

Relatório Final da disciplina F 809 -Instrumentação para o ensino

Levitação Magnética



Aluno: Oscar Cavichia de Moraes Ra 017013

Orientador.....Prof. Dr. Márcio A. A. Pudenzi

Coordenador do Curso..... Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi

Sumário

I. Resumo.....	2
II. Introdução.....	2
III. Teoria.....	2
IV. Montagem experimental.....	10
V. Resultados e Conclusão.....	12
VI. Créditos das Fotos.....	14
VII. Referências bibliográficas.....	15
Apêndice: Como o freio depende da velocidade angular.....	15

I. Resumo

O conceito de corrente de Foucault é mencionado muito casualmente em cursos de ensino fundamental, médio e graduação. Este trabalho tem como objetivo divulgar este conceito tão pouco visto através de um simples experimento no qual um ímã levita quando um disco condutor, que está com um pequeno trecho de sua área sob influência do campo magnético do ímã, é posto para girar. Correntes de Foucault, conhecidas também como correntes parasitas, são correntes circulatórias estabelecidas em um condutor elétrico por um fluxo magnético variando no tempo.

II. Introdução

Levitação é o estado de um corpo que permanece no espaço a uma certa distância de uma superfície, sem que nada visível o sustenha ou suspenda, graças a uma força de sustentação que compensa a força da gravidade.

Considere um objeto suspenso no ar por um fio camuflado. A aparente levitação neste caso ocorre porque a força aplicada pelo fio sobre o objeto equilibra o seu peso, de tal forma que a resultante das forças externas (peso e tração) é nula. Levitações desta maneira não são muito cativantes ao público pois a platéia sabe a origem da levitação. Por isso os mágicos em suas apresentações passam um aro envolvendo os objetos que estão levitando, para mostrar que não há fios mantendo-os suspensos. Para deixar a platéia intrigada, o mágico não revela como a levitação foi realizada..

No exemplo do objeto suspenso por um fio, a força do fio no objeto é de contato. A levitação também pode ser obtida por forças que agem a distância, como por exemplo a força magnética. A força magnética entre dois ímãs pode ser atrativa ou repulsiva, dependendo da polaridade dos ímãs em questão. Pólos iguais se repelem e diferentes se atraem. Se um ímã é colocado em cima de outro ímã que está em repouso sobre uma mesa, de tal maneira que seus pólos iguais estejam voltados uma para o outro, então haverá uma repulsão entre eles. Esta força de repulsão pode equilibrar a força peso do ímã superior, o qual levitará.

Durante muito tempo foram estudadas apenas as propriedades dos ímãs, sem considerar que, entre os fenômenos magnéticos e os elétricos, houvesse alguma relação. Contudo, em 1820, um fato importante mudou essa situação. Naquele ano o cientista dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) descobriu que a passagem de uma corrente elétrica por um fio condutor também produz fenômenos magnéticos tais como o desvio da agulha de uma bússola colocada nas proximidades de um campo magnético. Em outras palavras, cargas elétricas em movimento originam, na região do espaço onde ocorre o movimento, um campo denominado campo magnético. Doze anos mais tarde, depois de tentativas que se estenderam por vários anos, o físico inglês Michael Faraday (1791-1867) verificou que aparecia uma corrente momentânea em um circuito quando, em um circuito vizinho, se iniciava ou se interrompia uma corrente. Pouco depois, seguiu-se a descoberta de que o movimento de um ímã se aproximando ou se afastando de um circuito produziria o mesmo efeito. Joseph Henry (1797-1878) havia se antecipado de cerca de um ano às descobertas de Faraday; mas como este último foi o primeiro a publicar seus resultados, os créditos são-lhe, usualmente, atribuídos. Os trabalhos de Faraday e Henry mostraram que correntes podiam ser produzidas por ímãs em movimento.

III. Teoria

O campo magnético, tal como o campo elétrico, é um campo vetorial e seu valor e orientação em qualquer ponto são especificados por um vetor \vec{B} chamado indução magnética.

Genericamente, define-se como campo magnético toda a região do espaço em torno de um condutor percorrido por corrente ou em torno de um ímã, neste caso, devido a particulares movimentos que os elétrons executam no interior de seus átomos.

Na figura 1, temos o aspecto do campo magnético de um ímã. Convencionou-se que as linhas de indução saem do pólo norte e chegam ao pólo sul, externamente ao ímã.

