

## ***Roteiro da Prática IV à distância*** ***Campo magnetostático***

Vídeo:

<https://www.youtube.com/watch?v=CFqKXjyiAk0&t=1876s>

Neste Capítulo vamos estudar campos magnéticos gerados por correntes contínuas. Inicialmente introduziremos a lei de Biot e Savart e a lei de Ampère. Em seguida, calcularemos o campo para um fio retilíneo e para um solenoide. Os campos magnéticos serão medidos por uma sonda de efeito Hall, cujo princípio de funcionamento também será apresentado.

**Importante: O conteúdo da introdução teórica é apenas um guia para os conceitos necessários para a realização dos experimentos. Você deve aprofundar os conceitos consultando os livros citados na bibliografia ou, outros de sua preferência**

### **Campo magnético: Leis de Ampère e Biot-Savart**

Em julho de 1820, Oersted, um físico dinamarquês, percebeu que o ponteiro de sua bússola era defletido quando estava próximo de um fio conduzindo corrente elétrica. Essa foi a primeira evidência de uma ligação entre a eletricidade e o magnetismo que, até então, eram tidos como fenômenos distintos. Oersted publicou seus resultados, sem lançar uma explicação para o fenômeno. Uma das observações de Oersted é que o efeito do fio sobre a agulha podia ser representado por um campo com linhas de força circulares (ele deduziu isso porque a deflexão da agulha era oposta, conforme o fio estava num plano acima ou abaixo dela).

Apenas algumas semanas depois, em setembro de 1820, André-Marie Ampère, físico francês, apresentou um trabalho sobre o experimento de Oersted, usando os conceitos de “tensão elétrica” e “corrente elétrica”, e apontando que a corrente elétrica gera campo magnético, que deflete uma agulha imantada.

Ampère chegou a uma relação entre corrente elétrica e campo magnético, que é conhecida como *lei de Ampère*. Essa lei relaciona o campo magnético com a densidade de corrente e, em sua formulação integral, pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot d\vec{r} = \mu_0 \iint_S \vec{J} \cdot \hat{n} \cdot dS = \mu_0 I \quad (1)$$

A integral de linha do campo magnético sobre uma curva fechada é proporcional à corrente que atravessa uma superfície (aberta) que tenha essa curva como fronteira. O sentido da integral de linha é dado pela regra da mão direita: curvando os dedos da mão direita no sentido da curva, o polegar aponta na direção que a corrente deve ser considerada positiva.

A lei de Ampère não é suficiente para determinar o campo magnético. A ideia das linhas de força circulares de Öersted deu origem ao princípio da *inexistência de monopolos magnéticos*, o qual diz que as linhas de campo magnético não se originam nem terminam em nenhum ponto do espaço; são fechadas (como as linhas circulares de Öersted) ou continuam até o infinito. A expressão matemática para esse princípio é:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

Ainda em outubro de 1820, Biot e Savart fizeram experimentos sobre a ação de corrente elétrica sobre agulhas imantadas. As observações de Biot e Savart levaram a uma fórmula que permite calcular o campo magnético gerado por um fio que conduz corrente:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (3)$$

Nessa equação,  $d\vec{l}$  representa um elemento diferencial de comprimento do circuito,  $\vec{r}$  é um vetor apontando do circuito – ponto que varia durante a integração – até o ponto em que o campo está sendo calculado e  $r$  é o módulo desse vetor. A integral deve ser feita em todo o circuito (fechado).

A expressão de Biot-Savart é a solução das equações de Ampère e da divergência nula do campo magnético. Entretanto, é preciso frisar que as leis de Ampère e de Biot-Savart não são válidas no caso geral, mas apenas quando se lida com correntes estacionárias.

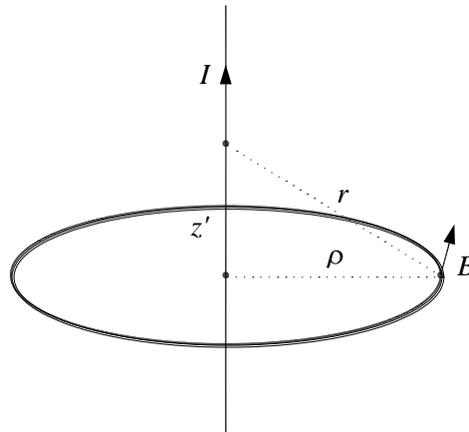
## 1.1 Aplicações da lei de Biot-Savart

Vamos calcular o campo magnético produzido em algumas situações de bastante interesse: o de um fio retilíneo infinito, de uma espira circular e de um solenoide.

a) *Fio retilíneo infinito*

Vamos calcular o campo magnético gerado por um fio retilíneo uniforme que coincide com o eixo  $z$ , a uma distância  $\rho$  do fio, utilizando a equação 3. A figura 10.1 mostra essa situação e a direção do campo magnético.

