

Prática 5: Magnetismo e Lei de Faraday

Objetivos

- Determinação da componente horizontal do campo magnético terrestre utilizando-se uma bússola e *bobinas de Helmholtz*;
- Determinação do momento dipolar magnético de uma barra uniforme magnetizada.

Introdução

Os equipamentos utilizados para medida direta de um campo magnético são, em geral, caros e de nem sempre fácil utilização. Contudo, para uma análise quantitativa mais grosseira, pode-se utilizar uma bússola como *magnetômetro*; isto é, como um instrumento para medidas de campos magnéticos (desde que estes sejam comparáveis com o campo magnético terrestre).

Segundo o dicionário⁴, a bússola é um “*instrumento para determinar direções sobre a superfície terrestre, mediante uma agulha magnética livremente suspensa sobre um ponto de apoio, dentro de uma caixa, e cujas pontas estão permanentemente voltadas para os pólos magnéticos da Terra*”. Sabe-se que desde 2600 a.C., os chineses utilizam a bússola para orientação. Este instrumento só chegou ao ocidente 1100 DC, embora os gregos conhecessem os fenômenos magnéticos desde a antiguidade (~590 AC). A agulha magnética é um pequeno ímã, ou seja, um dipolo magnético. Um dipolo magnético tende a se orientar em um campo magnético, por isso a agulha da bússola indica a direção N-S do meridiano magnético local, ou seja, a direção e o sentido da componente horizontal do campo magnético terrestre local, B_H .

Fontes de campo magnético

Duas fontes convencionais de campo magnético são: *fios condutores percorridos por corrente elétrica; ímãs permanentes*. Tais fontes de campo magnético podem ser descritas em função apenas da Lei de Ampère.

Lei de Ampère - Condutor percorrido por uma corrente elétrica

Até o início do séc. XIX não se suspeitava que pudesse existir uma relação entre os fenômenos magnéticos e os elétricos. Em outras palavras, o Magnetismo e a eletricidade eram dois ramos da Física totalmente independentes e distintos.

Este ponto de vista foi radicalmente alterado com a descoberta de que a passagem de uma corrente elétrica através de um fio alterava a orientação de uma bússola próxima a ele. Esta observação foi feita por *Hans C. Oersted* em 1820⁵. Ele percebeu que quando um fio condutor é percorrido por uma corrente elétrica, surge em torno dele um campo magnético.

A Figura-1 ilustra as linhas de campo magnético produzidas por um fio condutor percorrido por uma corrente i .

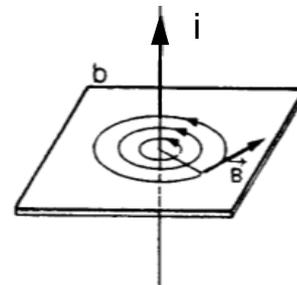


Figura 1
Fio retilíneo

⁴ Michaelis: Moderno dicionário da língua portuguesa, 1998.

⁵ Hans Christian Oersted, físico dinamarquês (1777 – 1851)

Força magnética sobre um condutor cilíndrico reto situado em um campo magnético uniforme

Quando um condutor cilíndrico é percorrido por uma corrente i , na presença de um campo magnético uniforme \mathbf{B} , surge uma força magnética \mathbf{F} sobre ele, que é igual à soma de todas as forças magnéticas que agem em cada partícula de carga q , que se move com velocidade v . O número de cargas no condutor é igual ao número de cargas por unidade de volume, n , multiplicada pelo seu volume, $V = Al$, onde A é a área transversal do fio e l seu comprimento. Logo, a força sobre o fio será:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})nAl = (nqvA) (\mathbf{l} \times \mathbf{B}) = i (\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

onde \mathbf{l} é o valor cujo módulo é o comprimento do fio l e sua direção e sentido são idênticos aos do vetor velocidade v .

Lei de Ampère - Ímãs permanentes

De forma similar ao caso anterior, onde elétrons percorrendo um fio condutor produzem um campo magnético, elétrons circulando em orbitais atômicos também podem produzi-lo, seguindo a mesma lei. Neste caso, os orbitais atômicos fazem a função do fio condutor.

Apesar destes movimentos serem muito complicados, podemos admitir neste modelo simples, que são equivalentes aos movimentos de elétrons em micro espiras fechadas no interior de um ímã permanente, como mostra a Figura-2.