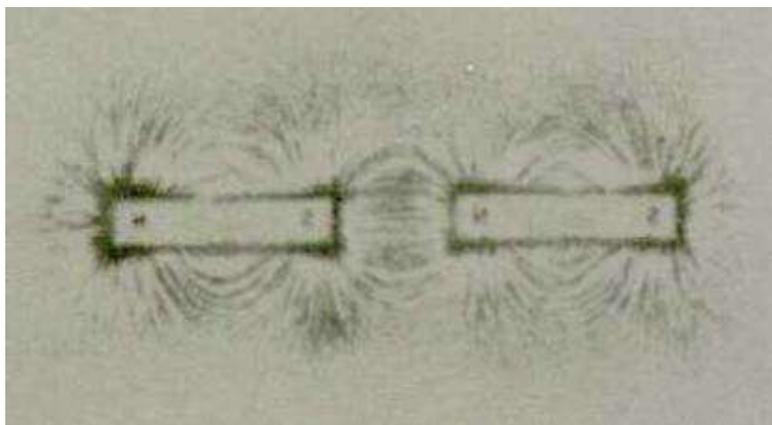


Figura 1 Com limalha de ferro, consegue-se visualizar o campo magnético de um ímã.

Uma espira percorrida por uma corrente origina um campo magnético análogo ao de um ímã, e então atribui-se a ela um pólo norte, do qual as linhas saem, e um pólo sul, no qual as linhas chegam (figura2).

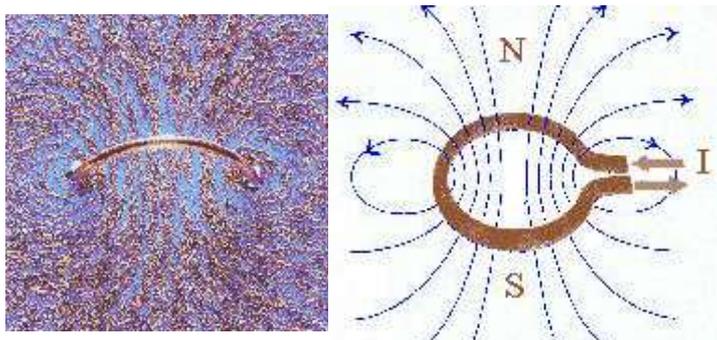


Figura 2 Campo magnético em uma espira circular.

Pode-se usar a seguinte regra prática para determinar a natureza norte ou sul de um pólo de espira: coloque a mão direita fazendo sinal de positivo no circuito de tal maneira que os quatro dedos inferiores coincidam com o sentido da corrente; a direção do polegar indicará o pólo Norte. Esta regra pode ser visualizada na figura 3.



Figura 3 Regra da mão direita para campos magnéticos gerados por correntes em espiras.

A força magnética que age em cargas elétricas ou em condutores percorridos por corrente, em um campo magnético, é muito importante, e através de seu conhecimento pode-se explicar os fenômenos magnéticos, inclusive a levitação do ímã. Como dito anteriormente, cargas elétricas em movimento originam campo magnético. Estando a carga elétrica em movimento em um campo magnético, há uma interação entre esse campo e o campo originado pela carga. Esta interação manifesta-se por forças que agem na carga elétrica, denominadas forças magnéticas. A intensidade da força magnética em uma carga q movendo-se com uma velocidade v em um campo magnético B uniforme é :

$$F = B |q| v \text{sen}\theta$$

onde θ é o ângulo entre a direção da velocidade da carga e o campo magnético. Para determinar a direção de \vec{F} quando a carga for positiva utiliza-se a seguinte regra prática: com a palma da mão direita plana, aponte o polegar na direção e sentido em que a carga está se movendo, isto é, ao longo de \vec{v} , e os dedos na direção do vetor \vec{B} . O sentido de \vec{F} é aquele no qual a mão daria um empurrão. Se a carga for negativa a direção será a mesma, porém o sentido será oposto. Considere agora um condutor reto, de comprimento L , percorrido por uma corrente i em um campo magnético uniforme \vec{B} , fazendo um ângulo θ com a direção do condutor (Figura 4).

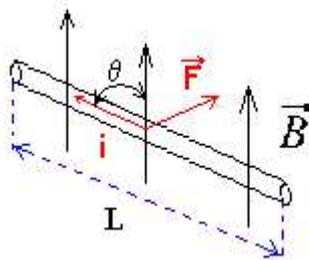


Figura 4 Força em condutor percorrido por corrente em um campo magnético uniforme.

Se Δq é a carga transportada pela corrente i , no intervalo de tempo Δt , ao longo do condutor de comprimento L , temos $i = \Delta q / \Delta t$ ou $\Delta q = i \Delta t$.

$$F = B i \Delta t v \text{sen}\theta$$

Por outro lado, $L = v \Delta t$, assim:

$$F = B i L \text{sen}\theta$$

Para determinar a direção da força magnética, basta trocar v por i na regra prática anterior.

