

EXPERIÊNCIA 5

MEDIDAS DA COMPONENTE HORIZONTAL DA INDUÇÃO MAGNÉTICA TERRESTRE

I - OBJETIVO:

Determinar o valor da componente horizontal da indução magnética terrestre local.

II - PARTE TEÓRICA:

INDUÇÃO MAGNÉTICA:

O instrumento mais antigo utilizado nas investigações dos fenômenos de origem magnética é a bússola. Consiste de uma agulha imantada que pode girar ao redor de um eixo perpendicular à sua direção. Ao girar, a ponta da agulha descreve uma trajetória circular compreendendo um ângulo θ que pode ser medido em uma escala graduada, de 0° a 360° por exemplo, sob a agulha. Marquemos uma das extremidades da agulha para que possamos distingui-la da outra.

Aproximando nossa bússola de uma barra imantada (ímã natural ou artificial), observaremos imediatamente que a agulha se movimentará e apontará para uma determinada posição fixa, quando pararmos de deslocar a bússola. Se tentarmos, manualmente, girar a agulha, observaremos também que a mesma volta para a sua posição fixa após ser liberada. Isso ocorre para todos os pontos do espaço, ou seja, em cada ponto do espaço a agulha apontará para uma determinada posição fixa.

Deslocando a bússola na mesma direção em que a agulha aponta, descreveremos uma trajetória ou linha. Partindo arbitrariamente, de diversos pontos do espaço teremos diversas linhas como mostra a figura 1:

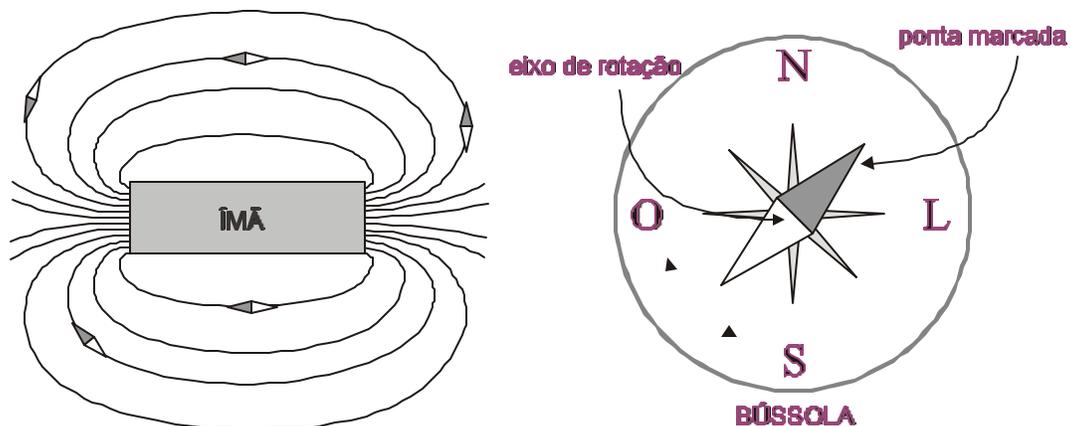


Fig. 1

Essas linhas são chamadas de "linhas de força" por razões históricas e parecem indicar uma perturbação do meio que circunda o ímã. Convencionou-se orientar essas linhas como se estivessem saindo de um extremo (ou pólo) da barra imantada para o outro extremo de acordo com a seguinte regra: estando a bússola longe do ímã, marca-se a ponta da agulha da bússola que estiver apontando, o mais próximo possível, do norte geográfico da Terra e convencionou-se a existência de um "pólo norte magnético" próximo ao pólo norte geográfico. Uma vez marcada a agulha, aproxima-se a bússola da barra imantada e toma-se como polo norte magnético da barra aquele que a agulha marcada estiver apontando. Convencionou-se então que as "linhas de força" são orientadas do polo norte para o polo sul.

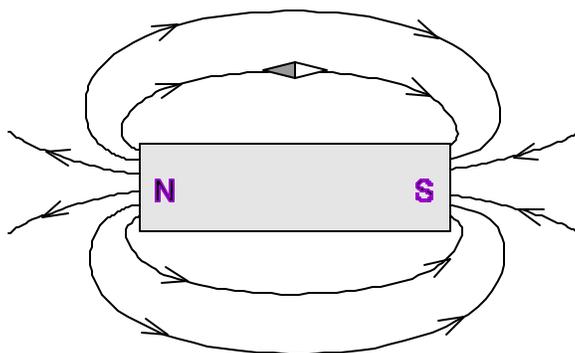


Fig. 2

Como mencionamos, a presença da barra imantada parece perturbar o meio ao seu redor, sendo desejável definir uma grandeza para medir essa perturbação. Essa grandeza é chamada de "indução magnética ou densidade de fluxo magnético" \vec{B} . Estamos agora interessados em quantificá-la. Para isso, algumas observações experimentais tornam-se necessárias.

