de eletricidade

Os dispositivos que fazem a mudança de energia mecânica em energia elétrica são chamados de geradores mecânicos de corrente elétrica ou simplesmente de dínamos. São utilizados nas hidrelétricas, termoelétricas, nas usinas eólicas e nucleares para obtenção de energia elétrica.

Podemos dividir os dínamos em dois grupos:

1º - Dínamos que produzem corrente de forma contínua.

Estes geram corrente que circula num único sentido (contínua).

2º - Dínamos que produzem corrente de forma alternada.

Também chamados de alternadores – geram corrente que circula num sentido e no outro de forma alternada.

Princípio de funcionamento

A base de funcionamento dos dínamos é a indução eletromagnética, que consiste no surgimento de uma corrente elétrica em virtude da variação do fluxo magnético nas proximidades de um condutor. No caso isso ocorre numa espira que gira num campo magnético uniforme.

A espira é percorrida por corrente alternada tanto no dínamo de corrente alternada como no de corrente contínua. Basicamente a diferença entre os tipos de dínamos está na maneira de como essa corrente é retirada da espira e direcionada para o circuito externo. Essa retirada se dá através dos coletores, dispositivos formados por um conjunto dos anéis e escovas (pedaços de carvão).

A. Coletor de corrente alternada

Consideremos que a espira seja aberta em A e C, e daí sejam tirados dois condutores AB e CD que são ligados a dois anéis, B e D. Encostados a esses anéis existem dois pedaços de carvão (que são condutores), m e n (Figura I). O circuito externo R, onde vai ser utilizada a corrente, é ligado a esses pedaços de carvão. À medida que a espira gira dentro do campo magnético, os anéis giram juntos com ela. Os pedaços de carvão m e n ficam fixos e os anéis ficam raspando neles. A corrente produzida na espira passa para os anéis, deste para o carvão e do carvão vai para o circuito externo. Observe que quando a corrente elétrica muda de sentido na espira, também muda de sentido no circuito externo, ou seja, a corrente que chega ao circuito externo também é alternada.

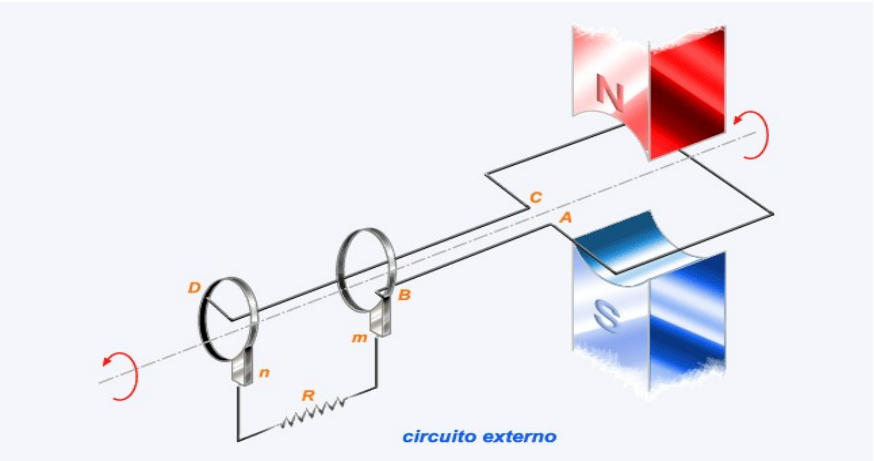


Figura I: Coletor de corrente alternada.

B. Coletor de corrente contínua

A grande diferença está na utilização de dois semi-anéis. Onde cada semi-anel está ligado a uma ponta da espira girando junto com ela. Os pedaços de carvão não se movimentam e são ligados ao circuito externo. Quando os semi-anéis giram, eles ficam comprimidos contra os pedaços de carvão (Figura II).

Observe que, em cada meio período, um semi-anel está em contato com um pedaço de carvão diferente.

Tem-se um ajuste na posição dos carvões de tal maneira que, no instante em que a corrente muda de sentido no quadro, há troca de contato entre os carvões e os semi-anéis. Logo, fora da espira, a corrente é contínua.

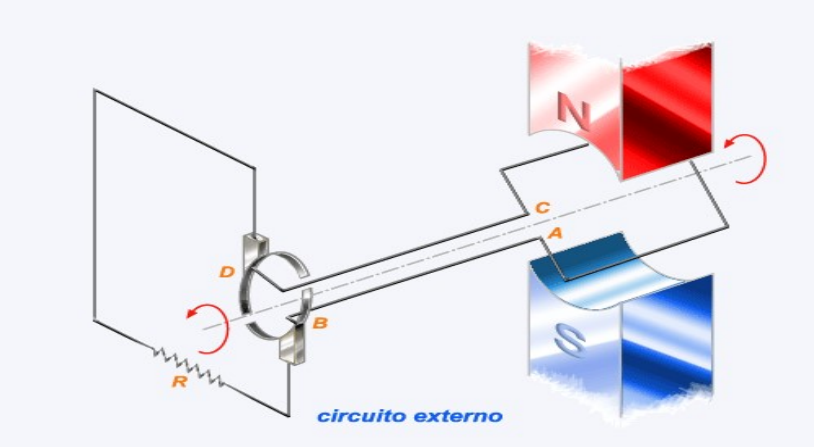


Figura II: Coletor de corrente contínua.