Imagine agora que ao invés de passar uma corrente no condutor da figura 4, este se mova com velocidade v através do campo magnético uniforme, mostrado na figura 5. Como os elétrons livres acompanham o movimento do condutor, eles ficam sujeitos à força magnética \vec{F}_m .

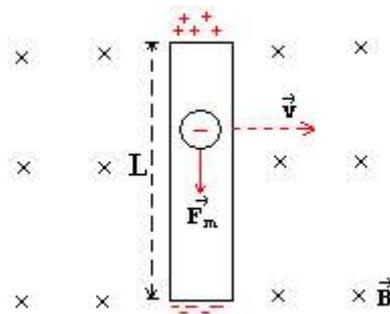


Figura 5 Condutor movendo-se perpendicularmente ao campo magnético.

Desta maneira gera-se uma diferença de potencial (ddp) entre as extremidades do condutor. Fazemos então este condutor deslizar sobre um outro fixo, dobrado em forma de U, onde se adapta um amperímetro A de graduação zero, no centro, para indicar o sentido da corrente (ver figura 6).

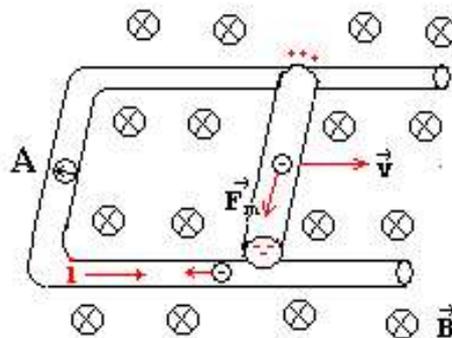


Figura 6 Quando o condutor desliza sobre outro, forma-se um circuito fechado e o amperímetro indica a passagem da corrente induzida. Indicamos o sentido do movimento dos elétrons livres e o sentido da corrente elétrica convencional.

Desse modo tem-se um circuito fechado, e a ddp entre os terminais determinará a passagem de uma corrente denominada corrente induzida. A ddp estabelecida corresponde a uma força eletromotriz que, nesse caso é chamada fem induzida.

Em 1831 Michael Faraday realizou um série de experimentos, incluindo três que podem ser resumidos da seguinte maneira:

Experimento I. Ele puxou um circuito elétrico através de um campo magnético e como resultado uma corrente surgiu no circuito.

Experimento II. Ele moveu o ímã no sentido oposto ao movimento do experimento I, mantendo o circuito fixo, e novamente ele observou uma corrente no circuito.

Experimento III. Com o circuito e o ímã em repouso, ele variou a intensidade do campo magnético, e mais uma vez observou corrente no circuito.

Com estes experimentos Faraday concluiu: Quando o fluxo magnético através de um circuito varia, surge, nesse circuito, uma fem induzida. Este fenômeno é chamado indução eletromagnética, e o circuito onde ele ocorre é denominado circuito induzido.

O sentido da corrente induzida é determinado pela lei de Lenz:

Uma corrente induzida possui um sentido tal que o campo magnético devido à corrente se opõe à variação no fluxo magnético que induz a corrente.

Até agora, as correntes provocadas por um fluxo magnético variável fluíam em circuitos claramente definidos. Muitas vezes porém, um fluxo variável provoca correntes circulares, denominadas correntes de Foucault, em condutores maciços.

Imaginemos uma chapa condutora entre as peças polares de um eletroímã, como mostra a figura 7.

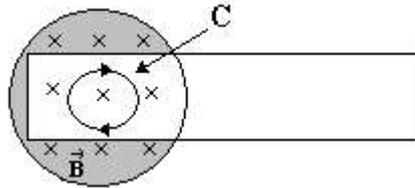


Figura 7 Correntes de Foucault. Quando o campo magnético através de uma chapa condutora for variável, há uma fem induzida em qualquer circuito fechado no metal, como por exemplo o circuito C. A fem induzida provoca uma corrente induzida no circuito.

Se o campo magnético \vec{B} estiver variando com o tempo, o fluxo através de qualquer curva fechada na chapa condutora será um fluxo variável. Por exemplo, o fluxo através do circuito fechado C na figura é o produto do campo magnético B pela área no interior da curva fechada. Se B for variável, o fluxo será variável, e haverá uma fem induzida no circuito C. Uma vez que este circuito C é condutor, haverá uma corrente que é igual à fem induzida dividida pela resistência do circuito. Na figura 7 está indicado apenas um circuito entre muitos outros fechados que podem conduzir correntes, se o campo magnético for variável.

Mesmo não variando a intensidade do campo magnético com o tempo, ainda é possível gerar correntes de Foucault em um condutor. Observe a figura 8.