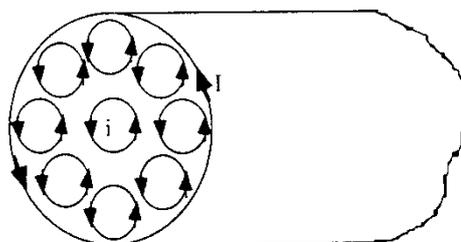


Figura-2: Modelo das correntes atômicas.

Suponhamos que todas as micro espiras, que aparecem na Fig. 3, são paralelas e percorridas por correntes de mesmo sentido, i . Quando o material é homogêneo, a corrente líquida no interior do material é nula, pois há o anulamento entre as correntes de micro espiras vizinhas. No entanto, uma vez que não ocorre o mesmo na superfície do corpo, o resultado é que as micro espiras externas produzem uma corrente superficial denominada *corrente de Ampère*, I . Esta corrente resultante, que percorre o cilindro no mesmo sentido das correntes existentes em cada micro espira, faz com que este pedaço de ímã permanente se comporte como o solenóide descrito no item anterior, Figura-3.

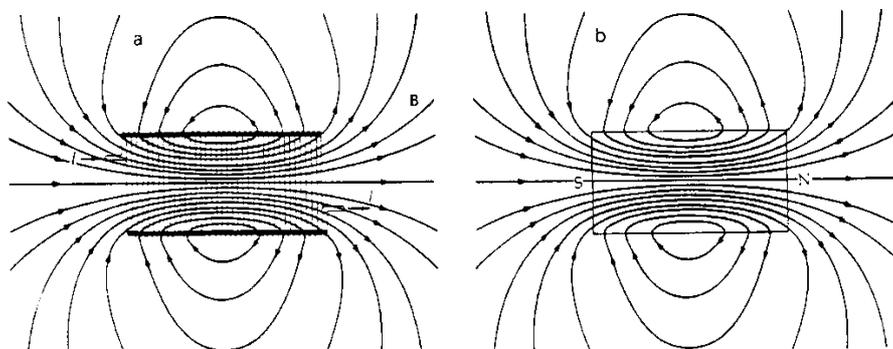


Figura-3:
(a) Linhas de campo magnético de um solenóide;
(b) De uma barra de ímã permanente.

Tanto o solenóide quanto a barra imantada apresentam uma estrutura comum: a presença dos dois pólos magnéticos norte e sul, os quais não surgem separadamente na natureza, por esta razão são denominados *dipolos magnéticos*. Logicamente, na presença de um campo magnético uniforme, todos os dipolos magnéticos sofrem um

torque e se orientam ao longo do mesmo de forma similar a agulha de uma bússola na presença do campo magnético terrestre.

Imantação de um material

Quando um campo magnético atua em um meio material qualquer, este meio sofre uma modificação e dizemos que ele se imanta (ou se magnetiza). Para entendermos em que consiste esta imantação, devemos nos lembrar de que existem, no interior de qualquer substância, correntes elétricas elementares, geradas pelos movimentos dos elétrons nos átomos constituintes da matéria. Estas correntes elementares criam pequenos campos magnéticos, de modo que cada átomo pode ser considerado como um pequeno ímã, ou seja, um ímã elementar, Figura-4, como já discutimos no item Lei de Ampère - Ímãs permanentes.

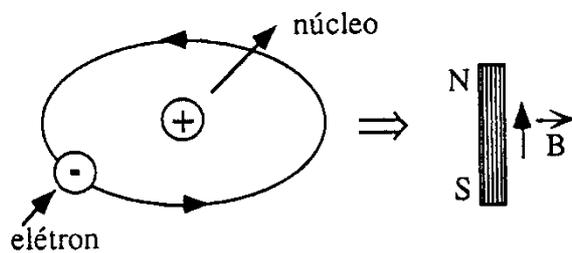


Figura-4: Um átomo pode ser considerado como um pequeno ímã elementar.

No interior de um material em seu estado normal (não magnetizado), estes ímãs elementares encontram-se orientados inteiramente ao acaso, Figura-5a, de modo que os campos magnéticos criados pelos átomos da substância tendem a se anular, sendo nulo o campo magnético resultante estabelecido pela totalidade destes ímãs elementares.

