

## **Medidas de campos magnéticos**

### **Objetivo do experimento:**

A finalidade do experimento é investigar o campo magnético entre as peças polares de um eletroímã, como função da corrente magnetizante e também função da distância ao eixo.

### **Material:**

1. Eletroímã ( $I_{\max}$  1.5 A), com peças polares cilíndricas.
2. Fonte de alimentação CENCO 50 V DC, 5 A.
3. Multiteste Minipa ET-2080, 0 - 20 A, DC (medida da corrente do imã).
4. Multiteste Minipa ET-2080, 0 - 400mA, DC (medida da corrente da indutância mútua padrão).
5. Fonte de tensão ajustável SME.
6. Chave inversora (Relê acionado por “toggle flip-flop”).
7. Indutância mútua padrão.
8. Galvanômetro balístico WPA EDSPOT.
9. Bobina de prova, com N espiras.
10. Resistência de proteção

### **TEORIA DA MEDIDA**

A medida da indução magnética  $B$ , que abordaremos a seguir, está baseada na lei de Faraday e nas propriedades de integração de carga de um galvanômetro do tipo balístico.

Consideremos uma bobina com um número de espiras  $N$ , conhecidas e cuja área de uma espira é  $S$ . O fluxo  $\Phi$ , do vetor indução magnética, através desta bobina é

dados por:  $\Phi = B N S \cos \varphi$ , onde  $B$  é a indução magnética ( em  $\text{Wb/m}^2$  ),  $\varphi$  é o ângulo entre as linhas de indução e o eixo da bobina. Ver Fig1.

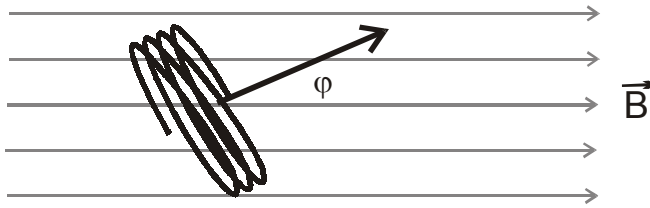


Fig. 1

Suponhamos que a bobina esteja imersa num campo de indução magnética. Quando desligamos esse campo de indução magnética num tempo finito ou retiramos a bobina desse campo, o fluxo decresce do valor inicial  $\Phi_0$  até zero. A medida em que o fluxo varia no tempo, aparece uma força eletromotriz induzida na bobina  $\varepsilon = -\frac{d\Phi(t)}{dt}$ .

Se os terminais da bobina estão ligados a um circuito fechado com resistência total  $R$  (incluindo a própria resistência da bobina) uma corrente flui durante o processo de desaparecimento do fluxo magnético.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

A carga total que passa através do circuito fechado é obtida por integração

$$Q = \int_{t=0}^{t=\infty} I dt. \text{ Contando o tempo a partir do instante } t = 0 \text{ quando o fluxo magnético } \Phi_0$$

começa a cair, chegamos a:  $Q = -\frac{1}{R} \int_0^{\infty} \frac{d\Phi}{dt} dt = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_0}^0 d\Phi = \frac{\Phi_0}{R}$ . É importante observar

que a carga total não depende da forma de  $\Phi(t)$ , mas tão somente dos valores inicial e final do fluxo.

Podemos medir a carga total  $Q$  inserindo um galvanômetro balístico em série com a bobina. Esse galvanômetro possui uma bobina móvel com um momento de inércia muito elevado. Ao contrário dos galvanômetros convencionais, o período de oscilação da bobina é muito longo, da ordem de dezenas de segundos. Esse galvanômetro tem a propriedade de integrar uma corrente impulsiva dando como resultado um deslocamento angular  $\alpha$  da bobina móvel proporcional à carga total. A condição necessária para que isso ocorra é que o tempo de duração da corrente seja muito menor que o período de oscilação da bobina móvel. Normalmente, um pequeno

espelho acoplado à bobina móvel reflete uma imagem luminosa de um retículo sobre uma escala graduada onde podemos fazer a leitura do deslocamento.

Ao ligarmos um galvanômetro balístico em série com a bobina, a deflexão causada pela passagem da carga é proporcional ao fluxo magnético inicial e portanto à indução magnética  $B$ . Se desejarmos determinar o valor absoluto de  $B$ , devemos calibrar o galvanômetro. É conveniente realizar a calibração fazendo uso de uma indutância mútua padrão (ver a figura 2).