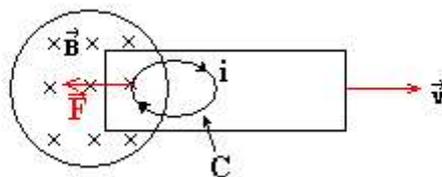


Figura 8 Quando a chapa metálica for puxada para a direita, há uma força magnética para a esquerda, sobre a corrente induzida, que se opõe ao movimento.

Parte da área interna do circuito C, nesta figura, está no campo magnético e uma outra parte está fora do campo. Quando a lâmina for puxada para a direita, o fluxo através do circuito diminui. De acordo com a lei de Faraday, e com a lei de Lenz, será induzida uma corrente no sentido horário, no circuito C. Uma vez que esta corrente está dirigida no sentido horário no ramo do circuito dentro do campo magnético, este exerce sobre ela uma força para a esquerda, que se opõe ao movimento.

Poderíamos então modificar a lei de Lenz para incluir condutores se movimentando num campo magnético[3]:

O sentido de uma corrente induzida é tal que ela se opõe à causa que a produz.

A “causa” da corrente pode ser o movimento de um condutor em um campo magnético ou a variação do fluxo através de um circuito estacionário. No primeiro caso, o sentido da corrente induzida no condutor é tal que o sentido da força exercida sobre ele pelo campo magnético é oposto ao do seu movimento. Portanto ocorre uma oposição ao deslocamento do condutor.

Consideremos um disco girando em um campo magnético perpendicular ao plano do disco, porém restrito a um pequeno trecho de sua área, como na figura 9.

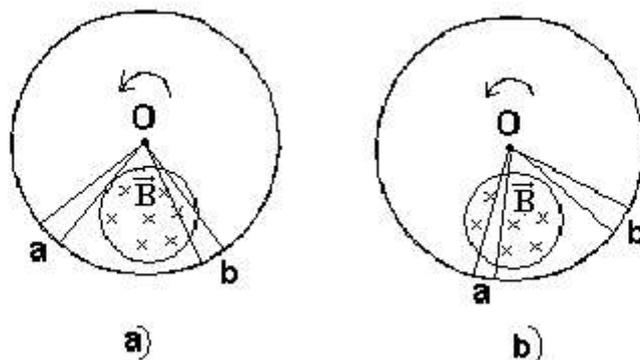


Figura 9 a) Disco girando com um pequeno trecho sob a influência de um campo magnético externo que está entrando no plano do disco. b) devido à rotação do disco, alguns instantes depois os elementos Oa e Ob mudam suas posições com relação ao campo magnético externo.

O elemento Oa do disco não está dentro do campo magnético, contudo o disco está girando, sendo assim, chegará um momento no qual este elemento começa a entrar na região de campo magnético. Neste instante o fluxo magnético através deste elemento começa a aumentar e conseqüentemente, pela lei de Lenz, será induzida uma corrente no condutor cujo sentido de circulação gera um campo magnético que se opõe ao aumento do fluxo magnético no elemento Oa. Deste modo a corrente circulará no sentido anti-horário nesta região, a fim de produzir um campo magnético saindo do plano do disco.

Por outro lado, o elemento do disco Ob está deixando a região do campo magnético, conseqüentemente o fluxo magnético está diminuindo neste elemento. Então será induzida uma corrente no condutor no sentido horário, tal que o campo magnético gerado pela sua circulação esteja entrando no plano do disco, aumentando o fluxo magnético. Enquanto o disco estiver girando, a todo instante seus elementos estarão entrando e saindo da região sob influência do campo magnético, mantendo então as correntes de Foucault circulando no condutor. Estas correntes são mostradas na figura 10.

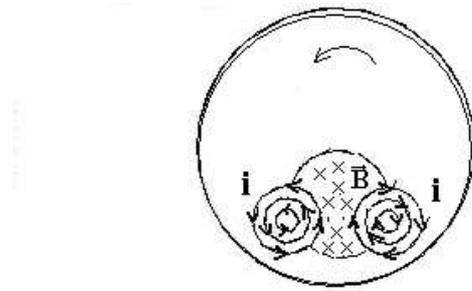


Figura 10 Correntes de Foucault em um disco girando no sentido anti-horário com um campo magnético na área pontilhada entrando na página.

Considere agora o caso em que o campo magnético está inclinado com relação ao plano do disco, como mostra a figura 11.