Bibliografia:

http://efisica.if.usp.br/eletricidade/basico/inducao/dinamos/

5.4 Antiferromagnéticos

Nos materiais antiferromagnéticos os momentos magnéticos se alinham em direções contrárias aos seus visinhos, onde estes acabam se anulando uns aos outros e, como consequência, o material não apresenta momento magnético resultante, ou seja, se for aplicado um campo magnético externo sobre o material, este não se magnetizará. Esta disposição dos momentos magnéticos esta representada na Figura 5.7.

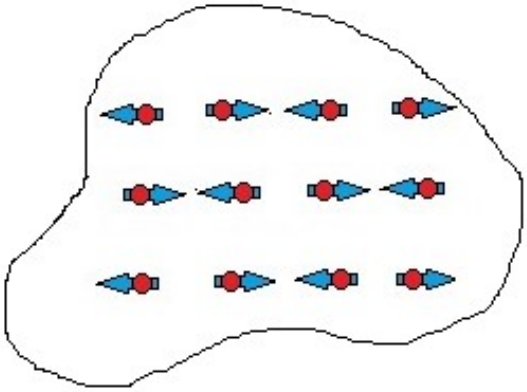


Figura 5.7: Configuração dos momentos magnéticos distribuídos em um material antiferromagnético.

5.4.1 Temperatura de Néel

Quando os materiais antiferromagnéticos atingem uma determinada temperatura, estes se tornam paramagnéticos. Esta temperatura limite é denominada de temperatura de Néel ou ponto de Néel, a Tabela 5.4 relaciona alguns materiais antiferromagnéticos e suas respectivas temperaturas de Néel.

Tabela 5.4: Ponto de Néel de alguns materiais antiferromagnéticos.

Material Antiferromagnético	*Ponto de Néel (°C)*
Crômio	*39*
Manganês	*−173*

Texto 4

Memória antiferromagnética nasce para revolucionar armazenamento de dados.

Memória ultra-rápida

Cada vez mais se tem a necessidade de melhorar a eficiência das memórias digitais, neste sentido um grupo de pesquisadores da Europa e do Japão descobriu como os momentos magnéticos de spins relacionados aos materiais antiferromagnéticos podem ser controlados para criar uma memória digital extremamente rápida e diferente das memórias digitais atuais que são baseadas em materiais ferromagnéticos.

"Este trabalho demonstra o primeiro controle dos antiferromagnetos por corrente elétrica. Ele utiliza um fenômeno físico inteiramente novo e, ao fazer isso, demonstra o primeiro dispositivo de memória totalmente antiferromagnético. Isso pode ser extremamente significativo, já que os antiferromagnetos têm um conjunto intrigante de propriedades, incluindo um limite teórico de velocidade de comutação aproximadamente 1.000 vezes mais rápido do que as melhores tecnologias de memória atuais," disse o professor Peter Wadley, da Universidade de Nottingham, no Reino Unido.

Memória universal

O interessante dos materiais antiferromagnéticos é que eles não se magnetizam na presença de um campo externo, logo uma memória desse material teria a mesma propriedade e permitiria uma maior densidade de armazenamento, visto que os elementos poderiam ficar mais agrupados no interior do chip.

A expectativa é de uma memória que consuma menos energia, tenha maior velocidade e que consequentemente torne os computadores mais eficientes.

Se estas previsões se confirmarem, provavelmente as memórias antiferromagnéticas tenderam a substituir as memórias utilizadas atualmente na computação e consequentemente se tornará uma "memória universal".

Memória antiferromagnética

Para a construção da memória antiferromagnética foi utilizado um cristal, composto de cobre, manganês e arsênio (CuMnAs), em forma de filme fino (filme crescido em vácuo quase completo, uma camada atômica de cada vez) e totalmente composta de material antiferromagnético.

Neste material os momentos magnéticos podem ser controlados através de pulsos elétricos lançados através do material.

Basta uma corrente baixa para gerar um torque quântico de 90 graus sobre os momentos magnéticos, permitindo que esse material possa assumir valores, de acordo com o seu posicionamento, de 0 ou 1 (bits), a uma velocidade muito maior do que os das memórias utilizadas atualmente.

Antiferromagnetismo

Em um material antiferromagnético, o momento magnético de cada átomo possui sentido contrário aos momentos magnéticos dos átomos vizinhos, fazendo com que esse material não apresente magnetização na presença de um campo externo. Isso possibilita com que linhas de átomos possam ser colocadas muito mais próximas, sem que ocorra interferência magnética entre si.

Bibliografia:

http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=memoria-antiferromagnetica&id=010150160122#.WbIxg8iGPIU

Texto 5

Conhecendo a Magnetorresistência Gigante

Os cientistas Albert Fert (francês) e Peter Gruenberg (alemão), respectivamente em seus laboratórios e de forma independente descobriram o fenômeno chamado de Magnetorresistência gigante (MRG). Por essa descoberta foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física de 2007. Destaca-se a participação do brasileiro Mário Norberto Baibich, que encabeçou a lista dos nove pesquisadores que assinaram o artigo referente à MRG da equipe de Fert.