Entretanto, se este material for submetido a um campo magnético B , este campo atuará sobre os ímãs elementares tendendo a orientá-los, Figura-5b. Em virtude desta orientação, os campos magnéticos elementares dos átomos se reforçam e o material passa a apresentar efeitos magnéticos apreciáveis. Nestas condições, dizemos que a substância está imantada ou magnetizada, ou seja, o material passa a se comportar como um ímã.

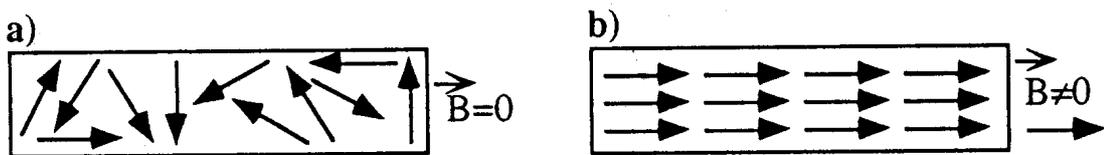


Figura-5: barra não imantada a) e imantada b).

De acordo com as reações das substâncias à presença de um campo magnético, elas podem se divididas em três grupos distintos:

- *Substâncias paramagnéticas*: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam de maneira a provocar um pequeno aumento no valor do campo magnético. Nestas substâncias, os ímãs elementares tendem a se orientar no mesmo sentido do campo aplicado e, portanto, o campo magnético estabelecido por eles terá o mesmo sentido do campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco maior do que o inicial. Quando o campo aplicado é desligado, o campo produzido pela substância também desaparece, indicando que a amostra desmagnetizou-se. Exemplos: alumínio, ar, cromo, estanho, platina, etc.

- *Substâncias ferromagnéticas*: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, se imantam fortemente, de modo que o campo magnético que elas estabelecem está ao longo do mesmo sentido do campo aplicado e possui uma intensidade muitas vezes maior que a dele. O campo magnético resultante pode se tornar centenas e até mesmo milhares de vezes maior do que o campo inicialmente aplicado. Quando o campo aplicado é desligado, campo produzido pela substância não desaparece, indicando que a amostra se manteve magnetizada. Para destruir as propriedades ferromagnéticas adquiridas por estas substâncias, devemos aquecê-las acima de uma certa temperatura, denominada *temperatura de Curie*. Exemplos: ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e ligas especiais (aço (X%Fe, Y%C), permalói (55%Fe, 45%Ni), metal mu (77%Ni, 16%Fe, 5%Cu, 2%Cu), ferro ao silício (96%Fe, 4%Si)).

- *Substâncias diamagnéticas*: são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, têm seus ímãs elementares orientados em sentido contrário ao do campo aplicado, implicando em um campo magnético resultante um pouco menor que o inicial. Quando o campo aplicado é desligado, o campo produzido pela substância também desaparece, indicando que a amostra desmagnetizou-se. Exemplos: bismuto, cobre, água, prata, ouro, chumbo, etc.

Força magnética entre dois condutores retos, extensos e paralelos.

Consideremos dois fios condutores retos, extensos e paralelos, percorridos por correntes i_1 e i_2 , separados por uma distância r , Figura-6.

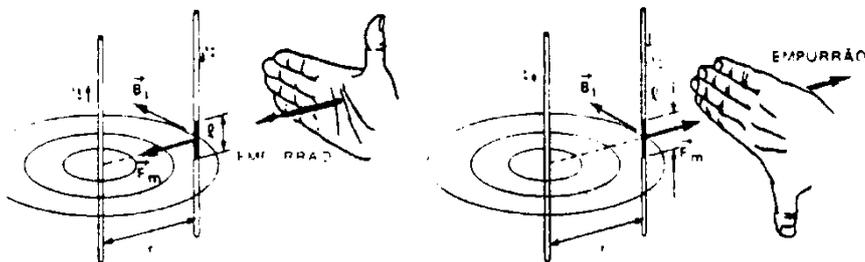


Figura-6:
Força entre condutores extensos e paralelos.

A corrente i_1 origina o campo magnético B_1 , de intensidade.

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi r} \tag{2}$$

na região em que se encontra o outro fio. De acordo com a eq. 1, B_1 será perpendicular ao comprimento do fio l e a força magnética que atuará sobre o segundo fio resultará na direção da perpendicular que une ambos. Se as correntes apresentarem o mesmo sentido, a força entre os fios será de atração e, se elas tiverem sentido contrário, a força será de repulsão, Figura-6.