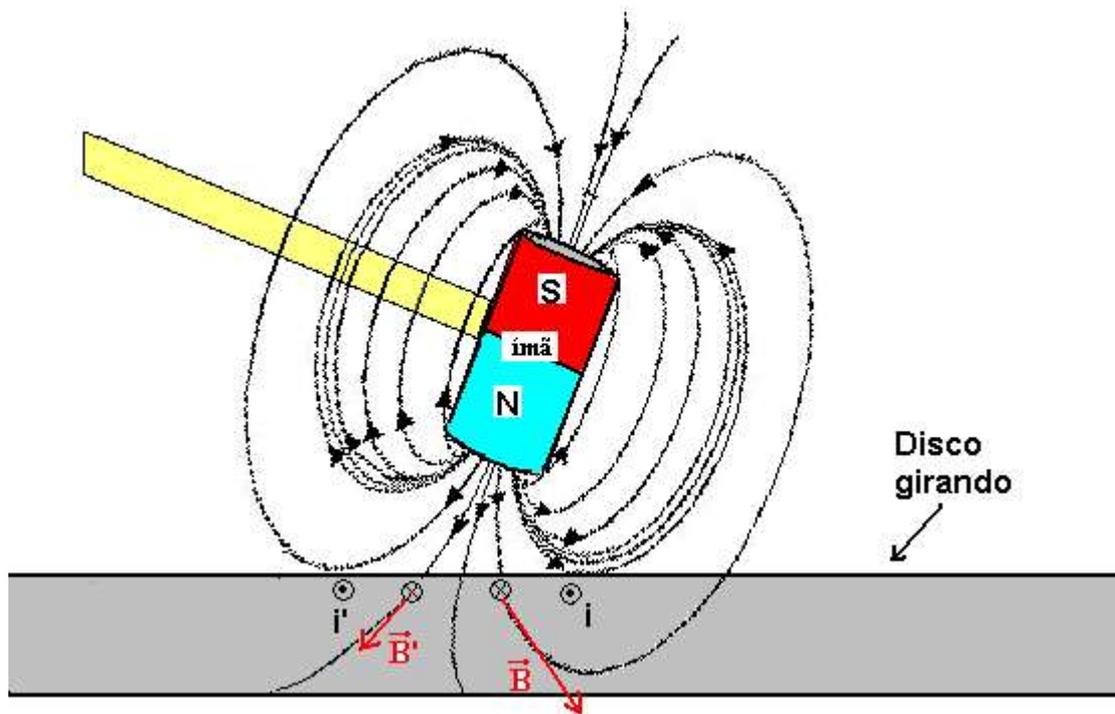


Figura 11 Disco girando com um pequeno trecho de sua área num campo magnético inclinado. A borda esquerda do disco está saindo da página e a direita está entrando, definido desta maneira seu sentido de rotação. A figura mostra ainda as correntes de Foucault, i e i' .

Vimos que correntes em um campo magnético geram um força magnética. Então as correntes de Foucault produzem forças no disco, cuja direção e sentido podem ser determinada pela regra da mão direita. A direção de \vec{B} em um determinado ponto, é tangencial à linha do campo magnético, como está indicado na figura 11. Conseqüentemente, as forças \vec{F} e \vec{F}' geradas pelas correntes i e i' têm direção e sentido como mostrado na figura 12.

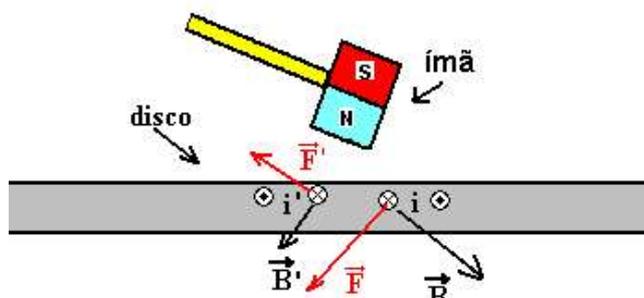


Figura 12 Neste esquema, a borda esquerda do disco está saindo da página e a direita entrando na página, definindo assim o sentido de rotação do disco. As linhas fechadas do campo magnético não estão sendo mostradas.

Observe que a região onde i' é gerada está mais longe do ímã do que a região onde i é gerada. Isto implica em que o fluxo do campo magnético na região de i' é menor que o fluxo na região de i . Sendo assim, i' é menor que i e B' é menor que B . Como a intensidade da força magnética é proporcional ao módulo do campo magnético e à corrente, então F' é menor que F .

A força resultante é encontrada através da soma vetorial de \vec{F} e \vec{F}' , como na figura 13.

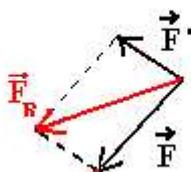


Figura 13 Soma vetorial das forças no disco.

Isto é, aparecerá no disco uma força resultante que não está contida no seu plano, mostrada na figura 14.