Verifica-se experimentalmente que, estando uma bússola em repouso nas proximidades de um ímã, para afastar a agulha (girando) de sua posição de equilíbrio, de um ângulo θ medido entre a linha de força e a agulha, é necessário aplicar um torque externo e esse torque é proporcional ao seno do ângulo de giro.

$$|\mathbf{T}| \propto \text{sen } \theta \quad (1)$$

O torque é máximo quando a agulha for forçada a ficar perpendicular à linha de força ($\theta = 90^\circ$) e é zero quando ($\theta = 180^\circ$), sendo esta, uma posição de equilíbrio instável. Pode-se portanto, em princípio, utilizar um valor do torque (digamos, o torque máximo) como uma medida da perturbação (indução magnética B), em um determinado ponto do espaço. Verifica-se contudo que outras bússolas cujas agulhas possuem intensidade de imantação diferentes, produzem outros valores de torques máximos portanto seria necessário, então, existir uma bússola com "imantação padrão", para permitir uma medida da indução magnética a partir do torque máximo sobre a agulha. Essa não é uma solução prática para medir a indução magnética B , pois a falta de uma agulha

com imantação padrão permite apenas realizar medidas relativas entre dois ou mais pontos do espaço. Em todo caso, é possível definir o valor da indução magnética B pela medida do torque sobre uma determinada agulha imantada, de modo que o módulo do torque seja diretamente proporcional à indução magnética e ao seno do ângulo de giro.

$$|\vec{T}| \propto B \cdot \text{sen } \theta$$

Essa expressão pode se tornar uma igualdade pela introdução de uma constante que deverá estar associada com a intensidade da imantação da agulha, ficando então

$$|\vec{T}| = \mu \cdot B \cdot \text{sen } \theta$$

Em analogia ao campo eletrostático e suas linhas de força, se admitirmos uma natureza vetorial para a indução magnética \vec{B} , de tal modo que o vetor seja tangente às linhas de força em todos os pontos do espaço e se definirmos o vetor $\vec{\mu}$ como tendo a direção da agulha poderemos escrever a expressão em função de um produto vetorial.

$$\vec{T} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (2)$$

O processo de definição da indução magnética \vec{B} bem como sua natureza vetorial fica completamente esclarecido ao estudarmos os efeitos de um ímã sobre uma carga elétrica em movimento, ou seja, sobre uma corrente elétrica. Isso deverá ser visto na parte teórica do curso.

No Sistema Internacional MKS, o módulo de \vec{B} se expressa em Tesla (T), ou ainda em Weber por metro quadrado, (Wb / m^2) que é uma unidade equivalente. No sistema CGS, é o Gauss (G), e:

$$1\text{G} = 10^{-4}\text{T} = 100 \mu\text{T}$$

INDUÇÃO MAGNÉTICA TERRESTRE:

Num dado lugar da superfície da Terra, uma bússola procura sempre a mesma orientação e indica a mesma direção (veremos posteriormente que esta afirmação é somente aproximada). Portanto, em cada ponto da superfície da terra existe uma indução magnética \vec{B}_T . Se em vez de usarmos uma bússola comum, que se mova exclusivamente no plano horizontal, utilizarmos uma bússola que se mova no plano vertical, girando ao redor de um eixo horizontal, poderíamos notar também que a agulha desvia sempre do mesmo valor α em relação à horizontal. Por exemplo, a agulha seria vertical no Pólo Norte Magnético ($\alpha = 90^\circ$) e perfeitamente horizontal ($\alpha = 0^\circ$) no Equador Magnético. As duas bússolas precedentes determinam respectivamente a componente horizontal e a componente vertical da indução magnética terrestre local \vec{B}_T . No

experimento usaremos somente uma bússola de leitura da componente horizontal do Campo Magnético Terrestre (B_{TH}).

A análise da direção e intensidade da indução magnética terrestre mostra que, em primeira aproximação, a Terra pode ser comparada com uma grande barra imantada onde o Pólo Norte Magnético coincide, atualmente, com $73^\circ N$, $100^\circ O$, e o Pólo Sul Magnético com $68^\circ S$, $146^\circ L$ (na beira da Antártida). Na figura 3 representamos as linhas de força de tal ímã, e na figura 4, traçamos a direção e intensidade de \vec{B}_T .