Figura 0.1 - Geometria para calcular o campo magnético de um fio infinito.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Em coordenadas cilíndricas, o caminho de integração é dado pela variável  $z'$ , que varia de  $-\infty$  a  $+\infty$ . O ponto no qual ocorre a integração é dado por:

$$\vec{l} = z' \hat{z} \quad (4)$$

A diferencial do caminho de integração é:

$$d\vec{l} = dz' \hat{z} \quad (5)$$

Podemos considerar que o ponto, cujo campo queremos calcular, tenha coordenada  $z = 0$ , porque a origem pode ser posicionada em qualquer ponto do fio. Logo:

$$\vec{r}_o = \rho \cdot \hat{\rho} \quad (6)$$

O vetor  $\vec{r}$  aponta do ponto no qual está sendo feita a integração até o ponto fixo onde o campo está sendo calculado.

$$\vec{r} = \vec{r}_o - \vec{l} = \rho \cdot \hat{\rho} - z' \hat{z} \quad (7)$$

O módulo desse vetor é:

$$r = \|\vec{r}\| = \sqrt{\rho^2 + z'^2} \quad (8)$$

Logo, o numerador do integrando vale:

$$d\vec{l} \times \hat{r} = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + z'^2}} \hat{\phi} dz' \quad (9)$$

Integrando a lei de Biot-Savart sobre  $z'$  de  $-\infty$  a  $+\infty$ , o resultado é:

$$\vec{B}(\rho) = \frac{\mu_o I}{2\pi} \frac{1}{\rho} \hat{\phi} \quad (10)$$

No seu trabalho de 1820, Biot e Savart observaram que a força exercida sobre a agulha é perpendicular tanto ao eixo do fio, que conduz a corrente, como à direção do fio ao centro da agulha, e é proporcional ao inverso da distância fio-agulha. Vemos que, realmente, a expressão matemática da lei de Biot-Savart leva a esse resultado, considerando que a força sobre uma agulha imantada é proporcional ao campo magnético.

O fio retilíneo é um caso interessante para se aplicar diretamente a lei de Ampère em sua forma integral. Como curva para efetuar a integração, escolhemos uma circunferência com centro no fio, raio  $\rho$  e que está num plano perpendicular ao fio. A corrente que atravessa o círculo, determinado por essa curva, é, simplesmente, a corrente que passa pelo fio.

Pela simetria de rotação, se o campo magnético possuir uma componente radial, ela deve ser igual em todos os pontos da circunferência. Isso, porém, viola a inexistência de monopolos magnéticos, porque haveria linhas de campos começando ou terminando no fio. Portanto, não há componente radial do campo. Também, por essa simetria, as componentes tangencial e paralela ao fio são iguais em toda a circunferência.

A integral de linha do campo magnético é, simplesmente, o valor de sua componente tangencial multiplicado pelo comprimento da curva ( $2\pi\rho$ ). Portanto:

$$2\pi\rho B_\phi = \mu_o I \quad (11)$$

Logo:

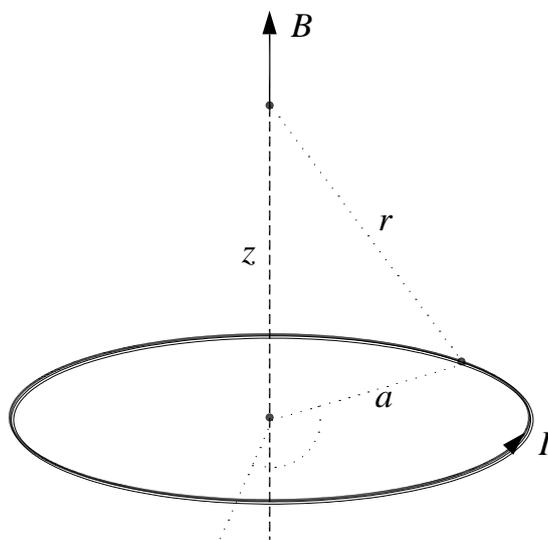
$$\vec{B}(\rho) = B_\varphi \hat{\varphi} = \frac{\mu_o I}{2\pi} \frac{1}{\rho} \hat{\varphi} \quad (12)$$

