

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP**

**Instituto de Física Gleb Wataghin - IFGW**

F 609 – Tópicos de Ensino de Física I

Coordenador: José Joaquim Lunazzi ([lunazzi@ifi.unicamp.br](mailto:lunazzi@ifi.unicamp.br))

## **Quase - Levitação Magnética do Disco de Newton e Experimento sobre Leis de Faraday e Lenz**



Aluno / RA: Mayara Maria Beltani Auricchio / 094217 ([mayauricchio@hotmail.com](mailto:mayauricchio@hotmail.com))

Orientador: Eliermes Arraes Meneses ([elieres@ifi.unicamp.br](mailto:elieres@ifi.unicamp.br))

13 de junho de 2012

# ÍNDICE

1. RESUMO.....	3
2. INTRODUÇÃO.....	3
3. TEORIA .....	4
3.1. TIPOS DE ÍMÃS .....	4
3.2. MAGNETISMO .....	6
3.2.1. CAMPO MAGNÉTICO.....	6
3.2.1.1. FORÇA EXERCIDA POR UM CAMPO MAGNÉTICO .....	7
3.2.1.2. LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO .....	8
3.2.2. LEI DE GAUSS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS.....	9
3.2.3. FORÇA MAGNÉTICA SOBRE UM FIO COM CORRENTE .....	10
3.2.4. TORQUE EM ESPIRA COM CORRENTE .....	11
3.2.5. LEI DE FARADAY .....	12
3.2.6. LEI DE LENZ .....	13
3.3. MECÂNICA .....	15
3.3.1. MOMENTO DE INÉRCIA.....	15
3.3.2. TORQUE .....	16
3.3.3. MOMENTO ANGULAR.....	17
3.3.4. CONSERVAÇÃO DO MOMENTO ANGULAR.....	17
3.4. ÓTICA .....	19
3.4.1. DISCO DE NEWTON .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	20
5. RESULTADOS.....	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
7. COMENTÁRIO DO ORIENTADOR.....	30

## **1. RESUMO**

O projeto tem como base os fundamentos do eletromagnetismo, no que se refere ao estudo de campo magnético, seus reflexos na aplicação tecnológica e no aprendizado dos efeitos magnéticos ao nível colegial. Efeitos esses que vão desde o conceito de campo magnético, passando por forças magnéticas sobre espiras de corrente, até a lei de Faraday e suas aplicações. O projeto, em questão, tem a finalidade de fazer levitar um disco de Newton através de seu eixo central com o auxílio de campos magnéticos criados com ímãs permanentes. Esses ímãs farão partes em um dispositivo onde será mostrada a levitação do disco por efeito magnético. Ainda, utilizando-se deste dispositivo com alguns complementos será demonstrado experimentalmente o torque sobre espira de corrente e a Lei de Faraday, comumente chamada lei da indução magnética.

## **2. INTRODUÇÃO**

Tales de Mileto é a primeira referência do Magnetismo. Segundo ele, os habitantes da Magnésia, região da Grécia, conheciam um mineral que tinha a propriedade de atrair pedaços de ferro ou do mesmo mineral. Documentos chineses sugerem que o magnetismo já era conhecido por volta de 2000 a.C. Os gregos antigos observaram fenômenos elétricos e magnéticos possivelmente por volta de 700 a.C. À existência de forças magnéticas foi conhecida a partir das observações de que as partes de uma pedra natural chamada magnetita eram atraídas pelo ferro.

Em 1600 o inglês William Gilbert descobriu que a eletrificação não estava limitada ao âmbar, mas era um fenômeno geral. Apenas na primeira parte do século XIX os cientistas estabeleceram que a eletricidade e o magnetismo são fenômenos relacionados. Em 1820, Hans Oersted descobriu que uma agulha de bússola, que é magnética, é desviada quando é colocada perto de uma corrente elétrica.

Em 1831, Michael Faraday na Inglaterra e quase simultaneamente, Joseph Henry nos Estados Unidos mostraram que, quando se move um fio condutor perto de um ímã (ou, de maneira equivalente, quando o ímã é movido perto de um fio condutor), uma corrente elétrica é observada no fio. Em 1873, James Clerk Maxwell baseou-se nessas observações e em outros fatos experimentais para formular as leis do eletromagnetismo

do ponto de vista matemático como as conhecemos hoje as chamadas equações de Maxwell.

Além do conceito de magnetismo, temos também o conceito de óptica. O físico Isaac Newton nasceu em 4 de janeiro de 1643, em Londres, capital inglesa. A parte de óptica desenvolvida por Newton foi publicada em 1704 e revista em 1717. Nos seus relatos têm os resultados sobre a decomposição espectral da luz branca e observações de efeitos ondulatórios, como os anéis de Newton, incluindo determinações precisas de comprimentos de onda.

### **3. TEORIA**

#### **3.1. TIPOS DE ÍMÃS**

O ímã, também conhecido como magneto, é uma substância que possui a capacidade de atrair substâncias magnéticas (ferro ou outros metais). Os ímãs podem ser classificados a partir da duração de seu campo magnético, como permanente ou temporal, e de acordo com a sua natureza, natural ou artificial.

- Ímã natural: encontrado na natureza e composto por minério de ferro (óxido de ferro). Este tipo de ferro magnético é denominado magnetita.

- Ímã artificial: ferromagnético submetido a um intenso campo magnético. Ao atritá-lo com um ímã natural ou pela ação de corrente (eletroímã) adquire propriedade magnética. A capacidade magnética deste ímã pode superar a do ímã natural.

- Ímã temporal: temporariamente magnetizado por uma fonte de ondas eletromagnéticas. O ímã temporário se comporta como um ímã permanente quando está dentro de um campo magnético forte. Esses ímãs são feitos com materiais paramagnéticos (normalmente ferro com baixo teor de carbono); por isso que, quando o campo magnético é removido, o ímã perde rapidamente o magnetismo.

- Ímã permanente: formado por aço magnetizado (ferro com alto teor de carbono), a fim de manter permanentemente seu poder magnético. Em alguns casos, pode ser utilizado para sua composição o alnico (liga de ferro, alumínio, níquel e cobalto) ou ferrite (cerâmica). No entanto, uma forte descarga elétrica, um impacto de grande magnitude, ou uma aplicação de uma elevada quantidade de calor pode causar perda da magnetização do ímã. A alta temperatura, o ímã permanente perde seu magnetismo temporariamente, readquirindo quando resfriado.

De qualquer modo, independente da maneira de se produzir um campo magnético, na verdade temos sempre um dipolo magnético. Convém ressaltar ainda que, para aplicações onde serão necessários campos intensos, utilizam-se eletroímãs fabricados com bobinas supercondutoras.

No dispositivo a ser usado neste experimento serão utilizados ímãs de Neodímio, cuja fabricação é feita a partir de uma combinação de neodímio, ferro e boro —  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , o qual entrou no mercado em 1980. Essa fabricação é feita através da compactação de ligas pulverizadas, possuem as melhores propriedades de todos já existentes, têm uma incrível relação indução/peso e são materiais magnéticos bastante poderosos e modernos. Este tipo de ímã é muito poderoso em comparação com a sua massa, mas também é mecanicamente frágil e perde seu magnetismo em temperaturas entre  $70^\circ\text{C}$  e  $180^\circ\text{C}$ .

Na Tabela 1, estão representadas as propriedades magnéticas de diferentes tipos de ímãs, tais como: neodímio ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ), samário-cobalto ( $\text{SmCo}$ ), Alnico (liga de Fe/Al/Ni/Co) e ferrite (cerâmica).

Tabela 1: Dados das propriedades magnéticas dos ímãs

<b>Materiais</b>	<b>Br</b>	<b>Hc</b>	<b>BHmax</b>	<b>Tcoef Br</b>	<b>Tmax</b>	<b>Tcurie</b>
<b><math>\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}</math></b>	12,800	12,300	40	-0.12	150	310
<b>SmCo</b>	10,500	9,200	26	-0.04	300	750
<b>Alnico</b>	12,500	640	5.5	-0.02	540	860
<b>Ferrite</b>	3,900	3,200	3.5	-0.20	300	460

Legenda:

Br: medida de densidade magnética residual do fluxo em Gauss, que é o fluxo máximo que o ímã pode produzir [G].