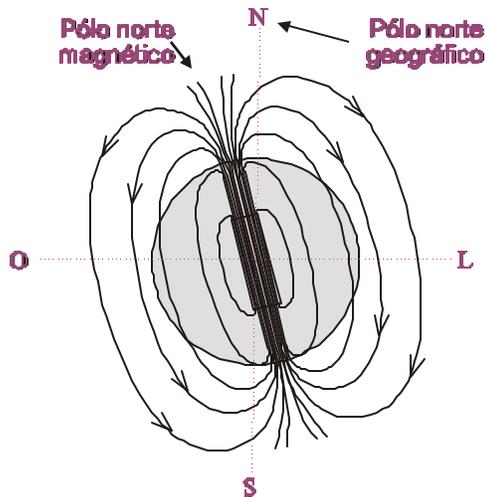


Fig. 3

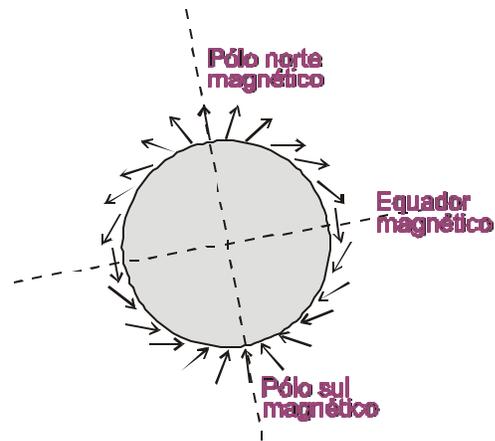


Fig. 4

OBSERVAÇÃO IMPORTANTE:

Vemos portanto, que a indução magnética \vec{B}_T da Terra atua em todos os pontos. Portanto, uma bússola próxima a um ímã, na superfície da terra, tende a se alinhar sobre a indução **resultante** \vec{B}_R . No ponto P genérico, a soma vetorial de \vec{B} devido ao ímã, com \vec{B}_T é dada por:

$$\vec{B}_R = \vec{B} + \vec{B}_T \quad (3)$$

Porém, se ficarmos na vizinhança (< 10 cm) do ímã, e se ele tiver forte magnetização ($\vec{B} \gg \vec{B}_T$), poderemos então desprezar a ação da indução magnética terrestre. Entretanto, nosso experimento vai consistir em compor uma indução \vec{B}_R , a partir da indução da Terra \vec{B}_T e de uma indução \vec{B} , conhecida, a 90° com \vec{B}_T , sendo:

$$|\vec{B}| \cong |\vec{B}_T| \quad \text{e} \quad \vec{B} \perp \vec{B}_T \quad (4)$$

A direção de \vec{B}_R será medida com uma bússola.

EFEITOS MAGNÉTICOS DA CORRENTE ELÉTRICA:

Se substituirmos o ímã permanente por um fio condutor, retilíneo, percorrido por uma corrente I , a bússola, mais uma vez, acusa a presença de uma indução magnética \vec{B} . Pela análise do torque sobre a agulha da bússola, se deduz que \vec{B} é proporcional à corrente I e inversamente proporcional à distância R do fio.

$$B \propto \frac{I}{R} \quad (5)$$

As linhas de força desse campo são círculos, centrados no fio, traçados em planos perpendiculares à direção do fio, figura 5.

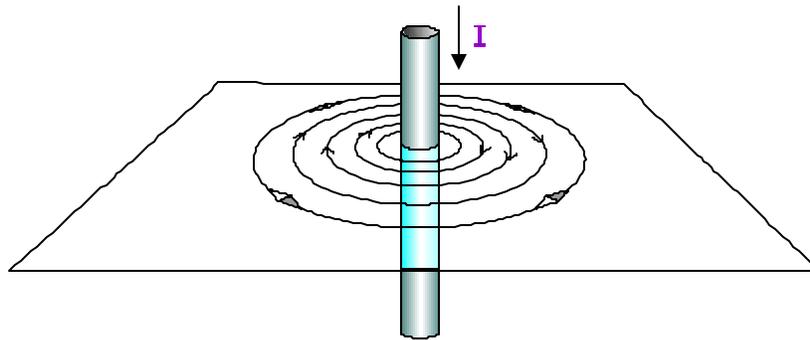


Fig. 5

A fim de poder calcular a indução magnética criada num ponto genérico P por um circuito elétrico de forma mais complicada que o simples fio retilíneo, precisamos saber qual é a contribuição $d\vec{B}$ ao valor de \vec{B} devida a um "elemento de circuito" de comprimento $d\ell$, percorrido por uma corrente I .

Evidentemente, esse elemento de circuito ("elemento" deve ser entendido aqui com o seu sentido matemático) não tem existência física real, já que ele foi extraído pela imaginação de um circuito real, completo, fechado. Mesmo assim, vamos supor que esse elemento é suficientemente pequeno para ser confundido com a sua corda, ou com a sua tangente, isto é, um segmento reto. Esse elemento é orientado pela corrente que o atravessa, figura 6.