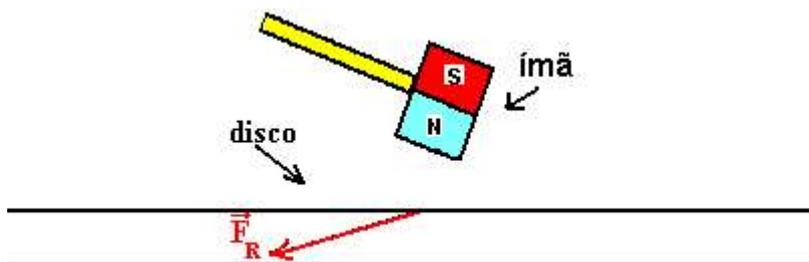


Figura 14 Força resultante no disco girando sob o campo magnético do ímã. O sentido de rotação é o mesmo estabelecido anteriormente.

Esta força pode ser decomposta em duas componentes: uma vertical (F_V) e uma outra componente horizontal (F_H), mostradas na figura 15.

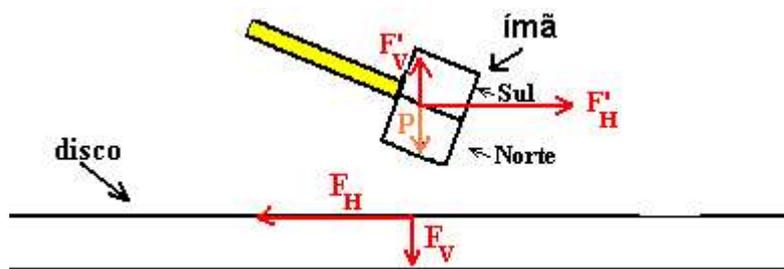


Figura 15 Decomposição da força F_R no plano horizontal (F_H) e vertical (F_V) do disco e a reação destas forças no ímã (F'_H e F'_V , respectivamente) juntamente com a força peso (P) do ímã.

Como a força horizontal se opõe ao sentido de rotação do disco, ela tende a freá-lo. Já a força vertical é perpendicular ao plano do disco, empurrando-o para baixo. Pelo princípio da ação e reação, se o ímã faz uma força para baixo no disco, o disco faz uma força para cima no ímã (F'_V). Se F'_V for maior do que o peso do ímã, ele será empurrado para cima, isto é, ele levitará.

IV. Montagem Experimental

O disco utilizado é de alumínio com espessura de 0,4 cm e diâmetro de 30 cm. O alumínio é um material condutor, ou seja, que possui elétrons livres. Isto é importante pois são estes elétrons que gerarão as correntes no disco. Além disto, o alumínio é diamagnético, isto é, não exhibe propriedades ferromagnéticas.

Para girar o disco, utilizamos um motor elétrico de 110 V AC, que possui um controle o qual permite aumentar ou diminuir a sua rotação. O disco está fixo ao eixo do motor.

Para a levitação magnética, utilizamos um ímã retirado de um fone de ouvido, pois este ímã não é muito pesado.

Em geral, forças magnéticas não são muito intensas, então dificilmente a força que empurra o ímã para cima é suficiente para vencer o seu peso. Para contornar este problema, construímos uma gangorra, onde numa das pontas o ímã foi fixado e na outra foi colocado um contrapeso de massa aproximadamente igual a do ímã. Como contrapeso, usou-se o outro ímã do fone de ouvido que foi colado um pouco mais perto do eixo do que o outro. Assim, a gangorra tem um ligeiro desequilíbrio a favor de um dos ímãs. Na construção desta gangorra utilizou-se três varetas de vara de pescar telescópica. Em uma madeira, que servia de suporte, foram feitos dois furos onde se encaixou duas varetas verticalmente. A distância entre os furos deve ser da ordem do diâmetro da terceira vareta. A terceira vareta é fixada às outras duas por um eixo que passa pelo seu centro de massa, como pode ser visualizado na figura 16.



Figura 16 Montagem do suporte para a levitação do ímã. A terceira vareta é presa às outras duas por meio de um eixo (por exemplo um prego).

O suporte do ímã é ajustado para que a altura do eixo da gangorra fique um pouco acima do disco. O suporte é colocado próximo ao disco de modo que o ímã fique perto da sua borda, como pode ser visto na figura 17.