Hc: medida de indução magnética de um ímã [79,6A.m].

BHmax: termo da densidade total de energia. Quanto mais elevado o número, mais poderoso o ímã.

Tcoef Br: coeficiente da temperatura do Br. Define a alteração de fluxo magnético em relação à temperatura [% por grau centígrado].

Por exemplo: -0.20 significa que, se a temperatura aumentar 100 graus centígrados, o fluxo magnético diminuirá 20%.

Tmax: temperatura máxima em que o ímã deve funcionar. Se a temperatura exceder este valor, o ímã perde as características magnéticas, mas recupera após a temperatura estar dentro dos níveis de funcionamento [graus centígrados].

Tcurie: temperatura em que o ímã ficará desmagnetizado. Se a temperatura exceder este valor, o ímã perde as características que não recupera após a temperatura estar dentro dos níveis de funcionamento [graus centígrados].

A partir dos dados obtidos na Tabela 1, ao comparar o ímã de neodímio com os demais, é possível concluir que: o ímã de neodímio produz o maior fluxo magnético, possui a maior indução magnética e é o mais poderoso devido a densidade total de energia.

## **3.2. MAGNETISMO**

### **3.2.1. CAMPO MAGNÉTICO**

Já que o campo elétrico é produzido por cargas elétricas, seria natural que o campo magnético fosse produzido por cargas magnéticas. Entretanto, embora a existência de cargas magnéticas (conhecidas como monopolos magnéticos) seja prevista em algumas teorias, essas cargas até hoje não foram observadas experimentalmente. Como são produzidos então os campos magnéticos? Os campos magnéticos podem ser produzidos de duas formas.

A primeira forma é usar partículas eletricamente carregadas em movimento, como uma corrente elétrica em um fio, para fabricar um eletroímã (uma bobina helicoidal, geralmente com um núcleo de ferro, que atua como um ímã permanente quando percorrida por uma corrente). A corrente produz um campo magnético que pode ser usado, por exemplo, para controlar o disco rígido de um computador ou para transportar sucata de um lugar para outro.

A outra forma de produzir campos magnéticos é usar partículas elementares, como os elétrons, que possuem um campo magnético intrínseco. O campo magnético é uma propriedade básica de muitas partículas elementares, do mesmo modo como a massa e a carga elétrica (quando existe) são propriedades básicas. Em certos materiais os campos magnéticos dos elétrons se combinam para produzir um campo magnético

nas vizinhanças do material. Esta combinação é o motivo pelo qual um ímã permanente, usado no experimento em questão, possui um campo magnético permanente.

### 3.2.1.1. FORÇA EXERCIDA POR UM CAMPO MAGNÉTICO

A existência de um campo magnético em uma dada região pode ser demonstrada com uma agulha de bússola, a qual se alinhará na direção do campo. Por outro lado, quando uma partícula carregada com carga  $q$  e velocidade  $v$  entra em uma região onde existe um campo magnético  $B$ , ela é desviada transversalmente de sua trajetória sob a ação de uma força magnética que é proporcional à carga da partícula, à sua velocidade, à intensidade do campo magnético e ao seno do ângulo entre a direção da velocidade da partícula e a direção do campo. Surpreendente ainda é o fato de que esta força, chamada de Força de Lorentz, é perpendicular tanto à velocidade quanto ao campo magnético.

$$F = qvB \sin\theta \quad (1)$$

$$F = qv \times B \quad (2)$$

Onde  $\theta$  é o ângulo entre as direções da velocidade  $v$  e do campo magnético  $B$ . Para determinar o sentido da força  $F$ , utiliza-se a regra da mão direita, como mostrado na Figura 1. Se a partícula  $q$  é positiva, a força  $F$  tem o mesmo sentido de  $v \times B$ . Se a partícula é negativa, a força  $F$  tem o sentido oposto ao de  $v \times B$ .

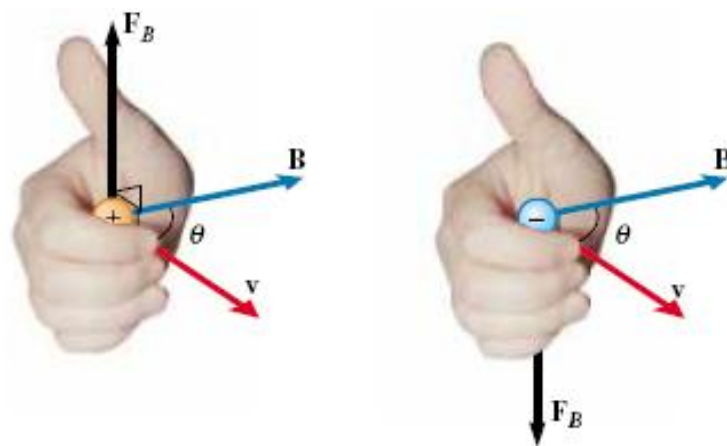


Figura 1: Regra da mão direita para campo magnético.

A partir da equação (1), define-se o vetor Indução Magnética  $B$ , como mostrado na equação abaixo:

$$B = \frac{F}{q v \sin\theta} \quad (3)$$

### 3.2.1.2. LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO

Como no caso do campo elétrico, o campo magnético pode ser representado através de linhas de campo. As regras são: a direção da tangente a uma linha de campo magnético em qualquer ponto fornece a direção de  $B$ , quanto mais intenso o campo, mais próximas estão as linhas, e vice-versa.

Na Figura 2, estão representadas as linhas de campo magnético nas proximidades de um ímã em forma de barra. Todas as linhas passam pelo interior do ímã e formam curvas fechadas (mesmo as que não parecem formar curvas fechadas na Figura). O campo magnético externo é mais intenso perto das extremidades do ímã, o que se reflete em um menor espaçamento das linhas.

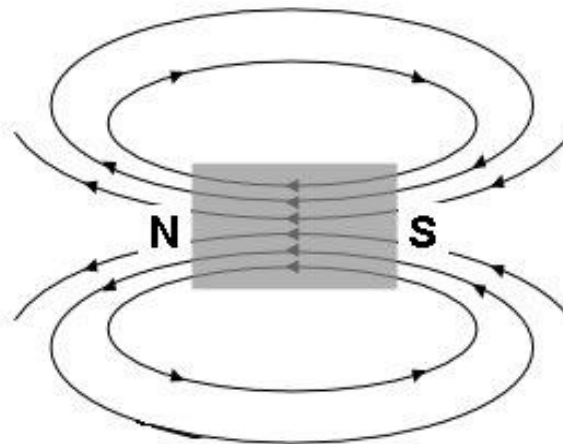


Figura 2: Linhas de campo em um ímã.

As linhas de campo entram no ímã por uma das extremidades e saem pela outra. A extremidade pela qual as linhas saem é chamada de pólo norte do ímã; a outra extremidade, pela qual as linhas entram, recebe o nome de pólo sul. Como o ímã tem dois pólos, dizemos que possui um dipolo magnético. Seja qual for a forma dos ímãs, quando colocamos dois ímãs próximos um do outro, observa-se que: Pólos magnéticos de nomes diferentes se atraem e pólos magnéticos do mesmo nome se repelem, como mostrado na Figura 3:



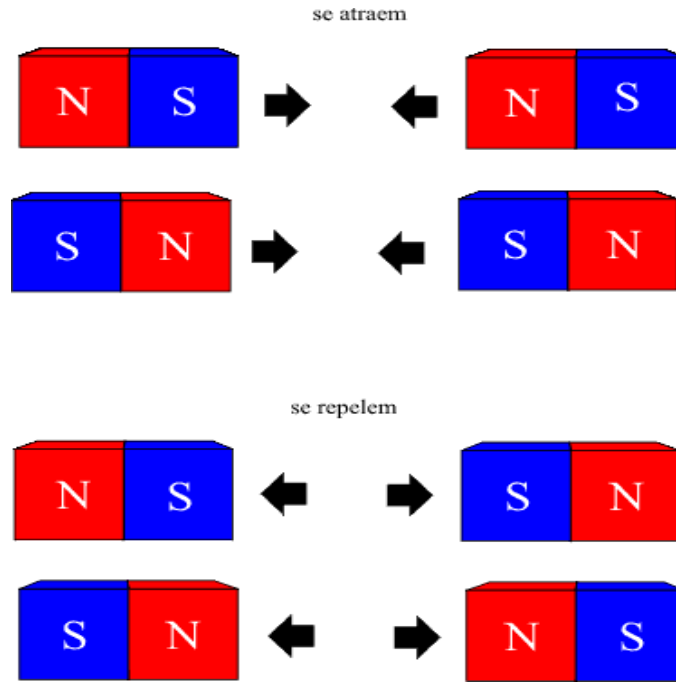


Figura 3: Forças entre dipolos magnéticos de um ímã.