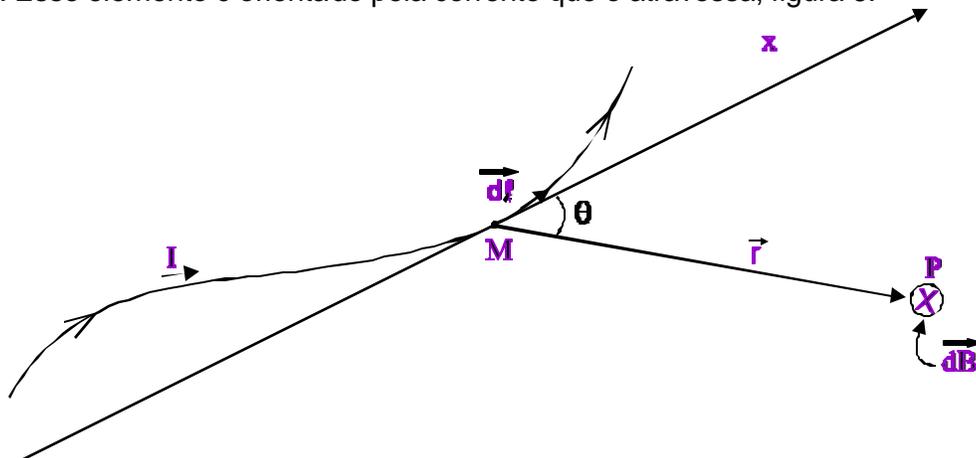


Fig. 6

A lei de Biot-Savart (que você estudará, ou talvez já tenha estudado na aula teórica) dá o módulo da contribuição $d\vec{B}$ no ponto P.

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\ell \cdot \sin \theta}{r^2} \quad (6)$$

A direção de $d\vec{B}$ é perpendicular ao plano (xMP). O seu sentido foi representado na mesma figura 6.

Vetorialmente, a lei acima se escreve:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{1}{r^2} \cdot d\vec{\ell} \times \frac{\vec{r}}{r} \quad (7)$$

ou ainda,

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3} \quad (8)$$

onde $\frac{\vec{r}}{r}$, é o vetor unitário da direção \overline{MP} , e μ_o é uma constante que vale, no vácuo e no ar, $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$ (ou Henry por metro, H / m).

Evidentemente, a indução magnética total \vec{B} no ponto P devida à totalidade do circuito será escrita por uma integração vetorial que representa a soma vetorial de todas as contribuições infinitesimais de todos os elementos que constituem o circuito.

$$\vec{B} = \int_{\text{circuito}} d\vec{B} \quad (9)$$

INDUÇÃO MAGNÉTICA CRIADA POR UMA ESPIRA CIRCULAR:

No experimento vamos compor a indução magnética \vec{B} de uma bobina circular, constituída de N espiras de fio condutor percorrida por uma corrente I , com a indução magnética terrestre a 90° no espaço. Precisamos, primeiramente, calcular o valor da indução magnética devido a uma única espira circular de raio R , num ponto P situado no eixo da espira, a uma distância x do centro, figura 7. Para isto, vamos supor a espira dividida num grande número de elementos. A rigor, quando estamos substituindo cada elemento por sua corda, como já dissemos, estamos substituindo a espira circular por uma espira

poligonal. No caso do número de elementos tender para o infinito, o polígono tende para um círculo.