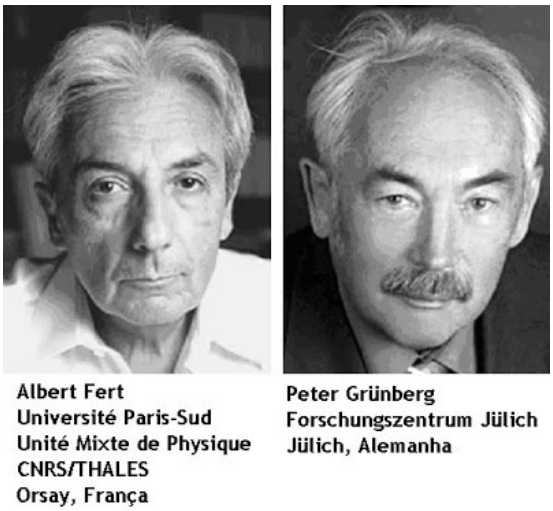


Figura 1: Ganhadores do Prêmio Nobel de Física de 2007 pela descoberta da Magnetorresistência Gigante. Fonte: https://sites.unicentro.br/wp/petfisica/atividades/nobel-em-fisica/2006-2015/

Para a descoberta da MRG, as equipes buscavam determinar as propriedades de filmes finos de múltiplas camadas de diferentes materiais. No caso em questão, os pesquisadores estavam intercalando finíssimas camadas de material ferromagnético (material magnético) e de material diamagnético (não-magnético).

A MRG foi descoberta quando os físicos fizeram três camadas em um filme fino, agrupadas uma sobre a outra. Sendo a primeira de material magnético, a segunda era de material não magnético, e a terceira era do mesmo material magnético da primeira.

Quando a primeira e a terceira camada possuem domínios magnéticos orientados para o mesmo sentido, como na Figura 2. Elétrons cujos momentos magnéticos de spin tenham a mesma orientação conseguem passar por essa camada com pouca dificuldade (resistência). Isto é, para esses elétrons alinhados, a resistência elétrica é pequena, pois a possibilidade de serem impedidos pela rede é pequena. Mas, se a terceira camada tiver domínios magnéticos com sentido contrário, os elétrons serão "espalhados" e não passarão por ela, sofrendo uma grande resistência. A diferença proporcional entre essas resistências (grande e pequena) é a chamada MRG. A figura 2 traz uma representação simplificada desse fenômeno.

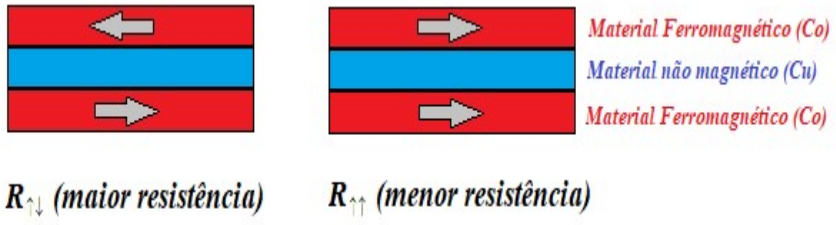


Figura 2: Orientação dos domínios magnéticos nos materiais magnéticos e a sua resistência elétrica.

Para se obter o alinhamento dos domínios magnéticos das camadas. É necessário apenas um campo magnético que não necessariamente necessita ser muito forte. Pode ser, por exemplo, o campo dos pequenos ímãs de uma trilha magnética de um disco rígido (HD). A questão fundamental era como se obter camadas com direções magnéticas alternadas?

Uma das descobertas feitas pelos pesquisadores foi que em certas espessuras das camadas os ímãs microscópicos preferem se alinhar, de forma natural, em sentidos opostos. Sendo que esse é um efeito quântico que tem a ver com as propriedades de materiais quando as dimensões, no caso das camadas, são muito pequenas. O que foi verificado é que quando as espessuras são corretas, acontece o chamado "acoplamento antiferromagnético". Isto é, os momentos magnéticos se alinham de forma antiparalela nas camadas, sem necessitar de um campo magnético externo.

O material magnético normalmente utilizado nas camadas e o cobalto (Co). Já a camada não magnética pode ser de cobre (Cu). Foi descoberto que, quando a espessura das camadas de cobalto é de 11 Angstrons (1 Angstrom = 10^{-8} cm) e a camada intermediária de cobre tem espessura de 9 Angstrons, a resistência à passagem de elétrons é máxima. Esse é o efeito denominado de Magnetorresistência Gigante.

Quando é aplicado um campo magnético externo os momentos magnéticos das camadas ferromagnéticas são forçados a se orientarem fazendo com que a resistência caia para um valor mínimo.

Note que uma espessura de 9 Angstrons é muito pequena - um átomo de cobre mede cerca de 3 Angstrons.

Devido às pequenas dimensões, essas estruturas podem ser usadas em cabeçotes de leitura dos HD's. Quando o dispositivo de leitura passa sobre os bits gravados, capta o campo magnético emitido por eles, resultando em uma corrente elétrica, que é posteriormente registrada pelo computador. Esta corrente é interpretada como uma sequência de bits 1 e 0, que formam os diferentes arquivos gravados no disco rígido.