### 3.2.2. LEI DE GAUSS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS

Suponha que um ímã em forma de barra seja partido em vários pedaços, como mostrado na Figura 4. É natural esperar que, com isso fossem produzidos pólos magnéticos isolados, ou seja, monopolos magnéticos. Entretanto, isso jamais acontece, mesmo que o ímã seja separado em fragmentos do tamanho de átomos e os átomos sejam separados em núcleos e elétrons.

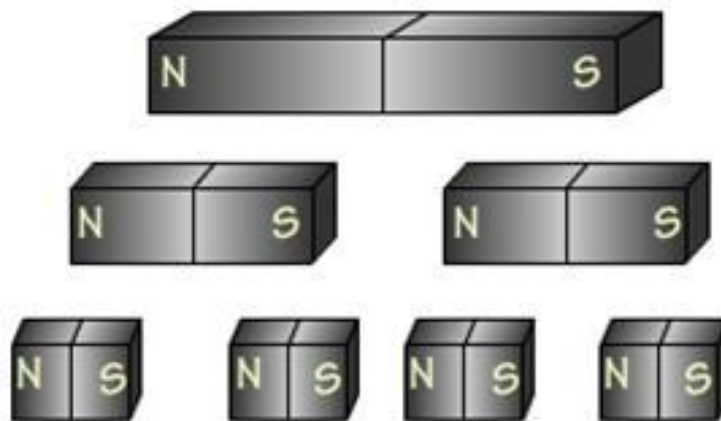


Figura 4: Divisão de um ímã.

Na verdade, todos os fragmentos assim obtidos possuem um pólo norte e um pólo sul. A lei de Gauss para campos magnéticos é um modo formal de afirmar que os monopolos magnéticos não existem. De acordo com essa lei, o fluxo magnético  $\phi$  através de qualquer superfície gaussiana fechada é zero:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (4)$$

A superfície não pode envolver uma “carga magnética” (monopolo magnético), já que essa entidade não existe. A estrutura magnética que pode existir e, portanto, pode ser envolvida por uma superfície gaussiana é o dipolo magnético, que contém tanto uma fonte como um dreno para as linhas de campo. Assim, o fluxo para fora da superfície é necessariamente igual ao fluxo para dentro da superfície, e o fluxo total é sempre zero.

### 3.2.3. FORÇA MAGNÉTICA SOBRE UM FIO COM CORRENTE

Considerando um condutor reto, de comprimento  $L$ , percorrido por uma corrente  $i$  em um campo magnético uniforme  $B$ , fazendo um ângulo  $\theta$  com a direção do condutor. Na Figura 5,  $dq$  é a carga transportada pela corrente  $i$ , no intervalo de tempo  $\Delta t$ , ao longo do condutor de comprimento  $L$ , tal que:

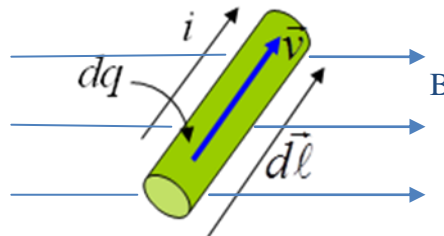


Figura 5: carga transportada pela corrente elétrica.

Como essa carga representada na Figura acima é obtida através de  $dq = i \cdot dt$ , então:

$$d\mathbf{F} = dq \mathbf{v} \times \mathbf{B} = (i dt) (d\mathbf{l}/dt \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

Na equação abaixo,  $\theta$  é o ângulo entre a direção do segmento do fio (direção da corrente) e a direção do campo magnético. A força infinitesimal sobre o fio pode ser escrita como,

$$dF = i dl B \sin \theta \quad (7)$$

As imagens da Figura 6 mostram três configurações de fios conduzindo correntes.

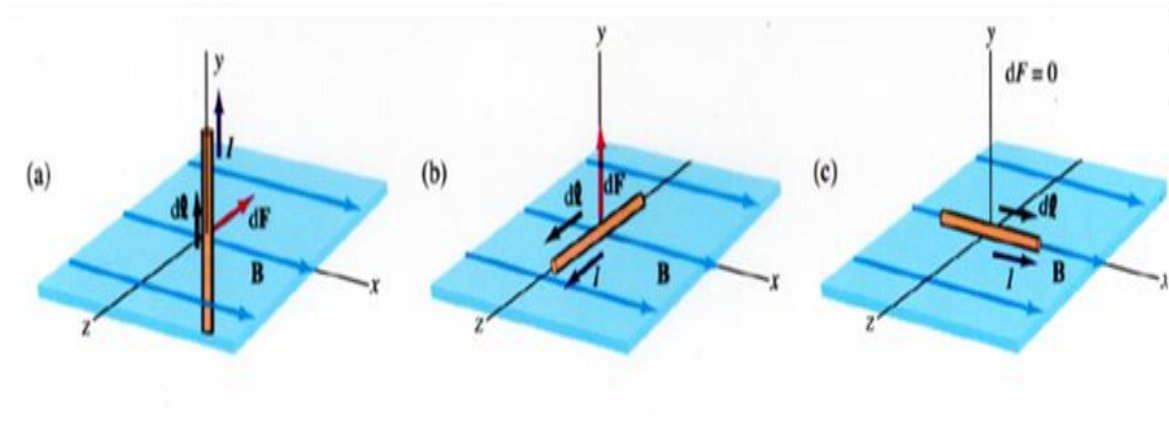


Figura 6: Fio conduzindo corrente elétrica.

Sendo assim, a força magnética sobre fios finitos com corrente pode ser calculada através de,

$$\vec{F} = i\vec{L} \times \vec{B} \quad (8)$$

### 3.2.4. TORQUE EM ESPIRA COM CORRENTE

Uma espira transportando uma corrente em um campo magnético uniforme sofre a ação de um torque que tende a girá-la. As figuras abaixo mostram as forças exercidas por um campo magnético uniforme sobre uma espira retangular cujo vetor unitário  $\hat{n}$  faz um ângulo  $\theta$  com o vetor indução magnética  $\vec{B}$ . A força líquida sobre a espira é nula. As forças  $F_1$  e  $F_3$  formam um binário, de tal modo que o torque é o mesmo em torno de qualquer ponto. Sendo assim, a partir da Figura 7, temos que  $F_2 = -F_4$  (tem mesma linha de ação) e  $F_1 = F_3 = ibB$ .