Esse é o mesmo resultado obtido pela lei de Biot-Savart.

b) *Espira circular*

Vamos considerar uma espira circular de raio  $a$  e calcular o campo magnético num ponto do eixo de simetria, a uma distância  $z$  do plano da espira. A figura 10.2 mostra essa situação.

Figura 0.2 - Geometria para calcular o campo magnético de uma espira circular.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

O caminho de integração será expresso através da variável  $\varphi$  (das coordenadas cilíndricas), que varia de  $0$  a  $2\pi$  na espira completa. O ponto em que ocorre a integração é dado por:

$$\vec{l} = a\hat{\rho} \quad (13)$$

A diferencial do caminho de integração é:

$$d\vec{l} = a\hat{\phi}d\varphi \quad (14)$$

O ponto no qual o campo será calculado está no eixo z:

$$\vec{r}_o = z\hat{z} \quad (15)$$

O vetor  $\vec{r}$  aponta do ponto onde está sendo feita a integração até o ponto fixo onde o campo está sendo calculado.

$$\vec{r} = \vec{r}_o - \vec{l} = z\hat{z} - a\hat{\rho} \quad (16)$$

Esse vetor não é constante porque o versor  $\hat{\rho}$  não é constante. Seu módulo, no entanto, é constante durante a integração (não depende de  $\varphi$ ):

$$r = \|\vec{r}\| = \sqrt{z^2 + a^2} \quad (17)$$

Essa equação poderia ser obtida diretamente da figura 10.2.

O numerador do integrando é:

$$d\vec{l} \times \hat{r} = (az\hat{\rho} + a^2\hat{z})d\varphi \quad (18)$$

Com essas definições, a integral da equação 3 não é difícil de ser realizada, e o resultado é:

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_o I}{2} \frac{a^2}{(z^2 + a^2)^{3/2}} \hat{z} \quad (19)$$

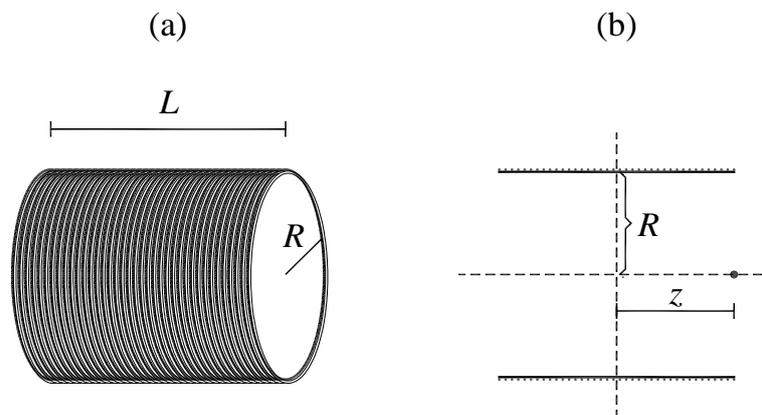
Na equação anterior, a corrente é positiva se, ao curvar os dedos da mão direita no sentido da corrente, o polegar apontar na direção do eixo z. Esse é o sentido mostrado na figura 10.2.

Se, ao invés de uma única espira, tivermos uma bobina com várias espiras bastante compactas, de modo que podemos considerar que todas estão num mesmo plano (dito de outra maneira: a espessura da bobina é muito menor do que o raio), o resultado deve ser multiplicado pelo número de espiras. Isso é consequência do princípio de superposição.

c) Solenoide

Um solenoide (ou bobina solenoidal) é uma bobina longa, caracterizado por três parâmetros: o raio das espiras  $R$ , o número de espiras  $N$  e o comprimento  $L$ . Por conveniência, podemos definir a densidade linear de espiras:  $n = N / L$ . A figura 10.3a mostra uma representação esquemática de um solenoide.