O dispositivo de leitura é protegido por um escudo eletromagnético, que faz com que ele capte apenas o campo magnético do bit que está sendo lido, e não dos seguintes. Lembre que as dimensões dos componentes mostrados na Figura 3 são extremamente minúsculas.

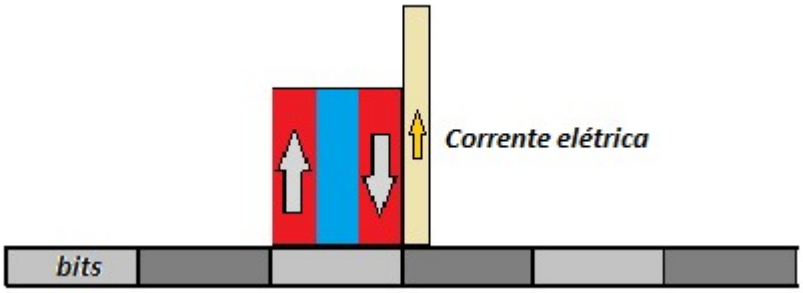


Figura 3: Configuração de um dispositivo de leitura de um disco rígido (HD).

Bibliografia:

http://www.seara.ufc.br/tintim/tecnologia/mrg/mrg02.htm

http://www.hardware.com.br/guias/hds/discos.html

5.5 Os Materiais Magnéticos e a Tabela Periódica

Para classificarmos os elementos químicos de acordo com os materiais magnéticos, inicialmente temos que conhecer os chamados números quânticos. Onde cada elétron de um átomo é caracterizado por quatro números quânticos, denominados: principal (n), secundário ou azimutal (l), magnético (m ou m_l) e spin (s ou m_S). Observando que em um mesmo átomo não podem existir dois elétrons com os mesmos números quânticos (princípio de exclusão de Pauli).

Onde o número quântico principal (n) indica o nível de energia do elétron, observe a tabela 5.5.

Tabela 5.5: Os níveis de energia e seus respectivos números quânticos principais.

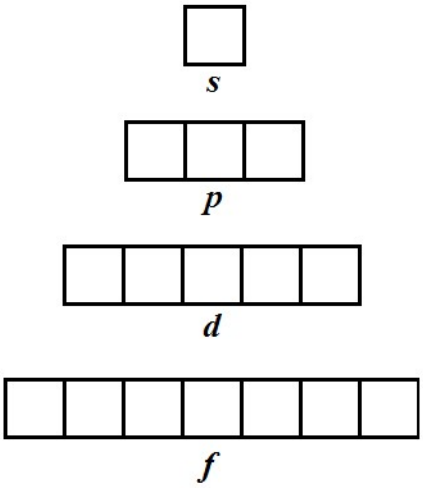
Camada ou nível de energia	*Número quântico principal (n)*
K	*1*
L	*2*
M	*3*
N	*4*
O	*5*
P	*6*
Q	*7*

O número quântico secundário indica os subníveis de energia dos elétrons, conforme a Tabela 5.6.

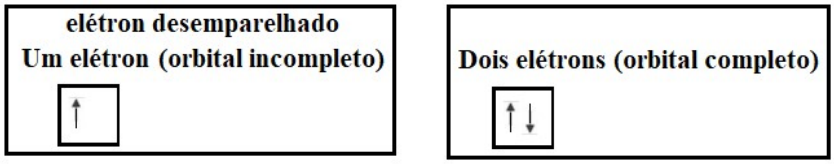
Tabela 5.6: Os subníveis de energia e seus respectivos números quânticos secundários.

Subnível de energia do elétron	*Número quântico secundário (l)*
s	*0*
p	*1*
d	*2*
f	*3*

*O número quântico magnético indica a orientação dos orbitais (região de máxima probabilidade de se encontrar o elétron no átomo) no espaço. Os orbitais são agrupados em subcamadas, designadas, como vimos, por **s, p, d** e **f.** Onde o subnível **s** possui apenas um orbital, o subnível **p** possui três orbitais, o subnível **d** possui cinco e o **f** possui sete orbitais.*



*Observe que em **cada orbital pode-se ter no máximo dois elétrons** e que cada elétron é indicado por uma seta:*



*Os orbitais são preenchidos de acordo com o aumento de sua energia. Para preencher esses orbitais, deve-se seguir a **Regra de Hund**, que diz que isso deve ser feito de modo que tenhamos o maior número possível de elétrons desemparelhados, ou seja, orbitais incompletos. Para seguirmos essa Regra devemos preencher inicialmente todos os orbitais com setas para cima e só depois voltamos preenchendo com setas para baixo.*

*Quanto ao **número quântico do spin, em uma visão clássica, é associado ao sentido de rotação do elétron.** Onde dois elétrons num mesmo orbital anulam suas propriedades magnéticas e consequentemente não contribuem para a magnetização do material. São conhecidos dois valores para o spin:*

S = +1/2** e **-1/2

Para fazermos as distribuições dos elétrons nos orbitais utilizamos, em um primeiro momento, o diagrama de Linus Pauling.