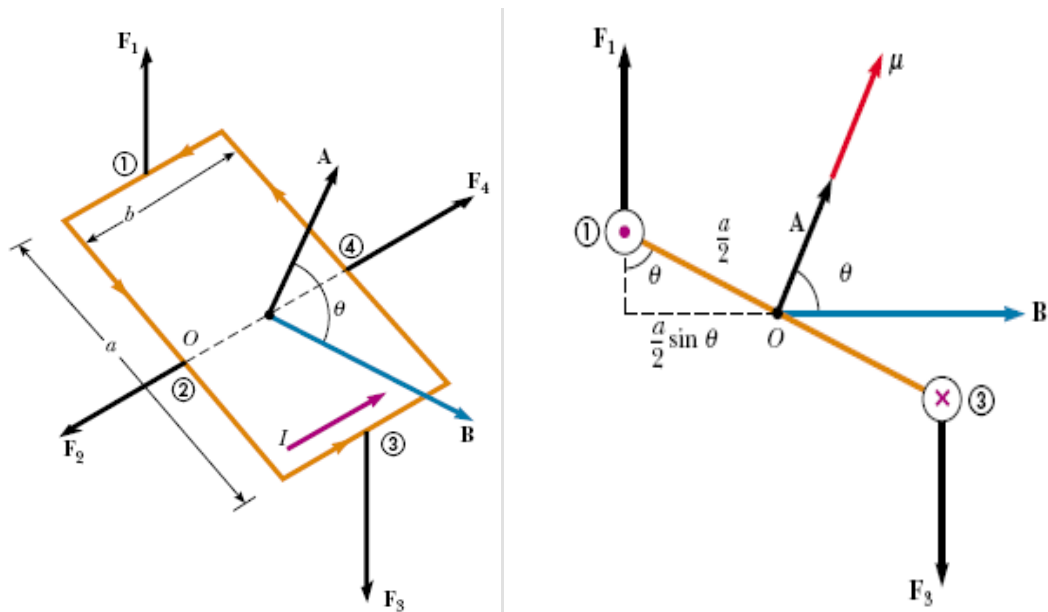


Figura 7: Torque sobre uma espira quadrada.

Antes de descrever o torque exercido sobre a bobina por um campo magnético, temos que associar um momento magnético dipolar  $\mu$  à bobina. A direção de  $\mu$  é dada pela regra da mão direita: quando os dedos da mão direita apontam na direção da corrente na bobina, o polegar estendido aponta na direção de  $\mu$ . Nas equações abaixo,  $N$  é o número de espiras da bobina,  $i$  é a corrente na bobina,  $A$  é a área limitada pelas espiras da bobina.

Torque em relação ao ponto  $O$  da Figura 7:

$$\tau = 2F_1 \frac{a}{2} \sin \theta = iaBbsen \theta \quad (9)$$

$$A = ab \Rightarrow \tau = NiABsen \theta \quad (N \text{ voltas}) \quad (10)$$

$$\mu = NiA \quad (11)$$

$$\tau = \mu \times B \quad (12)$$

### 3.2.5. LEI DE FARADAY

Aprendemos que, uma espira condutora percorrida por uma corrente  $i$  na presença de um campo magnético sofre ação de um torque: espira de corrente + campo magnético = torque. Será que, se uma espira sem corrente girar no interior de uma

região onde há um campo magnético  $B$ , aparecerá uma corrente  $i$  na espira? Isto é, torque + campo magnético = corrente?

As respostas a essas questões foram dadas por Faraday. Ele observou que o movimento relativo no conjunto ímãs e circuitos metálicos fechados faziam aparecer nestes últimos, correntes transientes.

Para aplicar a Lei de Faraday a problemas específicos precisamos relacionar as linhas de forças de campo magnético através da espira vetorialmente com a área que atravessa uma espira. Para isso, definimos um fluxo magnético: Suponha que uma espira que envolve uma área  $A$  seja submetida a um campo magnético  $B$ . nesse caso, o fluxo magnético que atravessa a espira é dado por,

$$\Phi = \int_{sup} \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (13)$$

Usando a definição de fluxo magnético, podemos enunciar a lei de Faraday de modo mais rigoroso: O módulo da força eletromotriz  $\varepsilon$  induzida em uma espira condutora é igual à taxa de variação com o tempo do fluxo magnético  $\phi_B$  que atravessa a espira.

Como vamos ver no próximo tópico, Lei de Lenz, a força eletromotriz induzida  $\varepsilon$  se opõe à variação do fluxo, de modo que, matematicamente, a lei de Faraday pode ser escrita na forma,

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (14)$$

O sinal negativo indica que a força eletromotriz deve se opor à variação do fluxo que a produziu.

### 3.2.6. LEI DE LENZ

Pouco depois de Faraday propor a lei de indução, Heinrich Friedrich Lenz inventou uma regra, hoje conhecida como lei de Lenz, para determinar o sentido da corrente induzida em uma espira: O sentido da corrente induzida é tal que o campo magnético devido a ela se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu.

A Figura 8 nos mostra que, quando o ímã se aproxima da espira, uma corrente é induzida na espira. A corrente produz outro campo magnético, cujo momento dipolar

magnético  $\mu$  está orientado de tal forma que se opõe ao movimento do ímã. Sendo assim, a corrente induzida tem o sentido anti-horário.

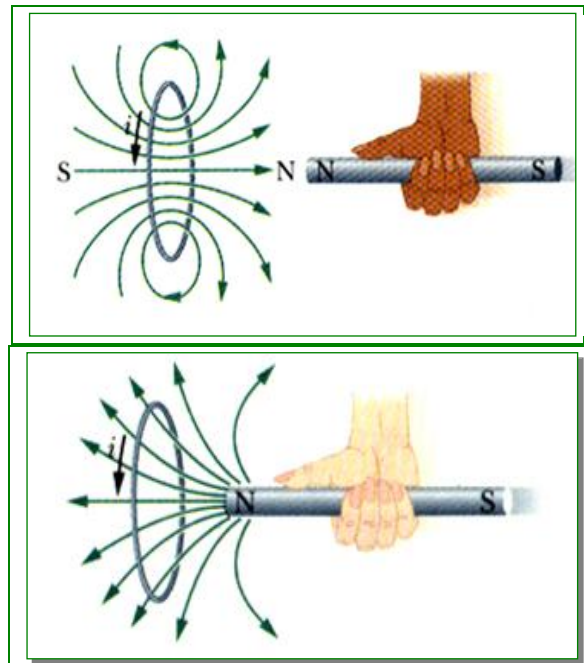


Figura 8: oposição ao movimento do ímã.

O sentido da corrente  $i$  induzida em uma espira é tal que o campo magnético  $B_i$  produzido pela corrente se opõe à variação do campo magnético  $B$  que induziu a corrente. O campo magnético  $B_i$  sempre tem o sentido oposto ao sentido de  $B$  se  $B$  está aumentando (a,c), e o mesmo sentido de  $B$  se  $B$  está diminuindo (b,d), como mostrado na Figura 9. A regra da mão direita fornece o sentido da corrente induzida a partir do sentido do campo induzido.

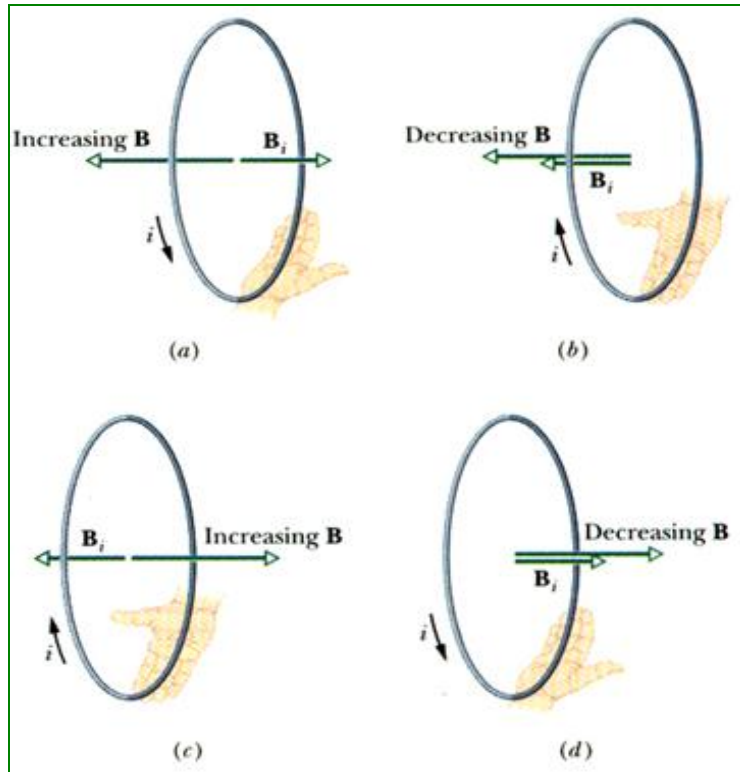


Figura 9: Oposição à variação do fluxo.