Figura 0.3 - Solenoide. (a) Vista em perspectiva. (b) Vista por cima.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

O eixo do solenoide a ser considerado será o eixo  $z$ , e a origem será tomada no ponto médio do solenoide (como na figura 10.3b). Vamos considerar uma fatia do solenoide, na posição  $z'$  de espessura  $dz'$ . O número de espiras nessa fatia é  $N' = N \cdot dz' / L = n \cdot dz'$ . O campo magnético que ela exerce num ponto sobre o eixo de simetria do solenoide, de coordenada  $z$ , é dado por:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o \cdot n \cdot I}{2} \frac{a^2}{((z - z')^2 + R^2)^{3/2}} \hat{z} \cdot dz' \quad (20)$$

Para achar o campo total, basta integrar em  $z'$  de  $-L/2$  a  $+L/2$ . O resultado é:

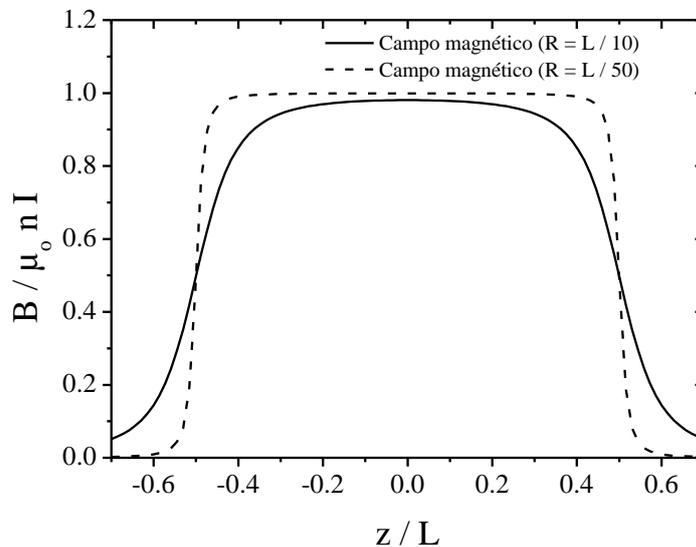
$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_o \cdot n \cdot I}{2} \left( \frac{L/2 - z}{((L/2 - z)^2 + R^2)^{1/2}} + \frac{L/2 + z}{((L/2 + z)^2 + R^2)^{1/2}} \right) \hat{z} \quad (21)$$

A figura 10.4 mostra esse campo, para dois valores da razão entre comprimento total do solenoide e o raio das espiras. Uma aproximação comum é a do solenoide longo,

no qual  $L \gg R$ . Nesse caso, o campo é constante na região interior (exceto quando muito próximo das bordas) e vale:

$$\vec{B} = \mu_0 n I \hat{z} \quad (22)$$

Figura 0.4 - Campo magnético (normalizado) no interior de um solenoide, para dois valores de  $R/L$ . As extremidades do solenoide estão localizadas em  $z/L = \pm 0,5$ .



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Da figura 10.4, vemos também que o campo na extremidade do solenoide é metade do seu valor no interior. Outra característica interessante é que quanto maior for a razão entre o comprimento e o raio do solenoide mais constante será o campo no seu interior. A configuração de solenoide é a forma mais eficiente de se produzir um campo magnético constante a partir de corrente elétrica, sendo muito utilizada em várias aplicações. Por exemplo, na maioria dos tomógrafos de ressonância magnética, utilizado para obtenção de imagens no interior do corpo, o campo magnético intenso e uniforme, necessário ao exame, é gerado por um solenoide (por isso a forma de tubular do equipamento).

As configurações aqui estudadas têm grande aplicação prática, pois são maneiras simples de produzir campos magnéticos constantes – bobina de Helmholtz, solenoide – ou com variação linear – bobina de anti-Helmholtz – e com intensidade que pode ser controlada.