Métodos

Como descrito no referencial teórico, uma bússola pode indicar direção e sentido da componente horizontal do campo magnético terrestre local, B_H . Quando, além deste campo, um outro campo, gerado por fios percorridos por correntes elétricas ou ímãs, estiver presente, a bússola indicará a direção e sentido do campo magnético resultante.

Se a direção do campo gerado por aquela segunda fonte for bem conhecida, poder-se-á determinar sua magnitude, B , a partir do conhecimento de B_H e da direção e sentido do campo resultante, B_R .

O procedimento experimental está esquematizado na Figura-7, onde

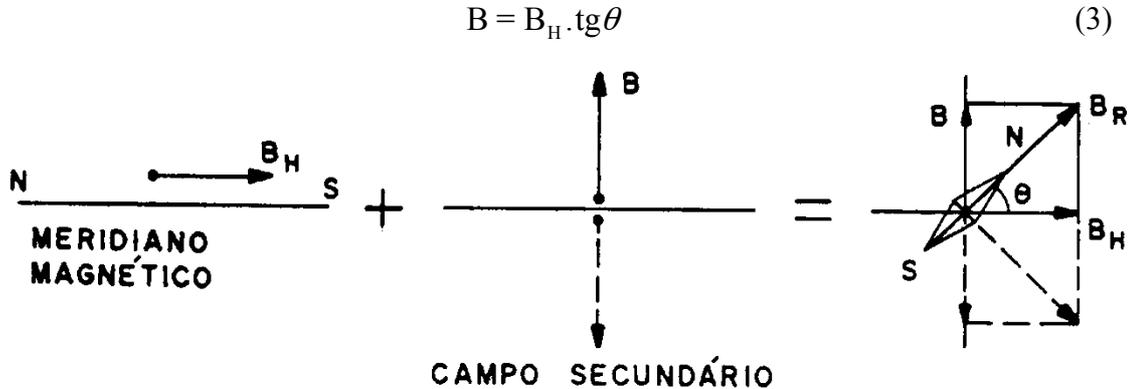


Figura-7: Procedimento experimental para a determinação da intensidade de um campo magnético, B , quando o mesmo possui direção perpendicular a B_H .

Deste modo, para o conhecimento de B é suficiente ter-se o valor de B_H e medir-se o ângulo θ .

Este resultado é válido desde que nenhuma outra fonte atue simultaneamente com aquela em estudo. Tais fontes indesejáveis poderiam ser ferragens **sobre (ou sob)** a mesa de trabalho, transformadores das fontes de corrente, ímãs permanentes (em alguns tipos de multímetros), fios percorridos por correntes, etc.

Determinação do campo magnético terrestre

A determinação da componente horizontal do campo magnético terrestre, B_H , poderá ser feita pelo processo inverso ao descrito acima.

Para isso, um campo magnético, B , ortogonal ao campo da terra será criado por um par de **bobinas de Helmholtz**. Este aparato, Figura-8, consiste em duas bobinas circulares coaxiais percorridas por correntes de mesmo sentido, cujos planos estão separados de uma distância igual ao raio das bobinas, r .

Cada bobina poderá constituir-se de um enrolamento compacto de N espiras.

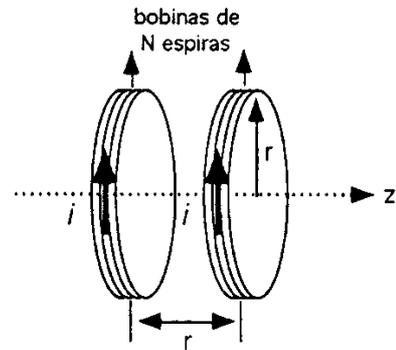


Figura-8: Bobinas de Helmholtz.

Este sistema é particularmente útil porque fornece um campo bastante uniforme em um volume relativamente grande na região central do par de bobinas, e cujo valor, no centro do mesmo, é dado pela expressão:

$$B = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 N_i I}{r} \sim 0,715 \frac{\mu_0 N_i I}{r} \quad (4)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$, N_i é o número de espiras da bobina e I a corrente que a percorre.