### 3.3. MECÂNICA

#### 3.3.1. MOMENTO DE INÉRCIA

Momento de inércia é a distribuição da massa de um corpo em torno do eixo de rotação. Se um corpo rígido compõe-se de poucas partículas, podemos calcular seu momento de inércia em torno de um eixo de rotação tal que,

$$I = \sum m_i x_i^2 \quad (15)$$

Neste caso, é possível encontrar o produto  $mr^2$  para cada partícula e então somar os produtos. Sem um corpo rígido consiste em um número muito grande de partículas adjacentes (ele é contínuo, como um disco de plástico), usar a equação acima iria requerer um computador. Portanto, em vez disso, trocamos a soma por uma integral e definimos o momento de inércia do corpo como,

$$I = \int x^2 dm \quad (16)$$

### 3.3.2. TORQUE

O torque pode ser identificado como a ação de girar ou torcer de uma força  $F$ . Ao aplicar uma força em um determinado objeto, com o propósito de girá-lo, pode-se afirmar que está sendo aplicado um torque. O torque é definido a partir da componente perpendicular ao eixo de rotação da força aplicada sobre um objeto que é efetivamente utilizada para fazê-lo girar em torno de um eixo ou ponto central, conhecido como ponto de rotação. A distância do ponto de rotação ao ponto onde atua uma força  $F$  é denotada por  $r$  e pode ser chamado de braço de alavanca.

$$\tau = r.F \quad (17)$$

Essa é a definição de torque apenas para um corpo rígido que pode girar em torno de um eixo fixo, com cada partícula no corpo sendo forçada a se mover em um círculo centrado sobre esse eixo. Sendo assim, atribuímos ao torque ou um valor positivo ou um valor negativo, dependendo do sentido da rotação que ele individualmente provocaria em um dado corpo, a partir do repouso: Se o corpo gira no sentido anti-horário, o torque é positivo. Se o objeto gira no sentido horário, o torque é negativo.

Agora expandimos a definição de torque para aplicá-la a uma partícula individual que se move ao longo de qualquer trajetória em relação a um ponto fixo (em vez de um eixo fixo). O torque deve ser escrito como um vetor e pode ter qualquer sentido.

$$\tau = r \times F \quad (18)$$

Para determinar o sentido do torque, temos que usar a regra da mão direita para produtos vetoriais, como mostrado na Figura 10:

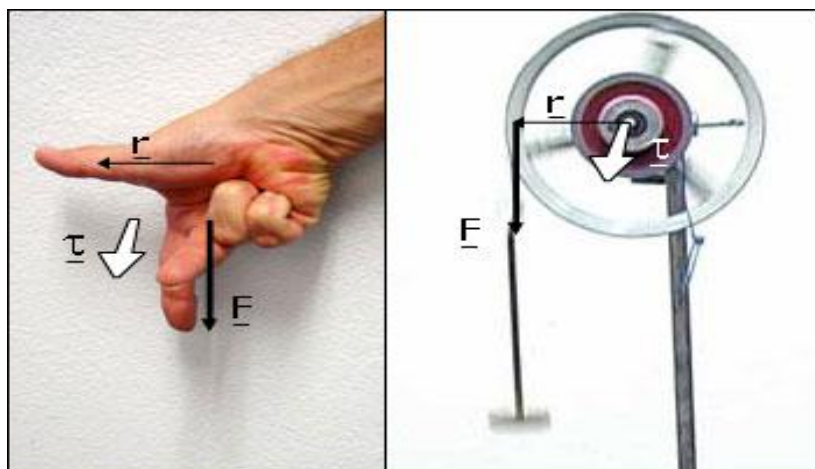


Figura 10: Regra da mão direita para torque.



### 3.3.3. MOMENTO ANGULAR

O momento angular é a quantidade de movimento associado a um objeto que executa um movimento de rotação em torno de um ponto fixo. O vetor momento angular  $L$  de um ponto material de massa  $m$  em relação ao ponto  $O$  (a origem do referencial escolhido, por exemplo), é definido como o produto externo entre o vetor posição  $r$  do ponto e o vetor quantidade de movimento ( $p = m \cdot v$ ) desse ponto:

$$l = r \times p = m (r \times v) \quad (19)$$

O momento angular possui a mesma relação com o momento linear que o torque possui com a força. Da mesma forma que ocorre para o torque, o momento angular somente tem significado em relação a uma origem especificada. O sentido do vetor momento angular é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores posição  $r$  e momento linear  $p$ , como mostrado na Figura 11:

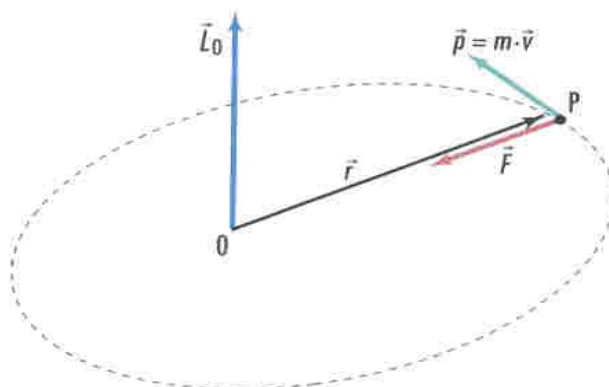


Figura 11: Momento angular.

### 3.3.4. CONSERVAÇÃO DO MOMENTO ANGULAR

Antes de iniciar o conceito de conservação angular, partimos da equação da segunda lei de Newton na forma angular, tal que  $\tau = dL/dt$ . Se nenhum torque externo resultante atua sobre o sistema, esta equação torna-se  $dL/dt = 0$ , ou seja,  $L =$  uma constante um sistema isolado. Este resultado, chamado de lei da conservação do momento angular, pode também ser escrito como: Momento angular resultante em algum instante inicial = Momento angular resultante em algum instante posterior, ou seja,

$$L_i = L_f \quad (20)$$

A equação dada acima é vetorial. Dependendo dos torques externos que atuam sobre um sistema, o momento angular do sistema pode ser conservado em apenas uma ou duas direções, mas não em todas as direções, tal que: Se a componente do torque externo resultante atuando sobre um sistema ao longo de um eixo for nula, então a componente do momento angular do sistema ao longo desse eixo não pode variar, não importando que mudanças ocorram dentro do sistema.

A lei da conservação do momento angular pode ser aplicada ao corpo isolado, o qual gira em torno de um eixo. Suponha que o corpo inicialmente rígido de alguma forma redistribua sua massa em relação a esse eixo de rotação, variando o seu momento de inércia. Sendo assim, escrevemos essa lei de conservação como,

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f \quad (21)$$

Onde os índices se referem aos valores do momento de inércia  $I$  e da velocidade angular  $\omega$  antes e depois da redistribuição de massa. Na Figura 12, mostra uma bailarina que pode girar livremente em torno de um eixo vertical. A bailarina com braços abertos, inicia seu movimento de rotação a uma modesta velocidade angular  $\omega_1$ . Seu vetor momento angular  $L_1$  está situado ao longo do eixo de rotação vertical, apontado para cima. Em seguida, a bailarina encolhe os braços. Esta ação reduz seu momento de inércia de um valor inicial  $I_1$  para um valor menor  $I_2$ , pois ela move massa para mais próximo do eixo de rotação. Sua taxa de rotação aumenta consideravelmente, de  $\omega_1$  para  $\omega_2$ .