## 1.2 Efeito Hall

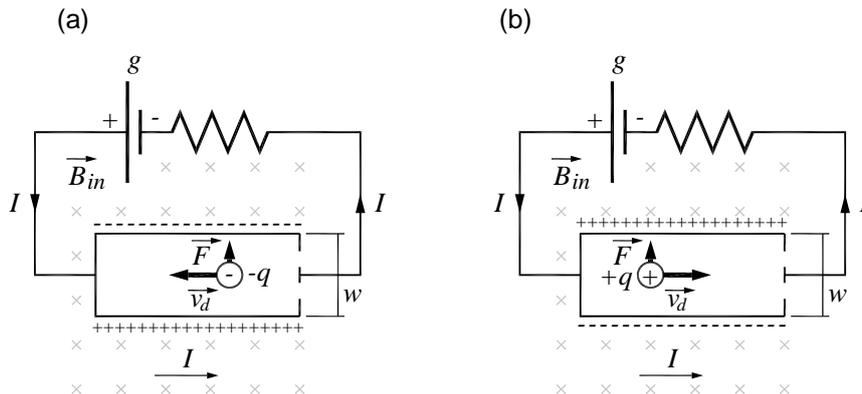
Atualmente, uma das maneiras mais práticas para se medir campo magnético faz uso do efeito Hall, observado por Edwin Hall, físico americano, em 1879.

Um condutor percorrido por corrente elétrica é constituído de cargas livres em movimento na direção da corrente (movimento médio com velocidade  $\vec{v}_m$ , superposto a um movimento aleatório). As cargas livres positivas se movem no sentido da corrente e as negativas, no sentido oposto.

Na presença de um campo magnético perpendicular à direção da corrente, as cargas livres sentem uma força  $\vec{F} = q\vec{v}_m \times \vec{B}$ ; e são desviadas em uma direção perpendicular às direções da corrente e do campo magnético. Vamos considerar que o condutor seja finito nessa direção, com largura  $w$ . Então, haverá acúmulo de cargas num dos lados nessa direção e aparece uma diferença de potencial entre os dois lados do condutor.

A figura 10.5 mostra um condutor de largura  $w$ , percorrido por uma corrente  $I$  da esquerda para a direita e um campo magnético entrando no plano do papel. A figura 10.5a mostra, também, uma carga livre negativa, que se move da direita para a esquerda e sofre uma força magnética para cima. Como resultado do deslocamento de cargas, depois de um certo tempo, a parte de baixo da placa ficará com o potencial mais elevado.

Figura 0.5 - Efeito Hall. (a) Cargas livres negativas. (b) Cargas livres positivas.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Entretanto, se as cargas livres fossem positivas (figura 10.5b), então, elas se movimentariam da esquerda para a direita. Nesse caso, a carga do portador teria sinal contrário e a velocidade também, de maneira que a força magnética continuaria a mesma. O resultado é que as cargas positivas iriam para cima, e a parte de *cima* ficaria a um potencial mais elevado.

Até aqui, todos os fenômenos sobre corrente elétrica se processavam do mesmo modo, não importando quem eram os portadores. Isso não ocorre com o efeito Hall; o resultado é *diferente* se os portadores têm carga positiva ou negativa. Historicamente, o efeito Hall foi a primeira prova de que a corrente elétrica nos metais é devido a cargas livres negativas (o elétron ainda não havia sido descoberto em 1879).

Para calcular a diferença de potencial entre a parte de cima e a parte de baixo do condutor, temos que lembrar que, na situação de equilíbrio, a força elétrica devido à distribuição de cargas (que é perpendicular à corrente) anula a força magnética:

$$|q\vec{E}| = |q\vec{v}_m \times \vec{B}| \quad (23)$$

Como a diferença de potencial entre as placas, chamada de *tensão Hall*, é, simplesmente,  $V_H = |\vec{E}|w$  e o campo magnético é perpendicular à corrente, temos:

$$V_H = wv_m B \quad (24)$$

Num condutor de seção transversal  $A$ , há uma relação simples entre a corrente  $I$  e a velocidade média  $v_m$  dos portadores (ver prática sobre resistência e corrente elétrica), se for feita a hipótese de que há apenas um tipo de portador (o que é verdade para os metais, mas não para soluções iônicas). Desse modo:

$$I = nqAv_m \quad (25)$$

Nessa equação,  $n$  é a densidade de portadores e  $q$  é a carga de cada um. Logo:

$$V = \frac{1}{nq} \frac{w}{A} IB \quad (26)$$

Vemos que o sinal de  $V$  depende do sinal de  $q$ . As grandezas  $w$ ,  $A$  e  $I$  são macroscópicas e podem ser medidas de maneira independente. Portanto, aplicando um campo magnético conhecido e medindo a tensão Hall é, em princípio, possível calcular a densidade de cargas livres ( $nq$ ) do material condutor, uma grandeza microscópica. No entanto, o interesse aqui é usar o efeito Hall para medida de campo magnético, ou seja, desejamos medir a tensão Hall  $V_H$  e, a partir dela, determinar o campo magnético que a

gerou. Para isso, precisaremos fazer uma calibração de modo que se determine a constante de proporcionalidade.