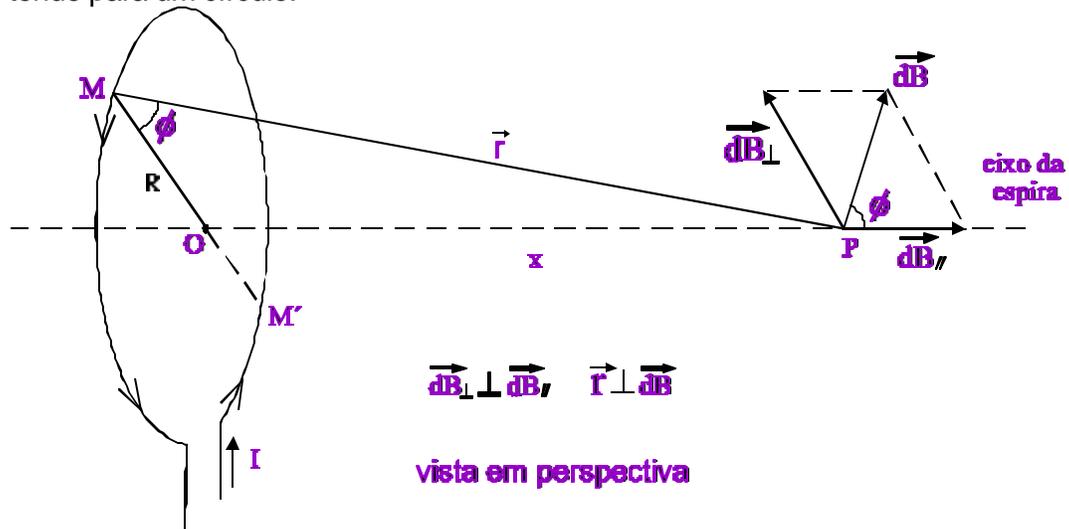


Fig. 7

Aplicando a lei de Biot-Savart ao elemento arbitrário centrado em M, vemos que $d\vec{B}$ é perpendicular a \vec{MP} , e perpendicular à direção $d\vec{\ell}$ (compare com a figura 6), portanto ele pertence ao plano (OMP). Vamos decompor $d\vec{B}$ em componente normal ao eixo OP, $d\vec{B}_\perp$ e componente paralela a OP, $d\vec{B}_\parallel$. Para cada elemento M, existe um elemento simétrico M', como mostrado na figura 7, cuja contribuição $d\vec{B}'$ é a simétrica de $d\vec{B}$ em relação ao eixo OP. Portanto, a soma vetorial de $d\vec{B}$ com $d\vec{B}'$ não possui componente perpendicular:

$$d\vec{B} + d\vec{B}' = 2 d\vec{B}_\parallel \quad (10)$$

Assim, a indução total deve ser inteiramente paralela ao eixo OP, o que é evidente já que o problema estudado apresenta simetria de revolução ao redor deste eixo.

Calculemos $d\vec{B}_\parallel$:

$$d\vec{B}_\parallel = d\vec{B} \cdot \cos \phi \quad (11)$$

$$d\vec{B}_\parallel = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\ell}{r^2} \cdot \text{sen}(d\vec{\ell}, \vec{r}) \cdot \cos \phi \quad (12)$$

$$\text{sen}(d\vec{\ell}, \vec{r}) = \text{sen} \frac{\pi}{2} = 1$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{d\ell}{r^2} \cdot \cos \phi$$

Por outro lado,

$$\cos \phi = \frac{R}{r}$$

$$r = \sqrt{R^2 + x^2} = (R^2 + x^2)^{1/2}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{R}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \cdot d\ell \quad (13)$$

Integrando ao longo do circuito (a espira), temos:

$$B = \int_{\text{espira}} dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot I \cdot \frac{R}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \cdot \int_{\text{espira}} d\ell \quad (14)$$

NOTE BEM:

A soma vetorial ao longo do circuito se tornou mera soma escalar. Com efeito, todas as contribuições $d\vec{B}$ foram colineares.

Como:

$$\int_{\text{espira}} d\ell = 2 \cdot \pi \cdot R$$

Chegamos ao resultado final:

$$B = \frac{\mu_o}{2} \cdot I \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (15)$$

A direção de \vec{B} é dada pelo eixo de simetria OP da espira, perpendicular ao plano desta.

No caso de uma bobina de raio R, constituída de N espiras juntas e sendo o comprimento desta bobina muito inferior à distância x, a indução magnética no eixo será dada por:

$$B = \frac{\mu_o}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (16)$$

VARIAÇÕES NA POSIÇÃO DO PÓLO NORTE MAGNÉTICO DA TERRA:

A posição do Norte Magnético Terrestre não é fixa, varia no tempo. Podemos distinguir um movimento "rápido", com um período da ordem de 500 anos e um movimento lento. O movimento rápido parece consistir numa precessão ao redor do Pólo Norte Geográfico, o Norte Magnético descreve um círculo grosseiramente centrado no Norte. O movimento lento não foi ainda determinado com certeza, mas o estudo do paleogeomagnetismo parece indicar que entre o pré-cambriano e hoje, o que representa aproximadamente 10^9 anos, teriam acontecido várias centenas de inversões da indução magnética terrestre.

ORIGEM DA INDUÇÃO MAGNÉTICA TERRESTRE B_T :

A indução magnética terrestre é composta essencialmente da superposição de dois campos: um **CAMPO PRINCIPAL**, ligado à própria Terra, e um **CAMPO EXTERNO**, devido à Ionosfera, e muito mais fraco que o campo principal.

A origem do **Campo Principal** ainda não foi estabelecida com segurança. Uma das teorias mais felizes admite que o núcleo da Terra, formado de ferro e níquel líquidos sofre um movimento de convecção. Foi calculado que esse movimento não precisa ser muito rápido e que velocidades relativas em relação a superfície da Terra da ordem de 1 mm/s bastam para assegurar a indução magnética da Terra. Com efeito, esse núcleo condutor girando, numa indução magnética \vec{B}_T , comporta-se como um dínamo auto-excitado (como num gerador de carro, a corrente fornecida por este passa por bobinas condutoras que reforçam a indução magnética, o que aumenta a corrente fornecida, etc.).

Lembramos que o deslocamento de um meio condutor numa indução magnética cria uma fem (veja o experimento sobre a Lei de Faraday). Como o núcleo apresenta uma certa resistência, pela lei de Ohm, vemos que circula uma corrente I nesse núcleo. Pela lei de Biot-Savart, essa corrente cria uma indução magnética. Há auto-excitação quando essa indução reforça a indução magnética inicial. A análise desse processo é difícil, e faz intervirem equações elétricas (fem, corrente, lei de Ohm, dissipação Joule) com equações da hidrodinâmica (viscosidade, movimento de convecção num sistema em rotação, forças magnetohidrodinâmicas).