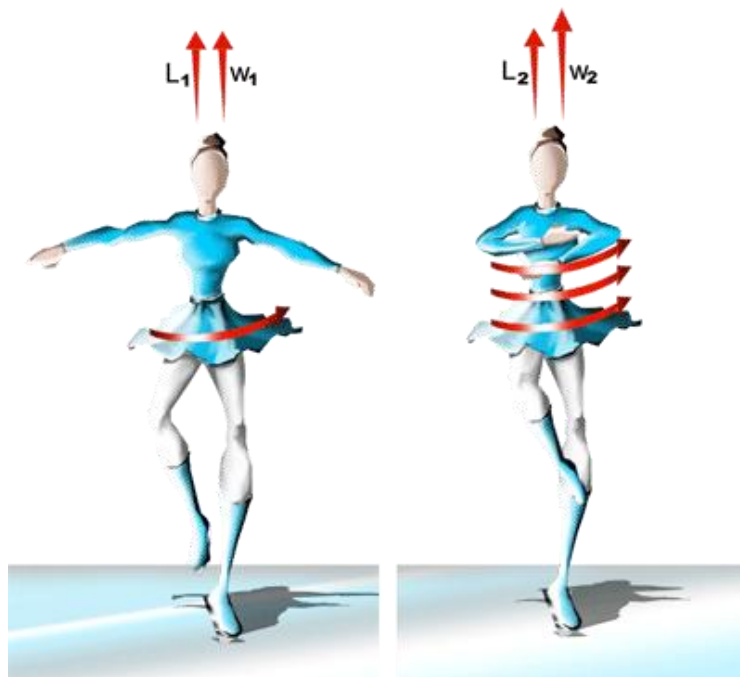


Figura 12: Conservação do momento angular.

O momento angular desse sistema permanece constante devido ao torque externo resultante ser nulo. Sendo assim, a bailarina com braços abertos possui uma velocidade angular  $\omega_1$  relativamente baixa e momento de inércia  $I_1$  relativamente grande. A partir do momento que ela fecha os braços, a velocidade angular  $\omega_2$  deve ser maior para compensar a redução de  $I_2$ .

### **3.4. ÓTICA**

#### **3.4.1. DISCO DE NEWTON**

A luz visível é uma radiação eletromagnética cujas faixas de luz variam entre o vermelho e o violeta. O olho humano percebe as cores básicas deste espectro com bastante distinção. Essas cores são: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, índigo e violeta.

Segundo Isaac Newton, ao utilizar um prisma triangular de cristal atravessado por um feixe luminoso, pode-se obter o que hoje chamamos de espectro, devido ao diferente índice de refração ou desvio de cada uma das cores que compõe a luz branca. Isso acontece porque, quando a luz se propaga de um meio para outro de diferente densidade, por exemplo, do ar para o vidro do prisma, cada uma das ondas têm um tipo de frequência, assumindo diferentes ângulos de refração. Como cada uma das cores possuem sentidos distintos, portanto, é possível visualizar todo o espectro decomposto quando a luz sai do prisma.

Esse mesmo fenômeno da decomposição da luz ocorre na natureza, chamado de arco-íris. As gotículas de água servem como prismas decompondo a luz que incide sobre elas formando o arco-íris. Para comprovar o inverso, o físico criou o chamado Disco de Newton. Na Figura 13, está representado o fato de que a luz branca é proveniente a partir da soma de diferentes cores.

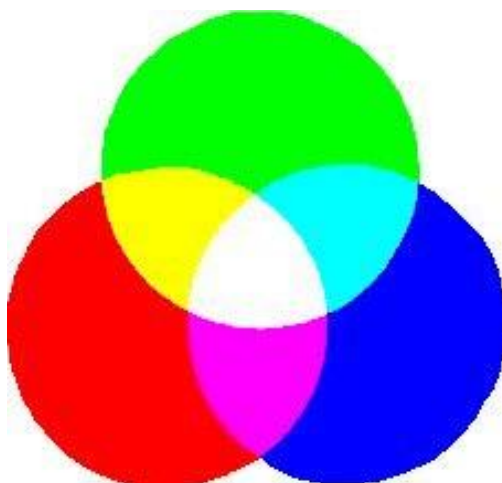


Figura 13: Representação da soma de cores.

O Disco de Newton, como mostrado na Figura 14, é pintado com as mesmas cores que compõem o espectro de luz branca. Ao ser girado com intensidade e recebendo uma iluminação intensa, adquire uma cor uniformemente branca. À medida que aumenta a velocidade do disco, as cores vão-se somando, o matiz geral aparece acinzentado e, finalmente, só se observa um círculo uniforme esbranquiçado.

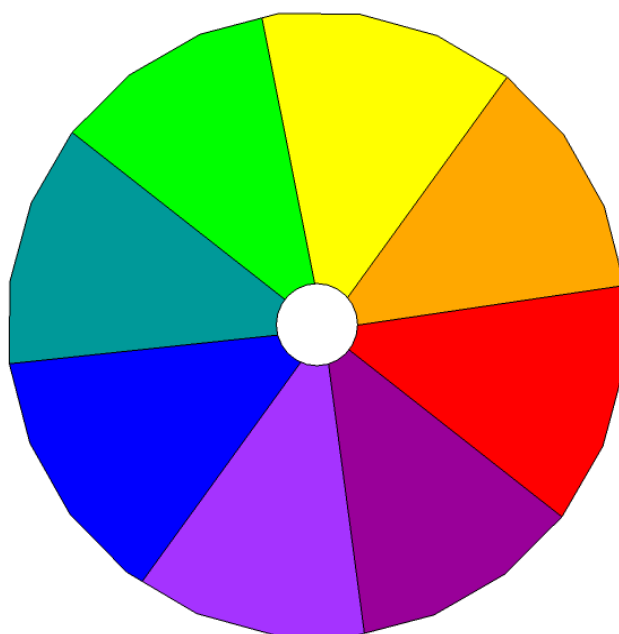


Figura 14: Representação do Disco de Newton.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

## Parte 1: Quase – Levitação magnética do Disco de Newton.

Para a realização do experimento foram utilizados os seguintes materiais:

- 12 Ímãs de Neodímio de 10 mm de diâmetro por 4 mm de espessura;
- 2 CDs;
- suporte para CD;
- bússola;
- lápis de cor;
- cartolina;
- cola;
- tesoura;
- fita adesiva dupla face;
- transferidor.

Inicialmente, com o auxílio de uma bússola, averiguamos a polaridade de cada um dos 12 ímãs de neodímio, separando 6 ímãs para cada um dos CDs. Em seguida, utilizamos um transferidor para medir a distância de  $60^\circ$  entre cada um dos ímãs, como mostrado na Figura 15:



Figura 15: Marcação no CD para a posição dos ímãs.

Para fixar cada um dos ímãs em torno do eixo central do CD, utilizamos uma fita adesiva dupla face, como mostrado na Figura 16:



Figura 16: Ímãs fixados no CD.

Em seguida, fixamos uma das superfícies sem ímãs de um dos CDs no suporte. O outro CD é colocado na haste central do suporte, de modo a ficar móvel. Para que esse fenômeno ocorra, serão colocados ímãs de polaridades iguais em ambos os discos, tendo a mesma quantidade de ímãs em cada um deles, como mostrado na Figura 17:

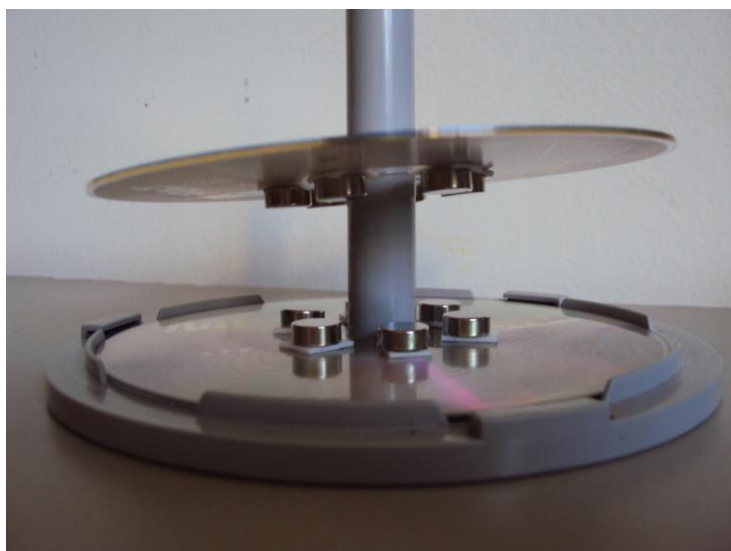


Figura 17: Imagem do projeto.

