



## Mecânica e Campo Eletromagnético

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Ano letivo 2017/2018

---

### TRABALHO 6: BOBINAS DE HELMHOLTZ

#### Objetivos

- Calibrar uma sonda de efeito de Hall por meio de um solenóide padrão.
- Medir o campo magnético ao longo do eixo de duas bobinas estreitas.
- Estabelecer a configuração de Helmholtz e medir o campo magnético ao longo do eixo das respectivas bobinas.
- Verificar o princípio da sobreposição.

## 1. INTRODUÇÃO

### PRODUÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS A PARTIR DE CORRENTES: O SOLENÓIDE PADRÃO

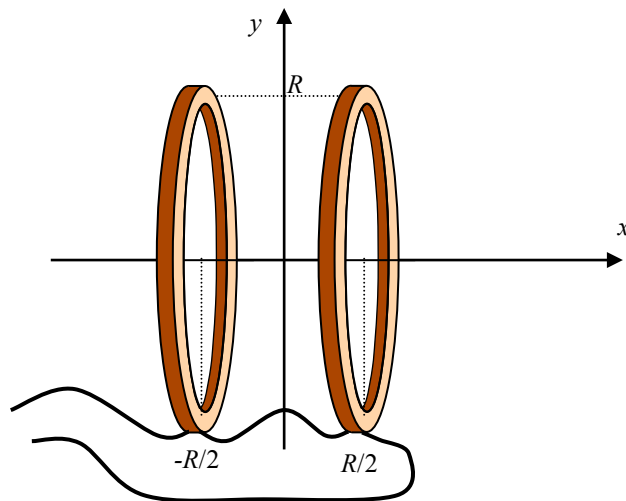
Correntes elétricas e cargas em movimento produzem campos magnéticos. O campo magnético produzido por uma corrente pode ser calculado através da Lei de Biot-Savart ou através da Lei de Ampère. No caso de um solenóide de comprimento infinito é fácil calcular, usando a Lei de Ampère, a expressão do campo magnético no seu interior. Do ponto de vista físico pode considerar-se como um conjunto de anéis idênticos, colocados lado a lado e percorridos pela mesma corrente ( $I_s$ ). Existindo apenas a componente longitudinal do campo (isto é, paralela ao eixo principal) esta é dada por

$$B_{sol} = \mu_0 \frac{N}{l} I_s \quad (1)$$

sendo,  $N/l$ , o número de espiras por unidade de comprimento do solenoide,  $I_s$ , a corrente elétrica que o percorre e, a constante  $\mu_0$ , a permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7}$  Tm/A). Esta expressão pode considerar-se válida para um solenoide finito, cujo comprimento é muito maior que o raio ( $l \gg R$ ). Um enrolamento deste tipo designa-se por solenoide-padrão.

### BOBINAS DE HELMHOLTZ

As bobinas de Helmholtz, são um outro dispositivo que, sendo constituído por dois enrolamentos em que  $R \gg l$ , se parecem bastante mais com anéis de corrente do que com solenoides padrão, permitindo criar, no espaço entre esses enrolamentos e ao longo do respetivo eixo, um campo magnético muito mais uniforme do que o campo devido a apenas um deles.



**Figura 1.** Esquema representativo do posicionamento das bobinas a uma distância  $R$ .

Esta característica consegue-se desde que as bobinas sejam idênticas (mesmo raio e número de espiras), coaxiais, e estejam situadas entre si a uma distância igual ao seu raio, sendo ainda percorridas por correntes iguais e com o mesmo sentido.

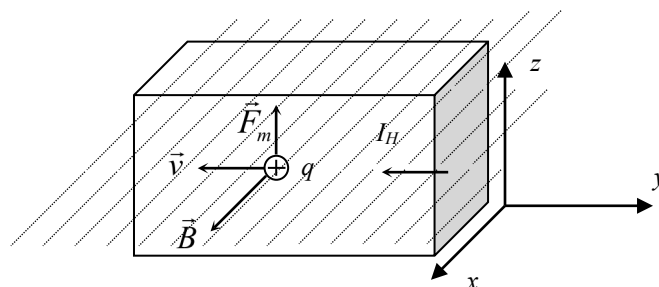
Nesta disposição é possível calcular uma expressão para o campo magnético criado pelas bobinas num ponto  $x$ , genérico, do seu eixo, a partir da expressão do campo magnético no eixo de um anel de corrente (centrado em  $x = 0$ ):

$$B(x) = \frac{\mu_0}{2} \frac{I \cdot R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (2)$$

Seja  $B_H(x)$  a expressão do campo criado pelas Bobinas de Helmholtz, pode, então, deduzir-se que o campo magnético atinge o seu valor máximo,  $B_{HMax}$ , no ponto médio da secção do eixo definido pelas bobinas ( $x = 0$ , na Figura 1) considerando o campo total resultante da soma dos campos de cada bobina ( $B_1+B_2$ ). Analisando a variação do valor de  $B_H$  ao longo da secção, pode, ainda concluir-se, que o valor de  $B_H$  não é inferior a 95% de  $B_{HMax}$ , sendo, em 60% dessa mesma secção, superior a 99% de  $B_{HMax}$ .

### MEDIÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS POR MEIO DE UMA Sonda DE EFEITO DE HALL

Para medir campos magnéticos utiliza-se o efeito que este campo produz em cargas elétricas em movimento, através da força magnética. Considerando um bloco de um semiconductor percorrido por uma corrente  $I_H$ , e colocado num campo magnético,  $\vec{B}$ , como se mostra na figura, os portadores de carga vão necessariamente sentir o efeito da força magnética dada pela expressão da Força de Lorentz:  $\vec{F}_m = qv\vec{B} \cdot \hat{z}$ .



**Figura 2. Geometria utilizada para medir o efeito de Hall.**

Num semiconductor, os portadores de carga podem ser positivos ou negativos, dependendo da estrutura do material. Vamos, no entanto, considerar que são positivos. Sob a ação de uma força magnética estes portadores vão deflectir a sua trajetória, acumulando-se na face inferior do semiconductor, produzindo uma diferença de potencial entre as faces superior e inferior do semiconductor, logo, originando um campo eléctrico  $\vec{E}$ , segundo a direcção do eixo  $zz$  e sentido  $-z$ . Ficam então sujeitos a uma outra força,  $\vec{F}_E = -qE \cdot \hat{z}$ , que se opõe à força magnética. Na situação de equilíbrio as duas forças igualam-se,  $qE = qvB$ , o que permite 3

calcular a diferença de potencial que se originou entre as duas faces do semicondutor, e que se designa, normalmente, por *tensão de Hall*. Esta tensão pode medir-se:

$$qE = q \frac{V_H}{h} = qvB \Rightarrow V_H = vhB \quad (3)$$

Como sabemos, a corrente através do semicondutor é dada pelo fluxo de portadores de carga através da superfície perpendicular à direção da corrente, logo  $I_H = nev$ . Então,

$$V_H \propto I_H B \quad (4)$$

ou seja, a tensão de Hall,  $V_H$ , é proporcional à corrente de Hall, que percorre o material e, ao campo magnético,  $|\vec{B}|$ . Assim, para um dado valor de  $I_H$ , constante,  $V_H$  é proporcional a  $B$ . Este facto é utilizado para medir o campo magnético, através de um dispositivo que, por utilizar o efeito de Hall e permitir medir (sondar) os valores do campo magnético, se designa por sonda de Hall. Os valores da tensão de Hall são tipicamente pequenos. Para medir campos magnéticos com uma sonda, em particular com uma sonda de Hall, é preciso calibrar a sonda, para determinar a constante de proporcionalidade entre  $V_H$  e  $B$ . Para isso recorre-se a um solenoide-padrão onde é conhecido o valor do campo magnético.



## 2. PREPARAÇÃO DO TRABALHO<sup>1</sup>

1. Deduza a equação 1 e verifique que a mesma só é válida nos casos em que  $l \gg R$ .
2. Com base no resultado do ponto anterior diga, justificadamente, em que posição do solenóide deve colocar a sonda de Hall.
3. Recorrendo à equação 2 faça um simples esboço dos gráficos esperados do campo magnético total ( $B_1+B_2$ ), nos casos em que a separação,  $d$ , entre as bobinas é
  - a)  $d > R$  ;
  - b)  $d = R$ ;
  - c)  $d < R$ .
4. Construa uma tabela onde deverá registar as grandezas físicas a medir na parte de calibração da sonda de Hall.
5. Com base na constante de calibração obtida, faça uma nova tabela, para registar os dados necessários para a determinação do campo magnético nas condições requeridas.