Uma fonte DC de tensão ajustável é conectada a uma chave inversora de polaridade e alimenta o primário de um transformador com núcleo de ar (indutância mútua padrão). Essa fonte estabelece uma corrente no primário cujo valor final é definido pelo valor da tensão e pela resistência do circuito primário. A chave inversora permite fazer uma inversão rápida no sentido da corrente primária. A corrente no primário do transformador estabelece um fluxo de indução magnética que se acopla ao secundário do transformador pois as bobinas primária e secundária são enroladas com espiras muito próximas umas das outras, sobre a mesma fôrma (com núcleo de ar).

De acordo as leis do eletromagnetismo, o fluxo no secundário é produzido pela corrente no primário  $I_1$  e pela corrente no secundário  $I_2$ . A resistência do circuito do secundário é suficientemente grande para que possamos desprezar  $I_2$  com relação a  $I_1$  ( $I_2 \ll I_1$ ) de modo que o fluxo no secundário pode ser escrito como

$$\Phi_2 = M_{12} I_1$$

onde  $M_{12}$  é a indutância mútua entre as bobinas primária e secundária. Esse é um parâmetro conhecido que depende apenas da geometria de construção das bobinas.

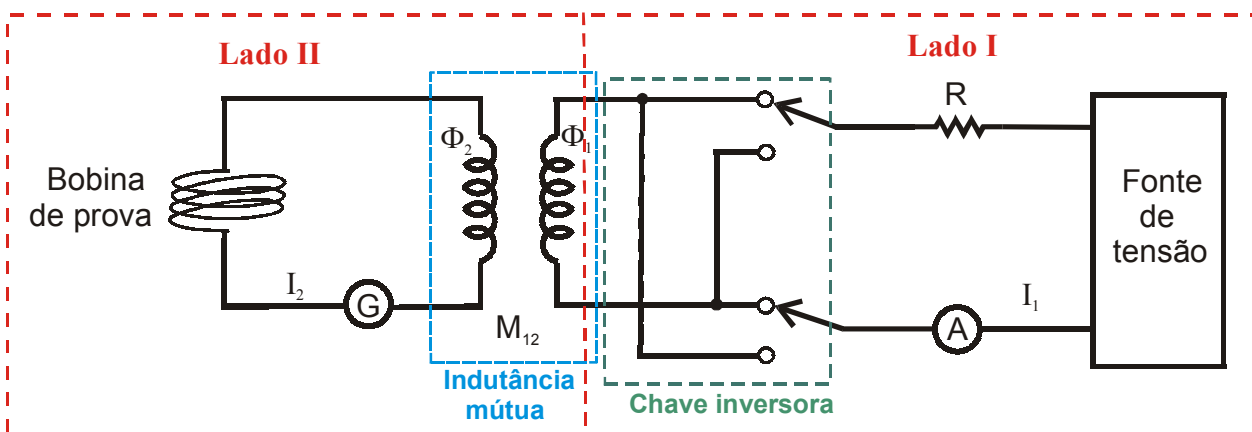


Fig. 2. Circuito de calibração do galvanômetro

Iniciando com uma corrente  $I_1$  e em seguida invertendo-se o sentido da corrente de  $I_1$  para  $-I_1$  por meio da chave de inversão, a variação total do fluxo magnético no

secundário será  $2 M_{12} I_1$ . Pelas razões anteriormente discutidas, circulará então uma carga  $Q' = (1/R \cdot 2 M_{12} I_1)$  através do secundário. Pelo fato da deflexão no galvanômetro balístico ser proporcional à carga total que passa através dele, teremos  $\alpha = C_b Q$ , onde  $\alpha$  é o ângulo de deflexão e  $C_b$  é a constante balística do galvanômetro. O ângulo de deflexão  $\alpha_1$  ao invertermos a corrente será então:

$\alpha_1 = 2C_b M_{12} I_1 / R$ , sendo  $R$  a resistência total do circuito secundário.

A constante balística não é conhecida mas seu valor também aparece quando retiramos rapidamente a bobina de prova da região entre os pólos do eletroímã onde havia um campo de indução magnética  $B$  e um fluxo  $\Phi_0$ .

Sendo  $\alpha_0$  o ângulo de deflexão obtido ao retirar a bobina da região de fluxo  $\Phi_0$ , teremos:

$\alpha_0 = C_b \Phi_0 / R$ , onde  $\Phi_0 = B N S$ . Portanto,  $\alpha_0 = C_b B N S / R$

Dividindo  $\alpha_0$  por  $\alpha_1$  a constante e a resistência podem ser eliminadas e podemos determinar  $B$  a partir dos dois ângulos de deflexão:

$$B = \left( \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \right) \frac{2M_{12} I_1}{N S}$$

## MEDIDAS

1. Ligue os terminais das bobinas do eletroímã na fonte de alimentação CENCO (figura 3). Esta fonte consiste de um autotransformador variável e um retificador de onda completa. Para maior exatidão na leitura da corrente de magnetização  $I_{mag}$  que circulará pelas bobinas do eletroímã utilize um amperímetro digital ligado em série no circuito. Certifique-se sempre que o knob (botão) da fonte está na posição zero, no começo da operação.