Para a realização do Disco de Newton, fizemos um disco de cartolina do mesmo tamanho que o CD. Essa circunferência com um furo no meio foi dividida em partes iguais para ser pintado com as cores do Disco de Newton, como mostrado na Figura 18:



Figura 18: Disco de Newton.

Por fim, colamos esse disco na superfície externa do CD móvel, para que pudéssemos rotacioná-lo e visualizarmos a cor branca.

## **Parte 2: Experimento sobre Leis de Faraday e Lenz.**

Para a realização desse experimento foram utilizados os seguintes materiais:

- galvanômetro;
- fios;
- bobina;
- suporte com 2 ímãs.

Para a montagem do experimento foram colocados dois fios ligando o galvanômetro às bobinas, sendo um fio na entrada e o outro na saída do equipamento (em série). Para que pudéssemos mostrar a aplicação do campo magnético através das Leis de Faraday e Lenz, utilizamos um suporte com 2 ímãs com polaridades opostas. Na Figura 19, estão os materiais utilizados para essa parte do experimento.

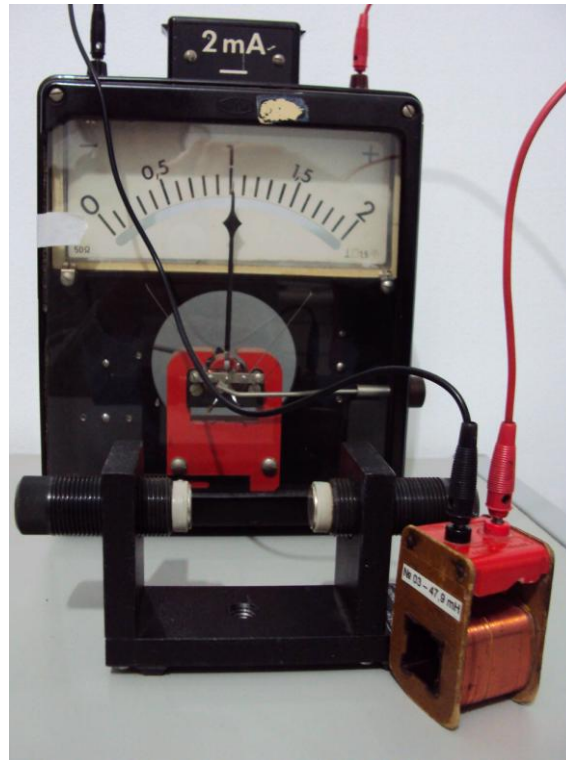


Figura19: materiais para aplicação do campo magnético.

Em seguida, posicionamos uma bobina no meio do suporte, entre os dois ímãs, de modo que pudéssemos movimentar essa bobina para averiguarmos a variação da corrente elétrica no galvanômetro, devido a variação do fluxo magnético, como mostrado nas imagens da Figura 20:



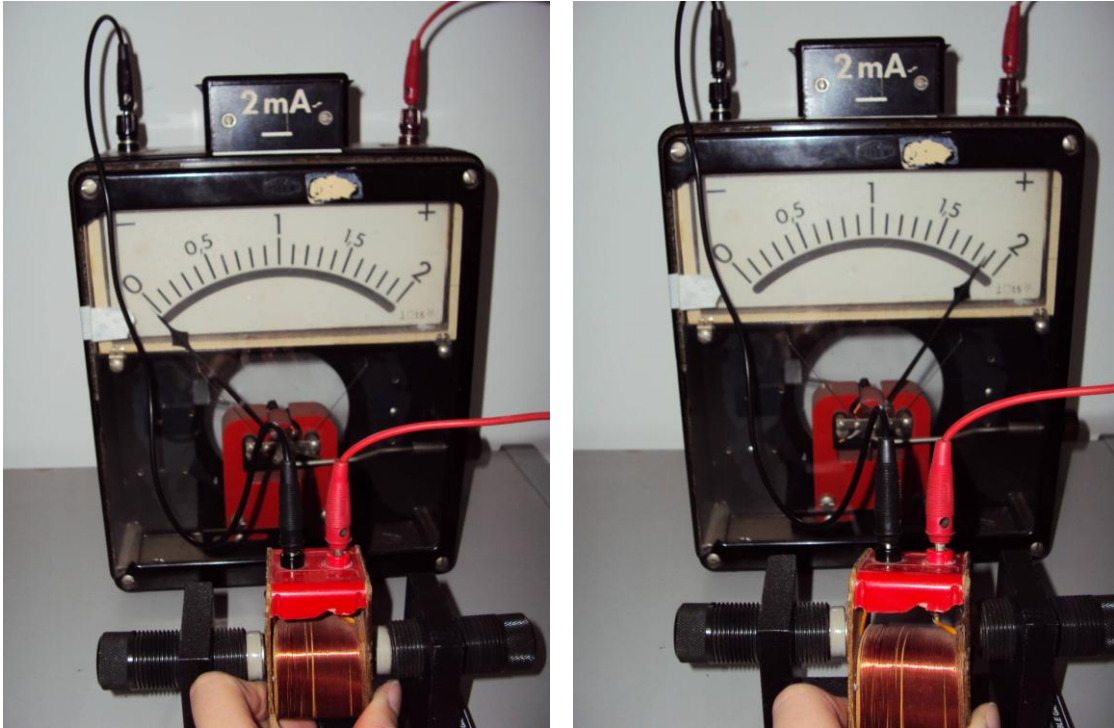


Figura 20: Variação da corrente elétrica.

A partir desse movimento, há uma corrente elétrica no galvanômetro, de modo a gerar um torque magnético tanto no sistema suporte com ímãs e bobina quanto no sistema que compõe o galvanômetro, uma espira quadrada. Essa espira está mostrada na Figura 21.

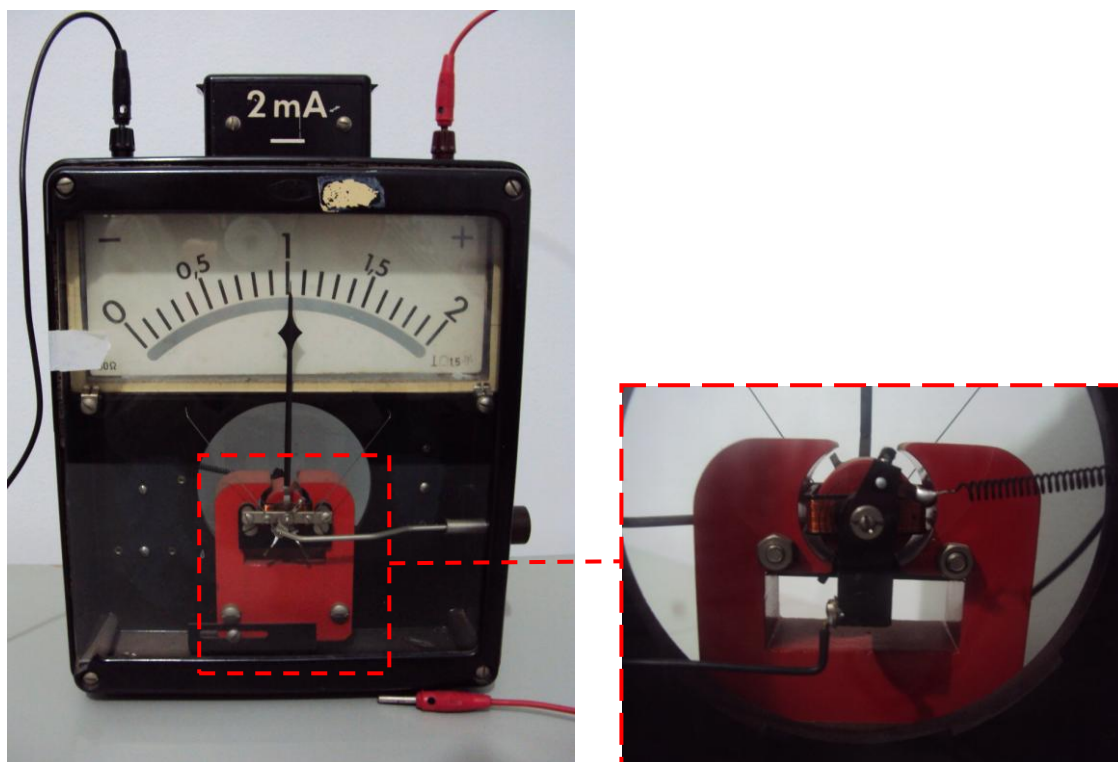


Figura 21: Espira quadrada dentro do galvanômetro.