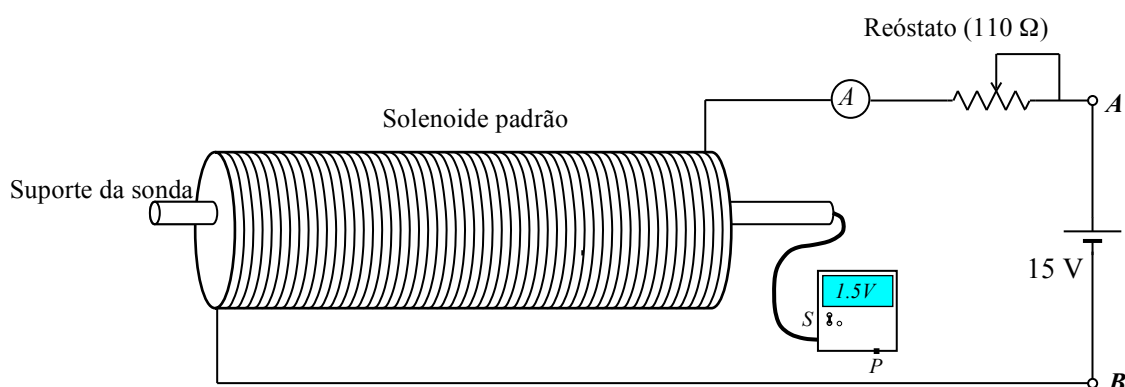
---

<sup>1</sup> Se tiver dúvidas consulte o docente.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### Parte A – Calibração da sonda de Hall

1. Usando o “comutador” (S) existente na unidade de controle da sonda de Hall, feche o circuito de modo a que passe corrente elétrica na sonda. Ligue um voltímetro à saída do comutador S.
2. Observe, no voltímetro, a tensão de Hall. Na ausência de campo magnético,  $V_H$  deve ser nula. Se tal não acontecer, anule a tensão residual atuando no potenciômetro colocado na unidade de controle (P).
3. Monte o circuito da figura 3, utilizando o solenoide padrão. Se dispuser de um reóstato de  $330\ \Omega$ , é preferível usar a variante da direita entre os pontos A e B, para facilitar o controle da corrente por meio do reóstato.



**Figura 3.** Esquema da montagem experimental disponível na aula.

4. Registe o valor de  $N/l$  para o enrolamento que está a usar.
5. Coloque a sonda no interior do solenoide, procurando um ponto do eixo do solenoide que minimize a aproximação de solenoide infinito utilizada. Qual é esta aproximação, e qual o ponto que escolheu?
6. Faça variar a corrente  $I_s$  que percorre o solenoide, e que vai produzir vários valores de campo magnético  $B$ . Registe a tensão  $V_H$  para os diferentes valores de  $I_s$ .

## **Parte B – Verificação do princípio da sobreposição para o campo magnético**

1. Coloque as duas bobinas em disposição geométrica adequada, de modo a ficarem na configuração de Helmholtz, e fixe-as nessa disposição, que deve manter-se inalterada ao longo de toda a experiência.
2. Registe os dados relevantes: a situação das bobinas na escala graduada, as dimensões das bobinas, a posição da escala da sonda de Hall relativamente à escala das bobinas.
3. Monte um circuito-série com uma fonte de 15V e uma das bobinas, um reóstato e um amperímetro, de modo semelhante ao que montou para a calibração da sonda. Ajuste a intensidade da corrente a um valor que será mantido fixo ao longo da experiência ( $I = 0,50 \text{ A}$ ).
4. Utilizando a sonda de Hall, meça o campo magnético criado pela bobina ao longo do seu eixo, de centímetro a centímetro, registando cada par de valores (posição, tensão de Hall).
5. Remova a tensão aplicada à bobina e aplique-a, de seguida, à outra bobina. Ajuste a corrente para o mesmo valor que no ponto 3, e repita o ponto 4, medindo e registando o valor da tensão de Hall nos mesmos pontos do eixo, mas para a outra bobina.
6. Ligue as duas bobinas em série, certificando-se de que a corrente fluirá no mesmo sentido em ambas as bobinas.
7. Utilizando a sonda de Hall, meça o campo magnético criado pela bobina ao longo do seu eixo, de centímetro a centímetro, registando cada par de valores (posição, tensão de Hall).

#### 4. ANÁLISE E TRATAMENTO DE DADOS

Com base nesta secção, deverá preparar o relatório preliminar obrigatoriamente entregue ao docente no final da aula.

##### Calibração da sonda de Hall

- Represente graficamente de  $V_H = f(I_S)$ .
- Determine a constante de calibração ( $C_c$ ) da sonda de Hall, através da expressão do campo produzido pelo solenóide bem como o seu erro (Note que  $B = C_c V_H$ ).

##### Verificação do princípio da sobreposição para o campo magnético

- Trace, numa folha de papel milimétrico (ou em Excel), o gráfico do campo magnético para as duas bobinas ligadas isoladamente e em série [ $B_H(x)$ ]. Conclua, através do gráfico e, sabendo a forma geral da variação do campo magnético criado por uma bobina, se se verifica ou não o Princípio da sobreposição do campo magnético.
- Com base nas medidas de campo magnético no centro de uma bobina e com base na expressão (2) estime o número de espiras da bobina de Helmholtz.

#### BIBLIOGRAFIA

[1] Serway, R. A., Physics for Scientist and Engineers with modern Physics, 2000, Saunder College Publishing.