No sistema gerador auto-excitado descrito, a indução magnética e a corrente crescem até atingir o equilíbrio onde toda a energia gerada é dissipada em calor pelo efeito Joule e pelo atrito (viscosidade do núcleo).

A origem do **Campo Externo** é causada pelos movimentos das cargas da Ionosfera, devidos essencialmente à atividade solar associada à rotação da Terra. Portanto, a indução magnética terrestre sofre pequenas variações cíclicas com período de 24 horas. O ciclo lunar exerce também a sua influência. Além dessas variações regulares, aparecem variações acidentais, correspondentes a tempestades solares, quando chegam à Ionosfera jatos de partículas expelidas pelo sol.

Enfim, a direção geral da indução magnética terrestre \vec{B}_T pode ser localmente alterada por jazidas metálicas, por exemplo, o que constitui as famosas anomalias magnéticas procuradas pelos geólogos.

III - TEORIA DA MEDIDA:

Colocamos, figura 8, uma bobina de uma espira, percorrida por uma corrente I , de tal maneira que o seu eixo seja orientado na direção Oeste Magnético - Leste Magnético. Isto é, o plano da bobina é vertical (Zenite - Nadir), orientado na direção Norte Magnético - Sul Magnético. Num ponto P do eixo, a uma distância x do centro da bobina, a indução Magnética resultante, figura 9, será a soma vetorial da indução devida à bobina com a indução magnética terrestre. Neste ponto P , vamos colocar uma bússola que vai se alinhar com a componente horizontal \vec{B}_{RH} da indução resultante, ou seja:

$$\vec{B}_{RH} = \vec{B}_{TH} + \vec{B} \quad (17)$$

Onde \vec{B}_{TH} é a componente horizontal da indução magnética terrestre.

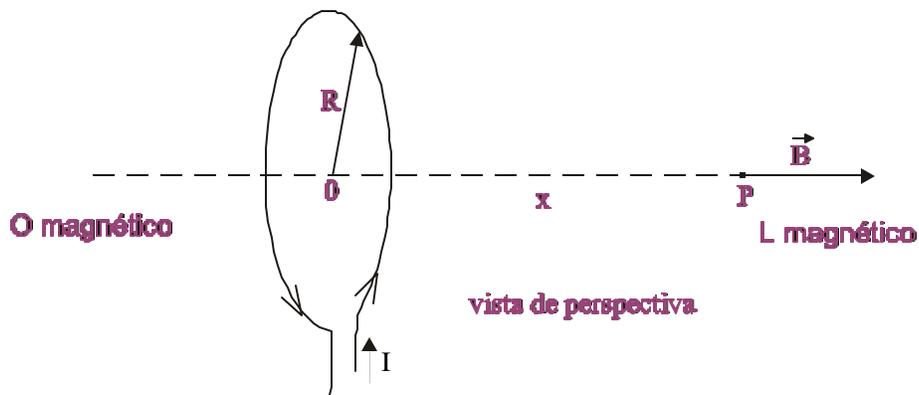


Fig. 8

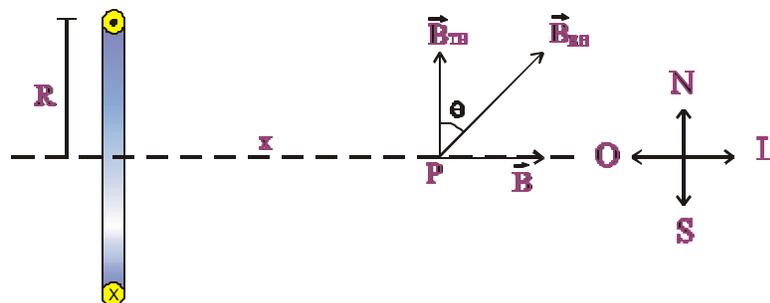


Fig. 9

Quando a corrente I atravessa a bobina, a bússola se alinha sobre a direção \vec{B}_{RH} sofrendo portanto uma deflexão θ em relação à direção \vec{B}_{TH} para onde anteriormente apontava quando não havia corrente circulando na bobina.

Estudo em Função da Corrente I , Método da Tangente

Pela figura 9 temos:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{B}{B_{TH}} \quad (18)$$

Vamos substituir B pelo valor dado pela equação 16.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{B_{TH}} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (19)$$

Num ponto P fixo, vemos portanto que $\operatorname{tg} \theta$ é proporcional à corrente I que circula na bobina

$$\operatorname{tg} \theta = k \cdot I \quad (20)$$

e o coeficiente angular k é dado por:

$$k = \frac{1}{B_{TH}} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (21)$$

No experimento, você terá que traçar o gráfico de $\operatorname{tg} \theta$ em função da corrente I para uma distância fixa x . O valor do coeficiente angular k da reta obtida permite determinar o valor da componente horizontal \vec{B}_{TH} da indução magnética terrestre, no ponto P .