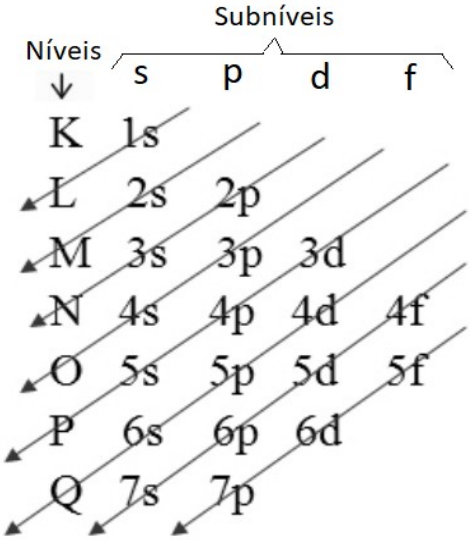
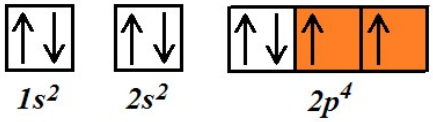


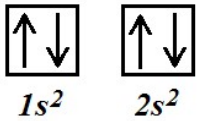
Figura 5.9: Diagrama de Linus Pauling.

Vamos fazer uma distribuição eletrônica do Oxigênio, cujo número atômico é oito e distribuir esses elétrons nos seus respectivos orbitais.



Observe que tivemos dois orbitais incompletos no subnível mais energético. Esses elétrons desemparelhados contribuem para a uma possível magnetização desse elemento. Essa contribuição dos spins desses elétrons caracteriza o oxigênio como um material ***paramagnético.***

Observe o exemplo do Berílio cujo número atômico é quatro.



Note que agora o subnível mais energético está completo, fazendo com que os momentos magnéticos relacionados aos spins dos elétrons, no mesmo orbital, se cancelem, portanto estes não contribuem para uma possível magnetização desse elemento, caracterizando-o como um material ***diamagnético.***

Resumindo!

Os elementos da tabela periódica que apresentarem elétrons desemparelhados, nos subníveis de maior energia, são classificados como paramagnéticos.

Os elementos que apresentarem orbitais completos, nos subníveis de maior energia, são classificados como diamagnéticos.

Um erro comum é realizar a distribuição eletrônica de forma incorreta, pois, não se pode confiar plenamente no diagrama Linus Pauling visto que este falha em muitos casos.

Os elementos químicos a seguir não obedecem à distribuição eletrônica segundo o diagrama de Pauling:

$_{24}Cr$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^1, 3d^5$

$_{29}Cu$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^1, 3d^{10}$

$_{41}Nb$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^1, 4d^4$

$_{42}Mo$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^1, 4d^5$

$_{47}Ag$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^1, 4d^{10}$

$_{79}Au$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^2, 4d^{10}, 5p^6, 6s^1, 4f^{14}, 5d^{10}$

$_{78}Pt$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^2, 4d^{10}, 5p^6, 6s^1, 4f^{14}, 5d^9$

$_{92}U$: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^2, 3d^{10}, 4p^6, 5s^2, 4d^{10}, 5p^6, 6s^2, 4f^{14}, 5d^{10}, 6p^6, 7s^2, 5f^3, 6d^1$

Ainda se tem o Rutênio, o Ródio e o Paládio. Além de um grande número de Lantanídeos e Actinídeos onde o diagrama de Pauling, falha.

Para evitar esses erros, podemos utilizar outro diagrama conhecido como diagrama de ***Rich-Suter****, que leva em consideração os efeitos de penetração e blindagem dos elétrons que contribuem para uma variação da energia dos orbitais, observando que este diagrama tem dificuldades de determinar a distribuição dos elementos Cério (Ce), Protactínio (Pa), Urânio (U), Neptúnio (Np) e Cúrio (Cm), pelo fato de possuírem configurações decorrente da mistura de varias configurações eletrônicas.*

Observe os diagramas de Rich-Suter nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

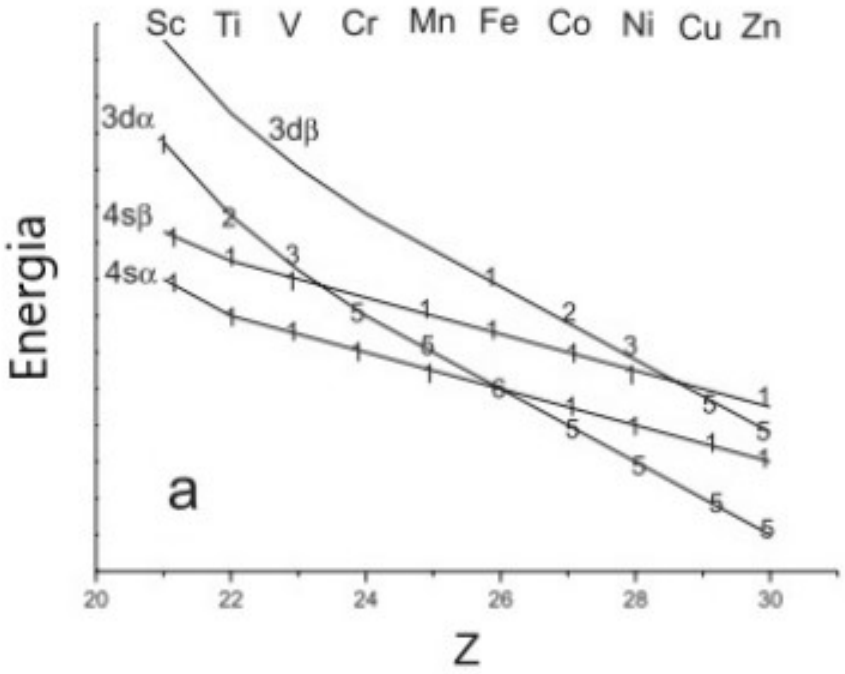


Figura 5.10: Diagrama de Rich-Suter: 1ª série metais de transição.
Fonte: Orofino (2013).