### 1.3 Sonda Hall

De acordo com a equação 26, a voltagem é diretamente proporcional ao campo magnético. Esse é o princípio da *sonda Hall*, que é constituída de uma tira plana condutora e uma bateria, que estabelece uma corrente sobre essa tira. A diferença de potencial entre os lados da tira pode ser medida com um voltímetro comum. Um experimento de calibração da sonda Hall – usando campos magnéticos conhecidos – permite obter o coeficiente de proporcionalidade entre a voltagem lida e o campo magnético na direção perpendicular à tira. As sondas Hall modernas contêm um chip de material semiconductor, de alto grau de pureza (o semiconductor tem  $n$  menor, então a voltagem Hall é maior para um dado campo, em comparação com um condutor metálico).

O chip usado na sonda, que utilizaremos na prática, é o modelo CSA-1V da Sentron, cujo *data-sheet* está disponível em <http://www.sentron.ch/datasheets/CSA-1V.pdf>. As características do seu sensor de campo magnético são:

Figura 0.6 - Especificações do sensor de campo magnético do chip CSA-1V.

**Characteristics of the Linear Magnetic Field Sensor <sup>34)</sup>**

With  $V_{SUP} = 5V$  and in the temperature range  $-40^{\circ}C$  to  $150^{\circ}C$ , if not otherwise specified.

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions
S	Magnetic Sensitivity <sup>3)</sup>	270	280 <sup>6)</sup>	290	V/T	$B = B_L$
$\Delta S / \Delta T$	Magn. Sensitivity Temperature Drift	-0.02		0.02	%/°C	$I_{OUT} = 0mA$ $T = -20^{\circ}C$ to $125^{\circ}C$
Voff	Offset Voltage <sup>3)</sup>	-15	0	15	mV	$B = 0T$ , $I_{OUT} = 0mA$ , $T = 20^{\circ}C$
Boff	Equivalent Magnetic Offset <sup>3)</sup>	-50	0	50	$\mu T$	$B = 0T$ , $I_{OUT} = 0mA$ $T = -20^{\circ}C$ to $80^{\circ}C$
$\Delta V_{off} / \Delta T$	Offset Temperature Drift	-0.2	0	0.2	mV/°C	$B = 0T$ , $I_{OUT} = 0mA$ , $T = -20^{\circ}C$ to $125^{\circ}C$
$B_{FS}$	Full Scale Magnetic Field Range <sup>5)</sup>	-7.5		7.5	mT	
$B_L$	Linear Magnetic Field Range	-5		5	mT	
NL	Non Linearity		0.1	0.2	%	$B = B_L$
			0.5	1		$B = B_{FS}$
$\Delta B_{noise}$	Input referred magnetic noise spectrum density (RMS)			125	nT/\sqrt{Hz}	$f = 10Hz$ to $10kHz$

Note 3: Ratiometric (proportional to  $V_{SUP}$ )

Note 4: When the analog output pin A\_OUT is used in differential mode (ie  $V_{out} = A\_OUT - CO\_OUT$ )

Note 5: Device saturates for  $B > B_{FS}$  but is not damaged

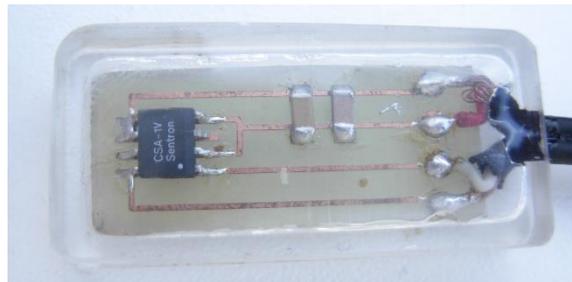
Note 6: Specification correction: Was  $300 \pm 10$  V/T. Now  $280 \pm 10$  V/T. All parts manufactured to date, have been calibrated to  $280 \pm 10$  V/T

Fonte: MELEXIS<sup>1</sup>...