Estudo em Função da Distância x , Método da Cotangente

Reescrevemos a equação 18 da maneira seguinte:

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{B_{TH}} \cdot \operatorname{cotg} \theta \quad (22)$$

ou seja,

$$\frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{1}{N \cdot I} \cdot \frac{(R^2 + x^2)^{3/2}}{R^2} = \frac{1}{B_{TH}} \cdot \operatorname{cotg} \theta \quad (23)$$

68

ou ainda,

$$R^2 + x^2 = \left(\frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{B_{TH}} \right)^{2/3} \cdot (\cotg \theta)^{2/3} \quad (24)$$

Logaritmando a equação 24, temos:

$$\log (R^2 + x^2) = \log \left(\frac{\mu_0}{2} \cdot NI \cdot \frac{R^2}{B_{TH}} \right)^{2/3} + \frac{2}{3} \log (\cotg \theta)$$

Fazendo:

$$Y = \log (R^2 + x^2)$$

$$K = \log \left(\frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{B_{TH}} \right)^{2/3} \quad (25)$$

$$X = \log (\cotg \theta)$$

Chegamos finalmente a:

$$Y = \frac{2}{3} X + K \quad (26)$$

Portanto, se traçarmos o gráfico de Y em função de X, devemos encontrar uma reta com inclinação constante igual a 2/3. No caso particular onde $X=0$, ou seja $\theta = 45^\circ$, teremos:

$$Y = K$$

Logo,

$$(R^2 + x^2) = \left(\frac{\mu_0}{2} \cdot N \cdot I \cdot \frac{R^2}{B_{TH}} \right)^{2/3}$$

Sendo X o valor correspondente a $\theta = 45^\circ$.

Dessa expressão, podemos determinar, mais uma vez, o valor de B_{TH} .

IV - PARTE EXPERIMENTAL:

LISTA DE MATERIAL:

- bancada de medida constituída de uma mesa para a bússola e

- de um suporte deslizante para a bobina
- bússola graduada em graus
- bobina
- medidor multi-escala usado como amperímetro
- reostato
- década de resistores
- fonte de tensão
- chave liga - desliga
- chave inversora
- placa de ligação
- fios

CUIDADOS COM OS EQUIPAMENTOS:

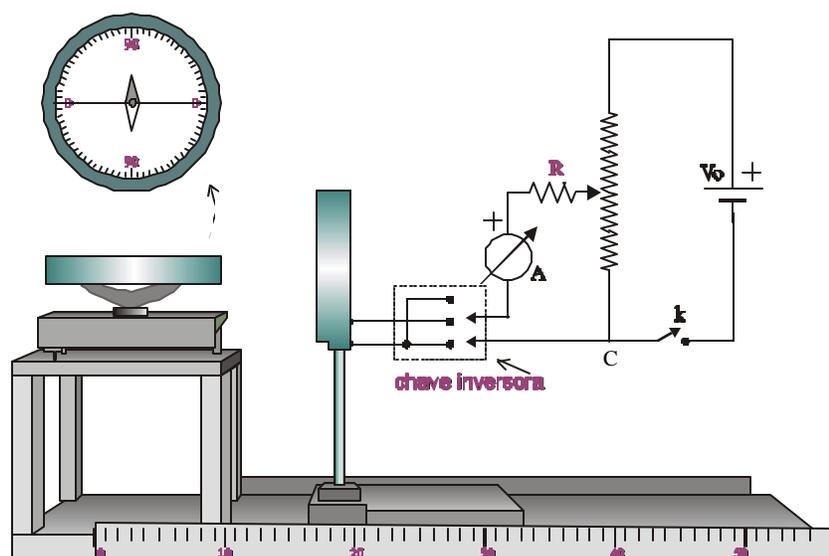
A bússola é muito frágil; não a desloque sem necessidade. Ela normalmente se encontra exatamente no eixo da bobina. Verifique este alinhamento e a sua horizontalidade.

Cuidado com os efeitos magnético parasitas que perturbam a medida. Por exemplo, você deve verificar que o miliamperímetro se encontra a mais de um metro da bússola, senão a indução magnética do seu ímã será notada por esta.

Afaste o telefone celular, mesmo desligado da bancada.

MONTAGEM EXPERIMENTAL:

A bancada e o circuito são apresentados na figura 10. Uma régua, representada na figura, permite medir a distância x entre o centro da bússola e o plano da bobina (não esqueça de expressar esta distância x em metro).