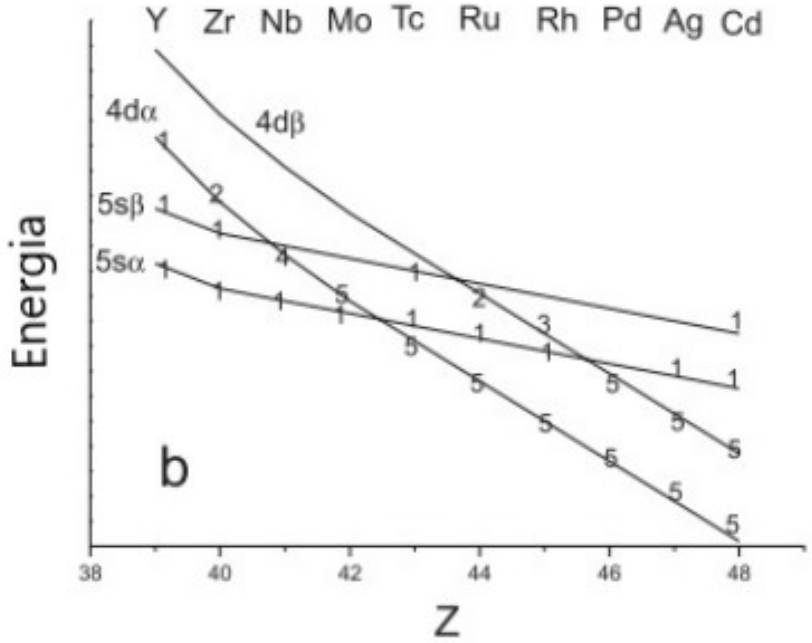


Figura 5.11: Diagrama de Rich-Suter: 2ª série metais de transição.
Fonte: Orofino (2013).

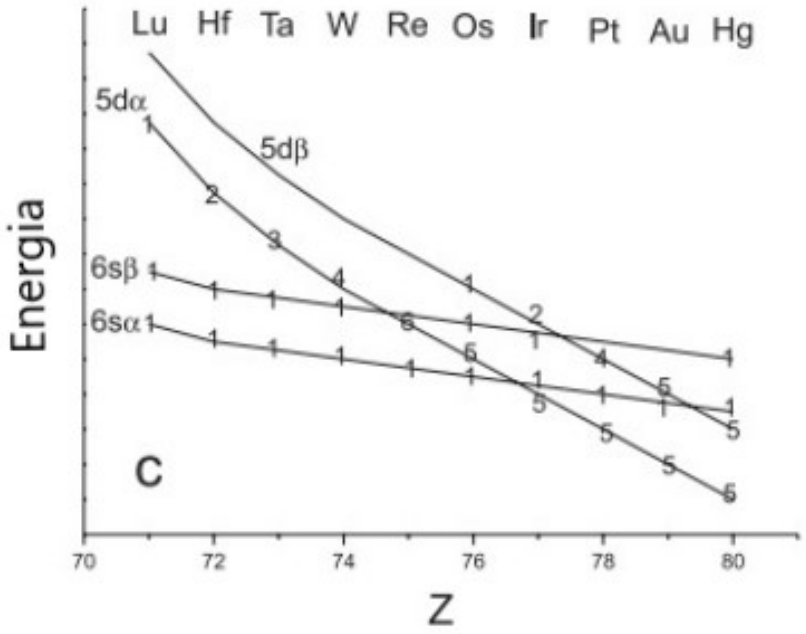


Figura 5.12: Diagrama de Rich-Suter: 3ª série metais de transição.
Fonte: Orofino (2013).

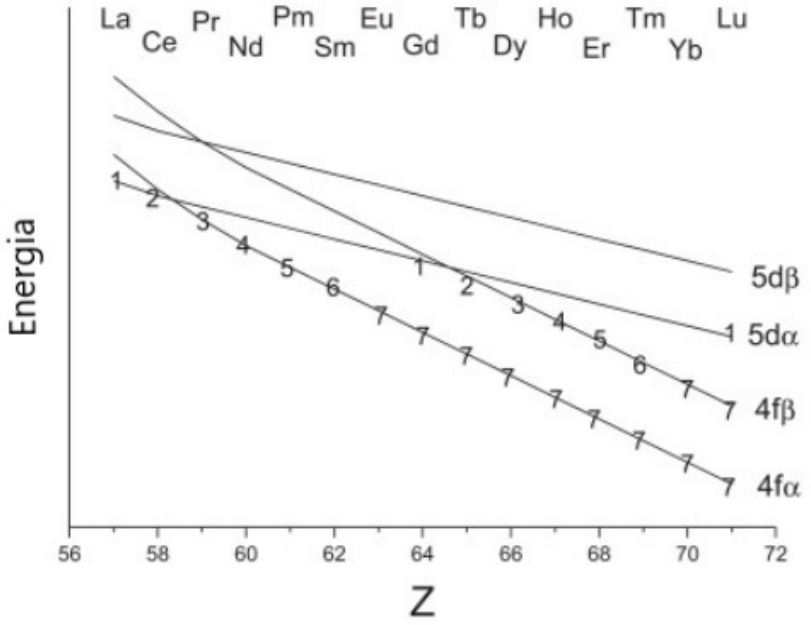


Figura 5.13: Diagrama de Rich-Suter: Lantanídeos. Sendo que a configuração eletrônica do Ce não é a correta.
Fonte: Orofino (2013).