## 5. RESULTADOS

### Parte 1: Quase – Levitação magnética do Disco de Newton.

Na Figura 22, está representado um protótipo do projeto previsto inicialmente, no qual os ímãs seriam colados em torno da borda de cada disco, tendo a mesma quantidade de ímãs tanto no CD fixo quanto no CD móvel.

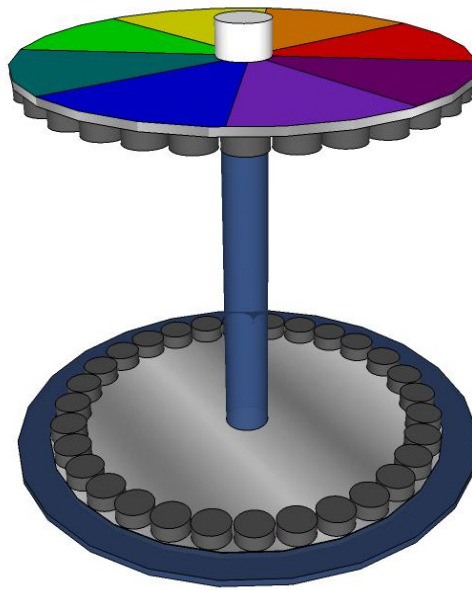


Figura 22: Vista frontal inclinada do projeto pretendido inicialmente.

Ao realizar o protótipo da Figura 22 com o auxílio dessas fitas, obtemos resultados que desfavoreceram as nossas expectativas durante o experimento. Ao iniciar a rotação do CD móvel, o disco tinha uma velocidade angular relativamente baixa, de modo que não conseguíamos visualizar com nitidez a sobreposição das cores do disco de Newton.

A variação da velocidade de rotação é causada pela alteração da distribuição da massa ao redor do eixo do corpo, ou seja, pela alteração do momento de inércia. O momento de inércia depende da massa do corpo e de como ela se distribui em torno do eixo de rotação.

Ao diminuir o momento de inércia, através da aproximação dos ímãs ao eixo central, há conservação do momento angular, garantindo o aumento do módulo da velocidade angular do disco, como mostrado nas Figuras 23 e 24:

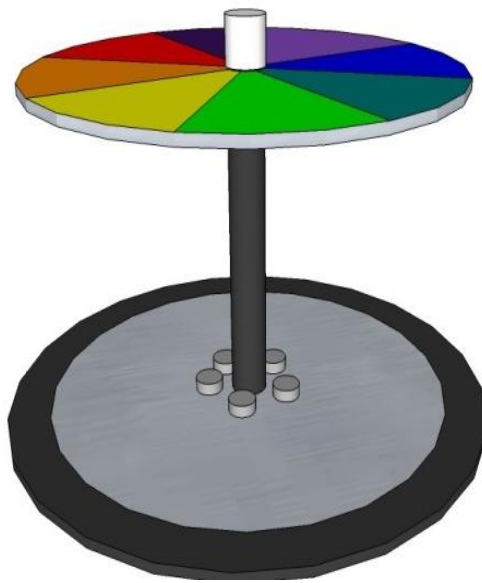


Figura 23: Vista frontal inclinada do projeto.



Figura 24: Vista frontal do projeto.

## Parte 2: Experimento sobre Leis de Faraday e Lenz.

A partir desse experimento é possível notar que, uma espira conectada a um galvanômetro (sem bateria), gera uma corrente no galvanômetro se houver um movimento relativo ímã-espira. Além disso, quanto mais veloz for o movimento relativo, maior será a variação do fluxo magnético, logo, maior será também a corrente na espira. Isso é o que mostra a Figura 25:

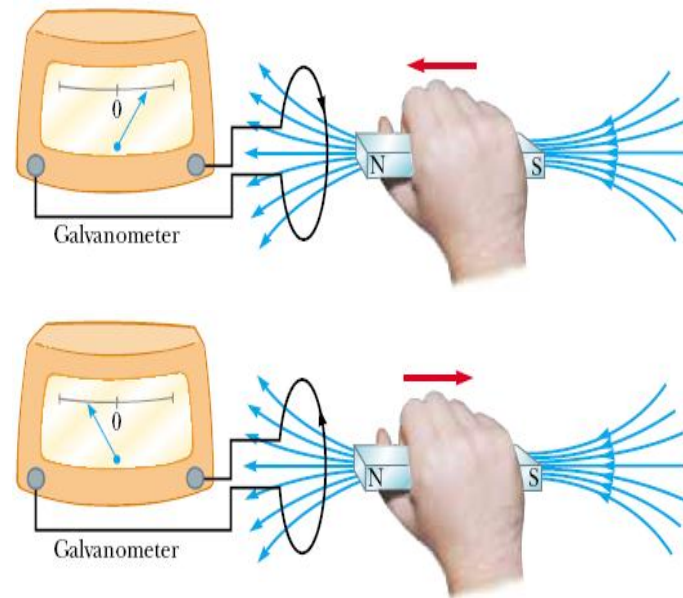


Figura 25: Corrente induzida pela espira.

Na primeira imagem da Figura 25, o ímã está sendo inserido dentro da espira, de modo que o sentido da corrente induzida anti-horário, pois o campo magnético devido a ela se opõe à variação do fluxo magnético que a produziu. Por esse mesmo motivo, ao retirarmos o ímã de dentro da espira, a corrente induzida tem sentido horário, como representado na segunda imagem da Figura 25.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.youtube.com/watch?v=vYonIwPJrVo>. Acesso em 06 de abril de 2012.
- [2] Serway R. A. e Jewett J. W., Princípios de Física, Eletromagnetismo, vol. 3, 5<sup>o</sup> edição, Thomson.
- [3] Walker J., Halliday e Resnick, Fundamentos da Física, Eletromagnetismo, vol. 3, 8<sup>o</sup> edição, LTC.
- [4] <http://www.seara.ufc.br/sugestoes/fisica/oti7.htm>. Acesso em 23 de abril de 2012.
- [5] Marion J. B., Thornton S. T., Classical Dynamics of particles and systems, 4<sup>o</sup> edição.
- [6] Nussenzveig H. M., Eletromagnetismo, vol. 3, 1<sup>o</sup> edição, Blucher.
- [7] Walker J., Halliday e Resnick, Fundamentos da Física, Mecânica, vol. 1, 7<sup>o</sup> edição, LTC.
- [8] Nussenzveig H. M., Ótica, Relatividade e Física Quântica, vol. 4, 1<sup>o</sup> edição, Blucher.

[9] Symon K. R., Mecânica, 5<sup>o</sup> edição, Campus.

[10] <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/140/37/>. Acesso em 07 de abril de 2012.

## **7. COMENTÁRIO DO ORIENTADOR**

Este trabalho / projeto será muito útil para professores ensinarem efeitos magnéticos relacionados com o eletromagnetismo para alunos iniciantes nesta área: alunos do ensino básico ou iniciantes (primeira disciplina) na universidade. Dentre os efeitos, destacamos a misteriosa e surpreendente levitação via campo magnético, acoplada ao chamado disco de Newton. O estudo da indução eletromagnética, leis de Faraday e Lenz, é apresentado de maneira simples e esclarecedora. Neste projeto fica obvio a transformação da energia mecânica em energia elétrica no processo desenvolvido por Faraday, cuja importância deve ser ressaltada uma vez que nos possibilitou o uso comercial da energia elétrica limpa e mais barata, sobretudo no Brasil com a construção das hidroelétricas.

No contexto deste projeto ainda, destacaria a atuação serena e competente da Mayara durante o desenvolvimento deste evento, inclusive demonstrando um grau de empreendedorismo acima da média na solução das questões surgidas na execução. De modo que só me resta elogiar a atitude de curiosidade científica desta aluna.