**Nunca ligue ou desligue as bobinas do eletroímã a menos que a tensão da fonte seja zero volt indicado no voltímetro.**

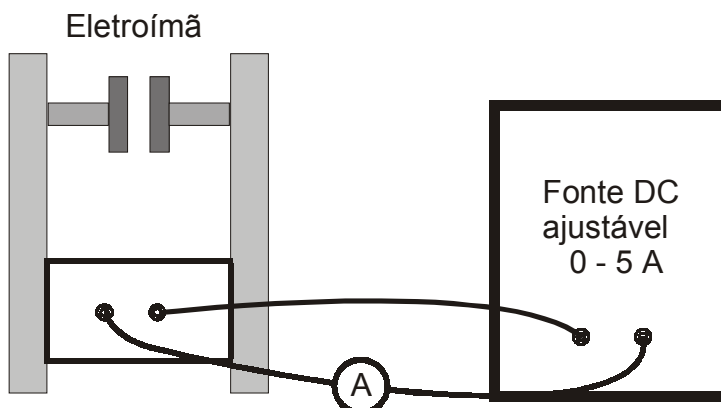


Figura 3

2. Monte o circuito indicado na figura 2. Nesta parte do experimento usaremos apenas o “lado” II do circuito, permanecendo o “lado” I inativo. A bobina de prova deve ser colocada no centro do espaço entre as peças polares do eletroímã, com o ângulo  $\varphi$  (da figura 1) nulo.

Fazemos as medidas da indução magnética, retirando a bobina de prova do campo magnético do eletroímã tão rápido quanto possível, pois condição de uma medida balística é que a carga total medida passe através do galvanômetro num tempo bem mais curto que o seu período. Anotamos sempre a primeira deflexão máxima,  $\alpha_0$ , bem como a corrente de magnetização  $I_{\text{mag}}$ .

Faça essas medidas variando a corrente de magnetização desde zero até 1,5 A, em passos de 0,1 A, em ambas as direções de corrente. *Não desligue as bobinas do eletroímã enquanto a corrente estiver fluindo!* Para inverter a polaridade, primeiro reduza a corrente a zero continuamente por meio do knob de comando da fonte.

3. Depois de terminada essa série de medidas do campo, fazemos a calibração. Usamos agora apenas a “parte” I da figura 2, permanecendo outra “parte” inativa. Ajustamos a corrente  $I_1$  no primário para um determinado valor. Faça uma comutação na chave inversora e observe uma deflexão  $\alpha_1$  no galvanômetro. Anote este valor, bem como o da corrente  $I_1$ . Repita este procedimento para mais 10 valores de corrente, até atingir o seu valor máximo. O knob (botão) de sensibilidade do galvanômetro deve estar na mesma posição durante toda a operação de calibração e medida. O Shunt calibrado que pode existir no galvanômetro não é aplicável em medidas balísticas, portanto não o selecione.

4. A determinação de B pode ser feita, através da expressão

$$B = \left( \frac{\alpha_0}{\alpha_1} \right) \frac{2M_{12}I_1}{NS}$$

Anote os valores de N e S da bobina de prova, bem como o valor  $M_{12}$  da indutância mútua padrão.

Trace o gráfico da indução magnética B em função da corrente de magnetização  $I_{\text{mag}}$  correspondente às medidas realizadas nos itens precedentes.

5. Para um dado valor fixo de corrente (ex. 1A) meça a homogeneidade do campo, colocando a bobina de prova a distâncias diferentes (gradualmente) do eixo das peças polares, tanto no interior quanto no exterior do eletroímã. Não é necessário se afastar mais que 2 cm com relação à borda no exterior. Para tanto utilize a régua graduada fixada numa das peças polares. Faça medidas para pelo menos 10 valores, concentrando-as próximo à borda das peças polares.

Trace o gráfico da indução magnética  $B$  em função da posição medida com relação ao eixo do eletroímã.

**!! Cuidado para não danificar os relógios de pulso no campo magnético !!**

**BIBLIOGRAFIA:**

Física, Halliday D. e Resnick R. vol 3, 4<sup>a</sup> ed.