Observe que os diagramas relacionam o número atômico (Z) com a energia, sendo que cada curva representa a energia dos orbitais.

Esses gráficos trazem também de novidade, em relação ao diagrama de Pauling, a energia dos elétrons de spins contrários que não são a mesma, logo tem uma energia para spins +1/2 (α) e outra para spins -1/2 (β) no mesmo orbital.

Vamos agora aprender como utilizá-los. Para isso, vamos escolher como exemplo o elemento químico Cromo (Cr), um dos elementos químicos que não obedecem a distribuição eletrônica segundo Pauling, e a partir da sua distribuição classificá-lo em diamagnético ou paramagnético.

Inicialmente vamos observar o diagrama de Rich-Suter em que temos o Cromo.

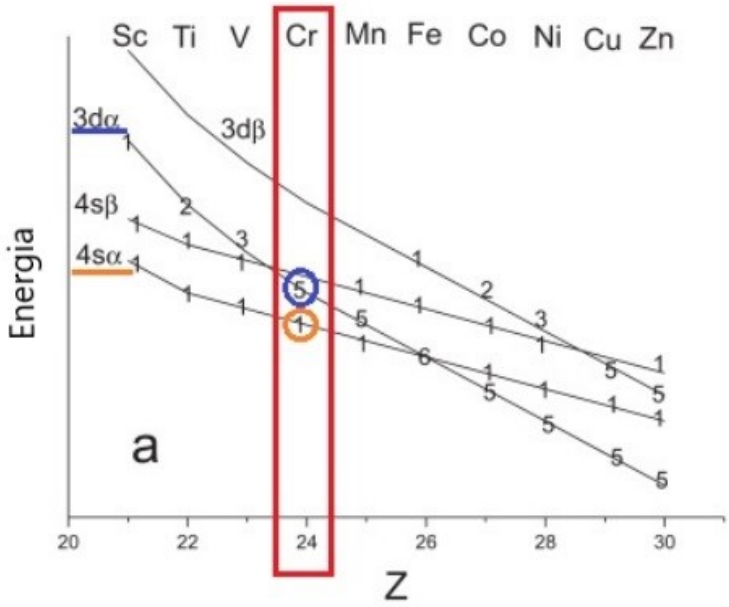
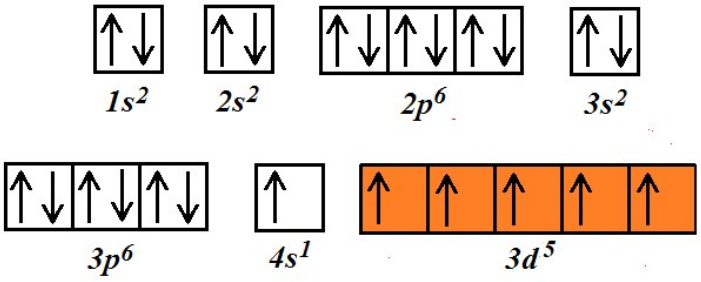


Figura 5.14: Identificação dos pontos de energia dos orbitais dos subníveis 4s e 3d do Cromo.
Fonte: Orofino (2013).

*Seguindo a ordem crescente de energia teremos a sequência **4sα, 3dα, 4sβ** e **3dβ.** Onde o cromo possui um total de 6 elétrons a serem distribuídos nos orbitais 4s e 3d, observa-se que o **4sα** que suporta apenas um elétron de spin +1/2 que é representado por uma seta para cima - recebe 1 elétron, **3dα** que suporta até 5 elétron de spin +1/2 (setas para cima) - recebe 5 elétrons, observe que já foram distribuídos os 6 elétrons, assim os orbitais **4sβ** e o **3dβ** que receberiam elétrons de spins -1/2 (setas para baixo) ficaram vazios. Portanto, tem-se ao final, **$4s^1$ $3d^5$**. Ficando a distribuição eletrônica do cromo:*

$_{24}$ *Cr: $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$, $3p^6$,* ***$4s^1$, $3d^5$***



Como o subnível mais energético ***(3d)*** *possui orbitais incompletos (elétrons desemparelhados), podemos classificar o Cromo como um material* ***paramagnético****.*

Vamos agora pegar como exemplo o Cobre (Cu). Observe o diagrama a seguir:

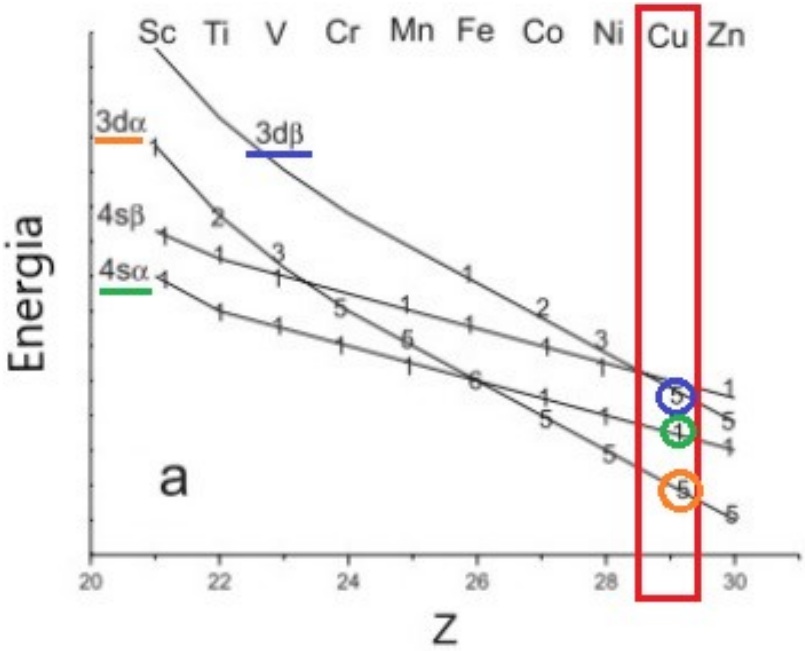
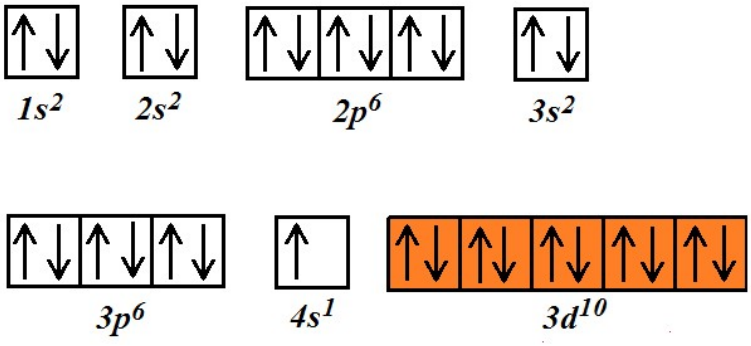


Figura 5.15: Identificação dos pontos de energia dos orbitais dos subníveis 4s e 3d do Cobre.
Fonte: Orofino (2013).

Em ordem crescente de energia temos a sequência ***3dα, 4sα e 3dβ****, sendo que no subnível* ***4s (4sα)*** *temos 1 elétron e no subnível* ***3d (3dα e 3dβ)*** *temos 10 elétrons, ficando ao final com a configuração* $4s^1 3d^{10}$*. Logo a distribuição eletrônica fica:*

$_{29}$ *Cu:* $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^6, 4s^1, 3d^{10}$



*Como o subnível mais energético (**3d**) possuem todos os orbitais completos, classificamos o Cobre como um material **diamagnético.***

Bibliografia

- BARRETO, P. G., Estudo do Fenômeno de Exchange bias em Tricamadas NiFe/FeMn/Co. Tese de Doutorado, CBPF, Rio de Janeiro. 2014.

- CALLISTER, JR., WILLIAM D., Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. Editora LTC, Rio de Janeiro, 7a. Ed., 2008.

- CARVALHO, F. Química Geral. IFES, Santa Teresa, 2010.

- DUARTE, H. A. Carga nuclear efetiva e estrutura eletrônica dos átomos. Química Nova na Escola, N◦ 17, maio 2003, p. 22-26.

- GRAÇA, C., Eletromagnetismo. Série Didática Física 3, Rio Grande do Sul, 1a. Ed., 2012.

- GUALTER, NEWTON, HELOU, Física 3. Editora Saraiva, São Paulo, 1a. Ed., 2010.

- L. M. Fallicov. Metallic Magnetic Superlattices. Physics Today, 45, 46, 1992.

- OROFINO, H., MACHADO, S. P., FARIA, R. B. The Use of Rich and Suter Diagrams to Explain the Electron Configurations of Transition Elements. Química Nova, Nº 6, maio 2013, p. 894-896.

- P. J. Grundy, D. Greig and E. W. Hill. Multilayered magnetic materials, Endeavour, 17, 154, 1993.

- RAMALHO, J. F., NICOLAU, G., TOLEDO, P. A., Os Fundamentos da Física 3. Editora Moderna, São Paulo, 8a. Ed., 2003.

- RIBEIRO, G. A. P. As Propriedades Magnéticas da Matéria: um Primeiro Contato. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 3, Setembro, 2000.

- SANTOS, J. Análise sobre diferentes abordagens de configuração eletrônica de elementos apresentados em livros de química. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2011.

- SHRIVER, D. F., ATKINS, P. Complexos dos metais do bloco d: estrutura eletrônica e espectro. Editora Bookman, Porto Alegre, 4a. Ed., 2008.

- YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A., Sears e Zemansky Física III: Eletromagnetismo. Editora Addison Wesley, São Paulo, 12a. Ed., 2009a.