MEDIDAS:***IV.1 - Medidas com a Distância (x) Constante.***

✍ Anote o diâmetro médio da bobina e seu número de espiras.

✍ Anote os desvios dos medidores utilizados.

☞ Arme o circuito da figura 10, tomando o cuidado para que o cursor do reostato esteja no ponto c. Utilize a máxima escala do amperímetro.

☞ Para a distância x , a menor possível (anote esse valor), meça, para diferentes valores da corrente I , o valor do ângulo θ de deflexão da bússola. Para cada medida de I , inverta o sentido da corrente, mudando a posição da chave inversora e meça o valor de θ' . Coloque os dados em uma tabela onde deve constar a corrente medida, θ e θ' .

IV.2 - Medidas com Corrente I Constante

☞ Coloque o valor da primeira corrente, indicada pelo professor, no multiteste.

☞ Meça, para diferentes valores da distância x , os ângulos de deflexão θ da bússola. Para cada medida de x , inverta o sentido da corrente na bobina com a chave inversora. Faça as suas medidas até o limite de deflexão θ de 5° . Execute o mesmo procedimento para mais duas outras correntes indicadas pelo professor.

IV.3 - Observação do Comportamento do Ângulo de Deflexão com a Variação Angular da Bobina

☞ Para a distância x a menor possível e para a corrente I da ordem de 50 mA, observe e anote o que acontece quando você gira a bobina, **de um pequeno ângulo**, ao redor de seu eixo vertical no sentido horário e depois, no sentido anti-horário.

V - RELATÓRIO:

- Das medidas feitas em IV.1, trace em papel milimetrado o gráfico de $\text{tg } \bar{\theta}$ versus I , onde:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta + \theta'}{2} \quad (27)$$

- Trace a reta que melhor se ajuste aos pontos conseguidos. Determine no gráfico a inclinação desta reta. Com qual unidade ela se expressa?

- A partir da inclinação da reta obtida acima, calcule o valor da componente horizontal \bar{B}_{TH} , da indução magnética terrestre.

- Utilizando agora o método dos mínimos quadrados (Anexo), determine novamente a reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais, indicando ainda o valor do coeficiente de determinação da reta. Qual a inclinação da reta de melhor ajuste?

- Determine novamente o valor de \bar{B}_{TH} a partir da inclinação da reta obtida por este método. Compare este valor com o determinado anteriormente. Qual a melhor determinação de \bar{B}_{TH} ? Justifique!

- A partir das medidas feitas em IV.2, trace, em um mesmo papel bi-log, os valores de $(R^2 + x^2)$ versus $(\cotg \bar{\theta})$ para cada um dos valores de corrente, sendo $\bar{\theta}$ calculado como na equação 27.

- Utilizando o método dos mínimos quadrados, encontre as retas que melhor se ajustam aos pontos experimentais para cada um dos valores de corrente. Indique em cada caso o coeficiente de determinação da reta obtida.

- Compare os coeficientes angulares das três retas obtidas com o valor teórico (2/3). Para qual valor de corrente o coeficiente angular é melhor determinado?

- A partir dos coeficientes lineares das três retas obtidas encontre os três valores da constante K. Calcule os valores correspondentes de B_{TH} .

- Calcule a média dos três valores obtidos por este método e compare com o valor determinado a partir das medidas do item IV.1. Discuta detalhadamente os resultados encontrados.

- Compare os valores de B_{TH} obtidos nos dois métodos com o valor indicado no Anexo. Discuta os resultados encontrados.

- A partir da equação de número 16 e para a máxima corrente utilizada, construa o gráfico de B versus x, da origem até a distância máxima usada no experimento. O que podemos concluir a respeito do comportamento de B?

- Justifique, pela lei de Biot-Savart porque a indução B criada no eixo da bobina aumenta se o seu raio diminui.

- Interprete, com auxílio de uma análise gráfica, os resultados do item IV.3.

- Você mediu a deflexão θ da bússola para uma certa corrente I e distância x , constantes. Posteriormente, inverteu o sentido dessa corrente. Explique porque o valor encontrado para a deflexão deve ser, $(\theta' = -\theta)$.

- Analise e interprete todas as razões possíveis que fariam θ' diferente de $-\theta$.

- Calcule o erro cometido na determinação de B_{TH} , medidos pelos dois métodos IV.1- **distância constante** e IV.2- **corrente constante**.

VI - LEITURA RECOMENDADA:

TIPLER, Paul A. Física, 2.ed, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1984. v.2a, p. 729 - 733.

MEINERS, Harry F, EPPENSTEIN, Walter, MOORE, Kenneth. Laboratory Physics, N.Y: John Wiley and Sons, Inc, 1969. p. 280 - 283.

WESTPHAL, Wilhelm H. Prácticas de Física, 2.ed. Barcelona: Editorial Labor, S.A, 1965. v.3, p. 235 - 241.