A razão para a lenta variação do campo na vizinhança do ponto central do par de bobinas de Helmholtz é que, com aquele espaçamento particular entre elas, $dB/dz = 0$ no referido ponto central (z é a variável medida a partir do centro e ao longo do eixo do par).

Uma vez conhecido o valor de B , utilizando-se a eq. 4, a magnitude da componente horizontal do campo magnético terrestre, B_H , será facilmente determinada, a partir da eq. 3.

Leis de Faraday e de Lenz

Até agora discutimos o fato de que correntes elétricas produzem campo magnético.

Veremos agora que campos magnéticos variáveis no tempo podem produzir corrente elétrica, a partir de duas Leis constatadas empiricamente. Para que possamos entender a Lei descoberta por Faraday, devemos inicialmente conhecer o conceito de fluxo magnético. Consideremos uma superfície plana imaginária, de área A , colocada dentro de um campo magnético uniforme \vec{B} . Traçando-se uma normal \vec{N} a esta superfície, designaremos por θ o ângulo formado por esta normal com o vetor \vec{B} , vide *Figura* ao lado.

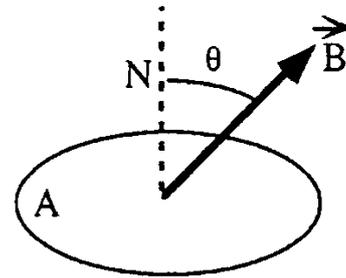


Figura 9- Definição das variáveis utilizadas na expressão do fluxo magnético

O fluxo magnético que percorre esta superfície é representado pela letra grega ϕ e definido pela seguinte expressão

$$\phi = BA \cos \theta \quad (5).$$

O conceito de fluxo magnético através de uma superfície pode ser interpretado em termos do número de linhas de indução que atravessam esta superfície. Quanto maior o número de linhas de indução que atravessam a superfície, maior será o valor do fluxo magnético.

Lei de Faraday

Se, ao invés de termos uma superfície plana imaginária submersa em um campo magnético, tivermos uma espira plana qualquer, constituída de um fio condutor de área A , dois fatos poderão ocorrer: *i)* se o fluxo magnético não se altera com o tempo nada ocorre; *ii)* se o fluxo magnético se altera, por um motivo qualquer em função do tempo, surgirá uma tensão elétrica na espira, denominada força eletromotriz induzida (*fem*), V , cuja intensidade é dada por

$$V = - \frac{d\phi}{dt} \quad (6).$$

A *fem* pode ser detectada através da corrente que percorre o circuito, ou por medida direta.

Lei de Lenz

O sentido da corrente elétrica induzida pela variação temporal do fluxo magnético é tal que, por seus efeitos produzidos, ele se opõe à causa que lhe deu origem. Este princípio foi enunciado por Heinrich R.E. Lenz em 1834, na Rússia. Matematicamente, a lei de Lenz é representada pelo sinal negativo que aparece na Eq.2 (lei de Faraday). Na verdade não existe diferença entre a lei de Lenz e a lei de Faraday, mas por motivos históricos atribui-se o sentido da corrente induzida a lei de Lenz.

Até agora consideramos apenas condutores em forma de fio, mas pode-se também obter correntes induzidas em condutores maciços, (*corrente de Foucault*), quando submetemos estes condutores a campos magnéticos variáveis. Já que um condutor maciço possui resistência elétrica muito pequena, as correntes de Foucault podem atingir intensidades muito elevadas.

Indutores

Quando uma corrente elétrica percorre um fio, um campo magnético \mathbf{B} é induzido em torno dele (*Lei de Ampère*) e por esta razão, o mesmo é denominado indutor. Em geral, um indutor é representado na forma de um solenóide. Vide Figura 02, abaixo.

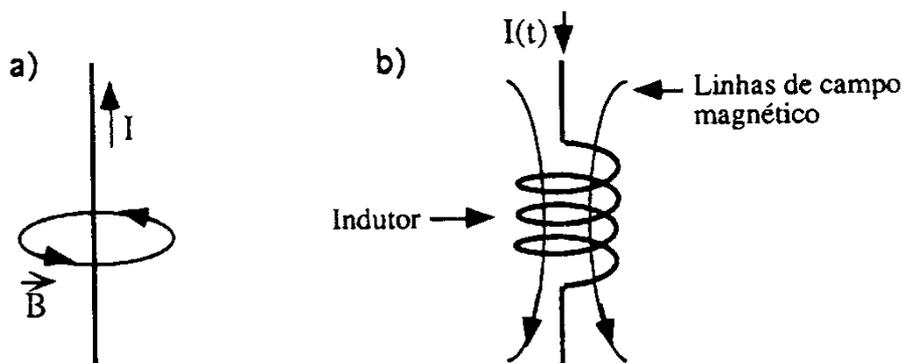


Figura 10-
Linhas de
campo
magnético
devido à
corrente
elétrica.