Esse chip fornece uma voltagem que é proporcional ao campo magnético na direção paralela a sua superfície. A razão entre a voltagem de saída e o campo magnético, tem o valor típico de 280 V/T. O *offset* máximo, na voltagem, é de 15 mV, o que corresponde a um campo de 50  $\mu$ T. A relação entre voltagem e campo se mantém linear para campos de até 5 mT, e a sonda se satura para campos magnéticos de 7,5 mT.

Na figura 10.7 é mostrada a aparência externa da sonda Hall que será utilizada no curso:

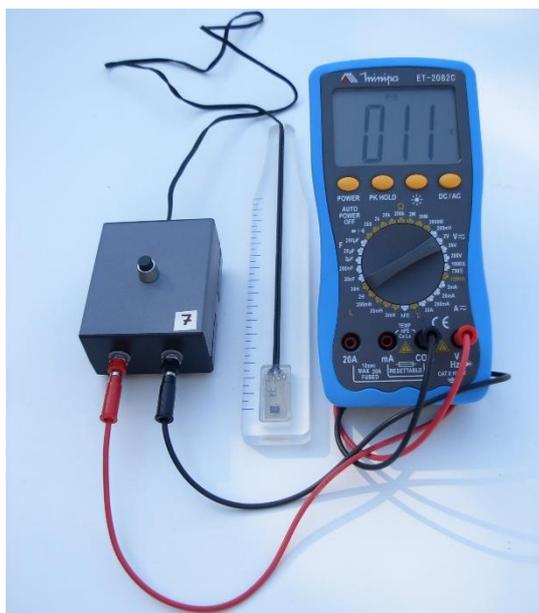
Figura 0.7 - Fotografia do Sensor Hall adaptado para medidas de campo magnético.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

A direção de medida do campo, nesse sensor, é ao longo da direção de maior comprimento da placa de circuito impresso, na qual está montado o sensor Hall. Para fazer as medidas, é preciso pressionar o botão de acionamento. A figura 10.8 mostra o sensor Hall conectado a um voltímetro e um suporte em forma de régua, que pode ser utilizado nas medidas de campo.

Figura 0.8 - Sonda Hall. À direita está o conector BNC e à esquerda, o botão de acionamento.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Em geral, estamos interessados apenas no campo magnético gerado por uma configuração e desprezamos o campo magnético da Terra e de outras fontes próximas. Então, temos que fazer uma medida preliminar com a fonte de campo magnético que queremos medir desligada, para medir o *campo de fundo*, que deve ser subtraído da medida feita com a fonte ligada.

Para utilizar a sonda Hall, na medida de campos magnéticos, é necessário calibrá-la. Isso pode ser realizado usando uma fonte de campo magnético uniforme e conhecido. Esse é o caso do campo magnético no centro de um solenoide, que pode ser calculado com boa precisão, em função da corrente que o percorre e de suas dimensões geométricas usando a equação 21. Assim, fazemos a calibração da sonda Hall através da utilização do campo gerado por um solenoide.

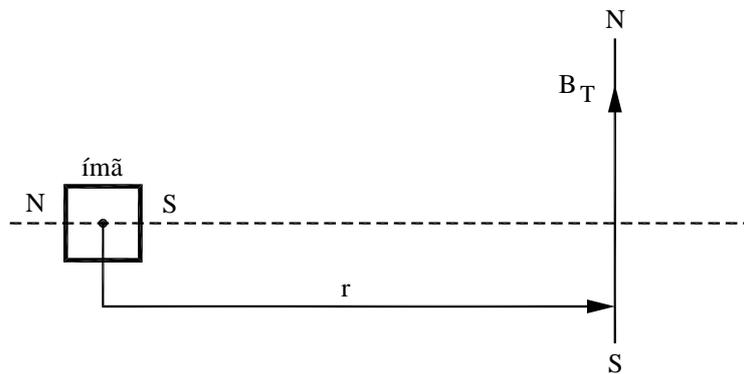
## Experimentos

### Experimentos 1: Sondando o campo magnético com uma bússola.

1. Entre os minutos 6:24 e 11:25 do vídeo se discute o uso de uma bússola para sondar campos magnéticos de ímãs usando a montagem esquematizada na figura 10.9.

1.1. Apresente aqui uma breve descrição do funcionamento de uma bússola e identifique as polaridades da agulha baseado na indicação norte e sul apresentada em sua escala. Baseado na sua pesquisa, identifique a polaridade da agulha da bússola usada no vídeo, ou seja, as partes preta e vermelha da agulha correspondem a que polos?