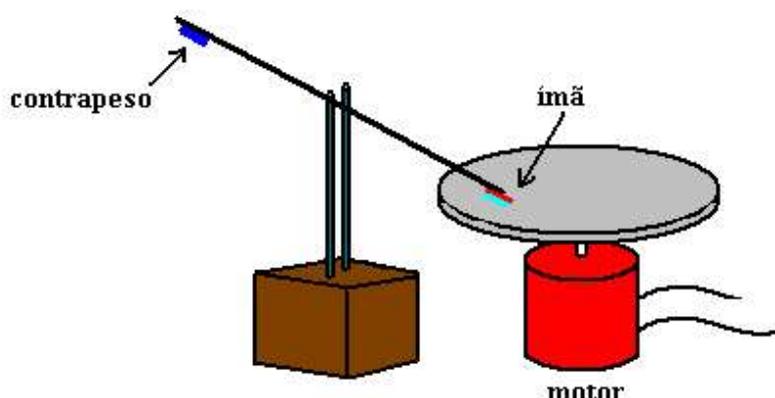


Figura 17 Esquema da montagem experimental.

A segunda parte do experimento consiste no freiamento do disco. Neste experimento utilizamos dois ímãs grandes, retirados de auto falantes estourados, encontrados em ferro-velho. Nossos ímãs tem diâmetro entre 10,5 e 12,0 cm, e estão dispostos paralelos um ao outro, como mostra a figura 18. Quanto maior e mais forte os ímãs melhor pois um dos parâmetros que influencia a eficiência do freio é a intensidade do campo magnético dos ímãs e a área que eles cobrem.

Para separá-los utilizamos uma barra de metal. Esta barra precisa ser espessa o suficiente para que o disco consiga passar entre os ímãs com um pouco de folga. Uma grampo fixo é utilizado para prender os ímãs na posição adequada.

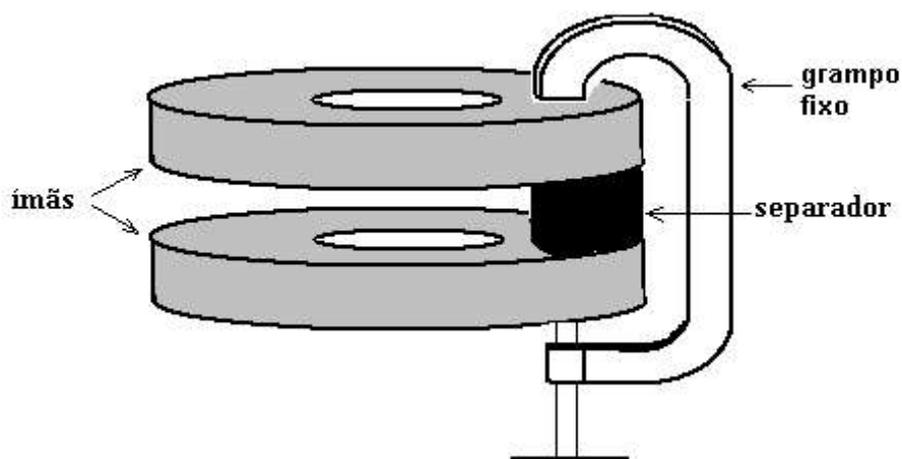


Figura 18 Dois ímãs com pólos opostos voltados um para o outro são separados por pouco mais de 1 cm.

Para evitar que a montagem acima encoste no disco quando o mesmo está girando entre os dois ímãs, fixamos esta montagem em um cano de PVC.

Quando o disco estiver em rotação, desliga-se o motor e então coloca-se o disco entre os ímãs acima. É preciso segurar a base do cano de PVC para contrabalançar o torque proporcionado pelo freiamento do disco.

Uma sugestão que ainda pode ser feita sobre o motor elétrico, é que poderia ser utilizado um liquidificador já posto fora de uso (neste caso deve-se fazer algumas adaptações para prender o disco no eixo do motor, como por exemplo serrar os dentes que servem para fixar o copo do liquidificador), ou mesmo um motor de ventilador, para fazer girar o disco.

V. Resultados e Conclusão

As figuras 19 , 20 e 21 mostram os resultados obtidos com a levitação magnética.



Figura 19 Montagem final para a levitação do ímã. Nesta foto o disco está parado.



Figura 20 A levitação é obtida quando o disco começa a girar.



Figura 21 Zoom na imagem anterior.

No nosso experimento, o ímã consegue ficar suspenso no máximo a 1 cm da superfície do disco, mesmo com o motor em alta rotação.

Verificamos que, no caso de nossa montagem, mesmo uma baixa rotação é suficiente para fazer o ímã levantar, isto porque o suporte em forma de gangorra facilita este processo. Deste modo, mesmo girando o disco com a mão (dando um impulso inicial forte), é possível observar a tendência do ímã em levantar. Assim, torna-se viável economicamente fixar o eixo do disco sob um rolimã bem lubrificado e girando-o com a mão, pode-se repetir este experimento de uma maneira bem simples.

Na figura 22 mostramos o equipamento utilizado para o freiamento do disco.