Enquanto esta corrente for constante no tempo, $dI(t)/dt = 0$, este campo magnético também será constante e não interferirá eletricamente no indutor. No entanto, se esta corrente variar no tempo, $dI(t)/dt \neq 0$, ocorrerão alterações de campo magnético, fato que induzirá uma tensão elétrica nos terminais do indutor (*Lei de Faraday*) dada por

$$V(t) = L \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

onde L é o fator denominado indutância, cuja unidade correspondente é o Henry.

I. Experimentos de Magnetismo

A) Linhas de campo magnético

Coloque uma folha de plástico transparente sobre um ímã. Em seguida, espalhe cuidadosamente (salpicando) limalha de ferro sobre a folha. Observe o que acontece.

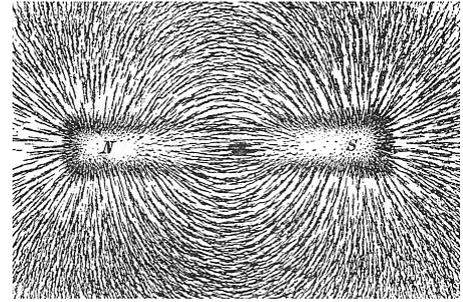


Figura 11

Uma **bússola** é um ímã permanente que tem liberdade de movimento num plano horizontal. Na presença de um campo magnético qualquer, a bússola aponta na direção deste campo. Por isto ela serve para orientar, indicar a direção N-S da Terra.

B) Experimento de Oersted

Neste experimento verificaremos o efeito magnético em um fio percorrido por uma corrente elétrica. Para isto usaremos a fonte de tensão com ligada ao fio, de tal forma a obter correntes $\sim 1A$ para facilitar a observação dos efeitos.

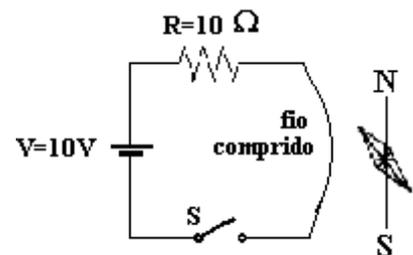


Figura 12

Coloque um fio (inicialmente sem corrente) sobre uma bússola alinhado-os na direção Norte - Sul (NS).

i) Aperte o botão da chave e observe o que ocorre com a bússola quando a corrente é ligada. Registre suas observações.

Obs: para observar este fenômeno é necessário uma corrente relativamente alta, por isso não deixe a fonte ligada (ou o botão apertado) por muito tempo.

ii) Repita os itens i) invertendo o sentido da corrente e registre o que ocorre.

iii) Repita os itens i) colocando agora bússola sob o fio e registre o que ocorre.

iv) Suspenda o fio de tal forma a que ele fique na vertical, ou seja, perpendicular ao plano da bancada. Segure a bússola suspensa bem próxima ao fio (serão necessárias pelo menos duas pessoas) e observe o que ocorre quando a corrente é ligada. Movimente lentamente a bússola ao redor do fio. Registre todas suas observações e discuta.

C) Campo magnético de uma bobina

Substitua o fio por uma bobina de 250 espiras. Com o auxílio da bússola (colocada a $\sim 5cm$ da bobina) investigue o campo magnético produzido pela bobina.

Obs: o campo produzido pela bobina é muito maior do que o campo de um único fio, por isso use baixas correntes ($\sim 0,1A$) e não aproxime muito a bússola da bobina.

- i) Aonde o campo da bobina é maior, na direção ao longo de seu eixo ou na direção perpendicular a ele?
- ii) Coloque a bobina de tal modo a que seu campo magnético fique perpendicular a direção do campo da terra (B_H), tal como ilustrado na Fig.7. Registre no relatório os vetores campo produzido pela bobina (B) e B_H . Na configuração anterior, coloque a bússola a ~ 20 cm do centro da bobina. Meça o valor da corrente que produza um campo magnético de valor igual a B_H .
- iii) O que ocorre com a direção do campo se o sentido da corrente for invertido? Repita a medida do item iii e compare o valor obtido com o do item iii). Discuta os resultados.

Apresentem seus resultados a um instrutor antes de continuar a prática.

D) Materiais magnéticos

- i) Você dispõe de diversos materiais na mesa que você pode inserir dentro da bobina para averiguar se eles influenciam o campo magnético produzido. Para verificar isto, repita o procedimento C.ii e C.iii e observe o que ocorre. Quais materiais aumentam, diminuem ou não influenciam o campo produzido pela bobina?
- ii) Coloque um pedaço de ferro dentro da bobina e repita o procedimento C.ii. Compare o valor da corrente obtido com o caso C.ii.

Apresentem seus resultados a um instrutor antes de continuar a prática.

E) Força magnética em um fio

- i) Coloque o fio junto a um ímã permanente e aperte o botão (rapidamente) para ligar a corrente. Observe a força entre o fio e o ímã.
- ii) Verifique o que ocorre se o sentido da corrente for invertido.
- iii) Verifique o que ocorre se o pólo do ímã for trocado.

G. Determinação do campo magnético terrestre

- i) O arranjo experimental, utilizando as **bobinas de Helmholtz**, está esquematizado na **Fig.-11**
- ii) O par de **bobinas de Helmholtz** deve ser posicionado de tal modo que o meridiano magnético local (**direção N-S**) **seja perpendicular** ao eixo das mesmas, e sua separação igual a seu raio r ;
- iii) Antes de ligar a chave C (chave liga/desliga da fonte d.c.), **gire o suporte da bússola** (eixo giratório no centro das bobinas, certificando-se que as bobinas estejam exatamente paralelas, faça este ajuste com a régua, observando de cima), até que sua leitura angular seja $\theta = 0^\circ$;

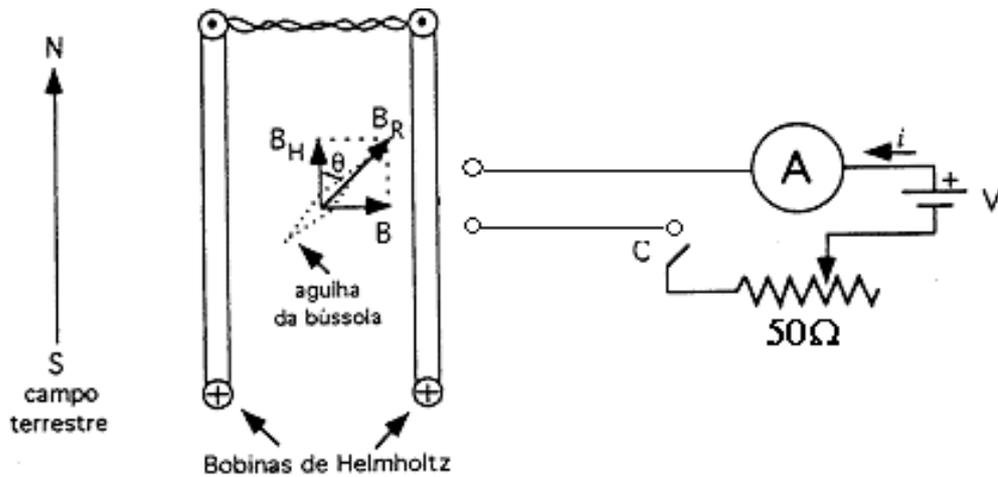


Figura-13: Arranjo experimental.

OBS: (Procure não deixar a fonte muito próxima das bobinas)

iv) Após ligar a chave C, ajuste a escala e borne do multímetro para mA. Meça a corrente i_1 , faça uso do potenciômetro para um ajuste fino de tal modo que o valor do ângulo indicado pela bússola seja $\theta = 45^\circ$. Anote o valor de i_1 ;

v) Inverta o sentido da corrente que circula pelas bobinas, invertendo os pólos da fonte d.c. (o multímetro digital indicará o sentido positivo (+) ou negativo (-) da corrente). Se for necessário, ajuste novamente o potenciômetro, de tal modo que o valor do ângulo indicado pela bússola seja $\theta = 45^\circ$. Faça a leitura do novo valor de corrente, i_2 ;

vi) Adote o valor médio: $\bar{i} = (i_1 + i_2) / 2$ para o valor da corrente, anote o valor do raio das bobinas de Helmholtz, r e o número de espiras $N=130$;

vii) Encontre o valor da componente horizontal do campo magnético local, B_H , utilizando as equações 3 e 4.