Figura 22 Ímãs utilizados no freio magnético. O cano de PVC no qual os ímãs estão apoiados tem 50 mm de diâmetro.

Quanto menor o espaço entre os ímãs, mais eficiente será o freio. Nesta parte do experimento o uso do motor elétrico foi essencial, pois com o disco em alta rotação verificamos um intenso freiamento do mesmo.

VI. Créditos das Fotos

Figura 1: <http://geocities.yahoo.com.br/jcc5000/oqueecampomagnetico2br.htm>

Figura 2: <http://geocities.yahoo.com.br/saladefisica8/eletromagnetismo/espira.htm>

Figura 3: <http://www.df.ufscar.br/campomagnetico2.pdf>

VII. Referências Bibliográficas

- [1] Griffiths, David J.; Introduction to eletrodynamics, 3rd edition, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [2] Wouch, G.; Lord A. E, Jr. ; Eddy currents: Levitation, metal detectors, and induction heating; Am. J. Phys., Vol 46, (5), May 1978, p.464.
- [3] W.M. Saslow; Maxwell's theory of eddy currents in thin conducting sheets, and applications to electromagnetic shielding and Maglev; Am. J. Phys. Vol 60, (8), August 1977, p. 705.
- [4] Sears, F. W. , Zemansky, M. W., Física, vol.3, 6^a edição, LTC, Rio de Janeiro, 1981.
- [5] Ramalho, F., Ferraro, N., Soares, P., Os Fundamentos da Física 3: Eletricidade, 6^a edição, São Paulo, Editora Moderna, 1993.
- [6] http://www.feiradeciencias.com.br/sala03/03_15.asp
- [7] http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_04.asp
- [8] <http://my.execpc.com/~rheadley/magalum.htm>
- [9] <http://physics.bu.edu/~duffy/PY106/Electricgenerators.html>
- [10] <http://demolab.phys.virginia.edu/demos/demos.asp?Demos=K&Subject=5&Demo=5K20.40>

Em agradecimentos: “ao professor Mauro M. G. De Carvalho pelo empréstimo do motor e disco de alumínio usados neste experimento.”

Apêndice: Como o freiamento depende da velocidade angular

Por se tratar de um problema matematicamente complexo, neste apêndice vamos apenas analisar o que acontece com um pequeno elemento de área do disco.

Considere uma pequena área A do disco que está entrando num campo magnético uniforme e fixo (mostrado na figura 23).

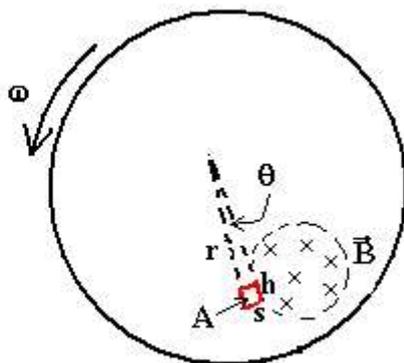


Figura 23 Disco em rotação com velocidade angular ω e com um trecho de sua área sob a influência de um campo magnético uniforme \vec{B} .

O fluxo do campo magnético em um pequeno retângulo de área $A = h s$ é:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA \approx B h s$$

A variação do fluxo para B e h constantes é:

$$\frac{d\phi}{dt} = B h \frac{ds}{dt}$$

A quantidade $\frac{ds}{dt}$ é a velocidade linear do disco na região do campo magnético externo.

Como $s = r \theta$, temos:

$$\frac{d\phi}{dt} = B h \frac{d}{dt} (r\theta) = B h r \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{I})$$

Considerando que o disco possui uma resistência R no local onde está I , podemos calcular a fem induzida ε , através da lei de Ohm:

$$\varepsilon = R I \quad (\text{II})$$

Por outro lado, a lei de Faraday nos diz que :

$$|\varepsilon| = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{III})$$

Substituindo a equação (I) em (III) e igualando a equação (II), temos:

$$R I = B h r \frac{d\theta}{dt}$$

Então:

$$I = \frac{B h r \omega}{R}$$

Onde

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Vemos então que, para r fixo, a corrente I é proporcional à frequência angular ω . No entanto, a força F_R resultante no disco é proporcional à corrente:

$$\vec{F}_R = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Sendo assim, a componente horizontal (F_H) desta força, que é responsável pelo freiamento do disco, também é diretamente proporcional a ω .

Podemos concluir então que quanto mais rápido gira o disco, mais intensa é F_H , e, a medida que o disco vai perdendo velocidade, sua intensidade vai diminuindo. Com o disco em alta rotação, devemos ter um rápido freiamento do mesmo, e em baixa rotação, o freiamento será quase imperceptível.