II. Indução Eletromagnética

a) Conecte uma bobina de 1000 espiras a um galvanômetro (ou amperímetro) e observe o que ocorre quando você aproxima um **ímã** (pólos nas faces maiores) da bobina. Figura 14.

i) você consegue induzir corrente elétrica na bobina?

ii) de que maneira isto ocorre mais eficientemente? Há corrente se o ímã estiver parado?

iii) quais fatores determinam a direção da corrente?



Figura 14 - Galvanômetro conectado à bobina

b) Movimente o ímã ao longo do eixo da bobina e observem:

i) o efeito da velocidade do ímã

- ii) o efeito da polaridade do imã
 - iii) o efeito da polaridade da bobina
- c) Conecte uma bobina de 1000 espiras a uma fonte DC usando uma chave normalmente aberta e ajuste $V=12V$. Conecte uma segunda bobina a um galvanômetro de zero central:
- i) com a fonte ligada, aproxime a segunda bobina (ligada ao galvanômetro) a primeira (ligada à fonte). Verifique se é possível induzir uma corrente na segunda bobina.
 - ii) quais fatores determinam a direção da corrente induzida?
 - iii) mantendo as duas bobinas fixas ($\sim 10cm$), observe o que ocorre quando você liga e desliga (*desconectando um dos cabos de ligação*) a primeira bobina ligada à fonte.
 - iv) com a fonte ligada (*corrente constante*) aproxime as duas bobinas e observe o que ocorre quando você movimentar a segunda bobina deixando a primeira parada e vice-versa. Há corrente induzida?
 - v) investigue o efeito da orientação entre as duas bobinas, girando uma delas de 90° em relação ao seu eixo magnético.
 - vi) Como a corrente induzida varia quando a corrente na primeira bobina varia? Para responder esta pergunta diminua a corrente na primeira bobina e observe o efeito da corrente induzida no galvanômetro.
- d) Repita o item c) colocando uma barra de ferro inicialmente na segunda bobina e depois na primeira.
- e) experimente introduzir em uma das bobinas uma barra de outro material, por exemplo, alumínio ou latão. Compare as induções.

Transformador:

Utilize o transformador 220V – 6,3V ligado em 110V para obter uma fonte AC de 3,8V.

Monte um transformador com duas bobinas, 1000, 500 ou 250 espiras em núcleo de ferro fechado (Figura 09). Seja N_1 o número de espiras do primário (da primeira bobina que está ligada em 3,8V) e N_2 o número de espiras do secundário (segunda bobina).

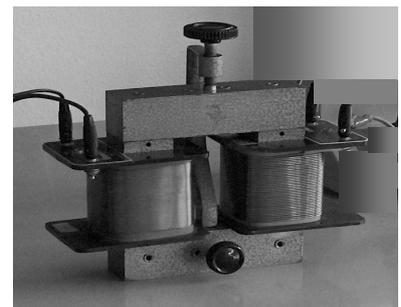


Figura 15 – Bobinas com núcleo de ferro fechado

Sejam V_1 e V_2 as tensões medidas com um voltímetro modo AC no primário e no secundário, respectivamente.

- a) Meça a relação V_2/V_1 para vários valores de N_1 e N_2 (essas bobinas podem ser trocadas para se obter outros valores).
- b) Para encontrar a relação entre V_2/V_1 e N_2/N_1 faça um gráfico de (V_2/V_1) versus (N_2/N_1) para verificar esta dependência com pelo menos 5 valores de N_2/N_1 .

Lista de materiais para esta prática.

Fonte de tensão variável
Fio condutor comprido
Bússola
Uma chave para circuitos
Um transformador
Um resistor de 10Ω
Um galvanômetro
2 bobinas (250 espiras e 1000 espiras)
Algum material de ferro
Bobinas de Hemholtz
Potenciômetro
Imã
Placa de circuitos