Figura 0.9 – Esquema da montagem usada para sondar campos magnéticos usando bússolas.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

Baseado no resultado responda as seguintes perguntas, justificando suas respostas.

1.2. Quando se aproximou o ímã com o polo azul (parte do ímã colorida de azul) perpendicularmente à direção da agulha da bússola. Qual é a direção e sentido do campo magnético do ímã na região da bússola? Justifique sua resposta. Desenhe um esquema indicando a direção do campo do ímã, do campo da terra e do campo resultante.

1.3. Quando se aproximou o ímã com o polo vermelho (parte do ímã colorida de vermelho) perpendicularmente à direção da agulha da bússola. Qual é a direção e sentido do campo magnético do ímã na região da bússola? Justifique sua resposta. Desenhe um esquema indicando a direção do campo do ímã, do campo da terra e do campo resultante.

1.4. Baseado nas conclusões dos itens 1.2 e 1.3, indique qual é a polaridade do polo azul e do polo vermelho do ímã.

## Experimentos 2: Força Magnética.

2. Entre os minutos 11:25 e 22:40 do vídeo são apresentadas conceitos e dois experimentos sobre força magnética. Responda as questões abaixo baseados neste trecho.

2.1. Considere o experimento apresentado na Figura 10.10. Neste um do cilindro metálico percorrido por uma corrente e sob a ação de um campo magnético, que rola entre duas hastes metálicas (motor linear).

Figura 0.10 – Fotografia da montagem usada no experimento descrito em 2.1.



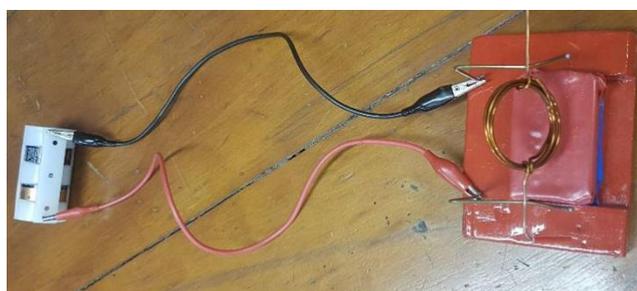
Fonte: Elaborada pelos compiladores.

2.1.1. Faça uma prevê descrição do fenômeno observado.

2.1.2. Baseado nas observações do vídeo indique a direção do campo magnético gerado pelos ímãs em forma de pastilhas? Justifique a sua resposta.

2.2. Considere o motor elétrico rudimentar apresentado na Figura 10.11 e descrito no vídeo.

Figura 0.11 – Fotografia da montagem usada no experimento descrito em 2.1.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

2.2.1. Explique o princípio de funcionamento desse motor. Não se esqueça de justificar porque só um dos lados do fio deve ser raspado como descrito no vídeo.

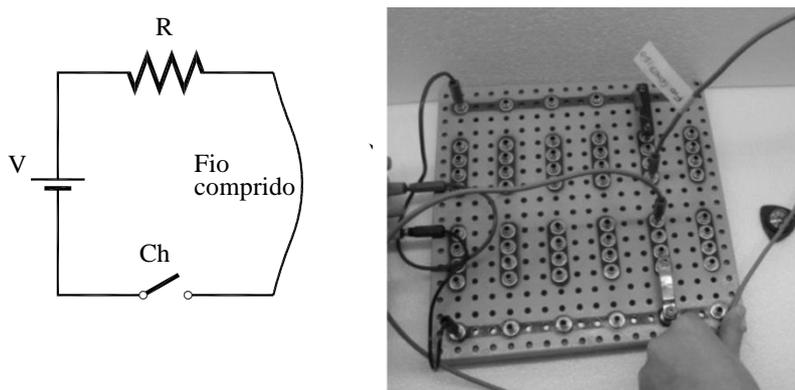
2.2.2. Observando a polaridade da fonte e o sentido da rotação da espira qual direção do campo magnético produzido pelo ímã?

### Experimentos 3: Campos magnéticos estáticos produzidos por correntes elétricas.

3. A partir do minuto 22:40 do vídeo são apresentadas conceitos e experimentos relacionados a produção de campos magnéticos por correntes elétricas.

3.1. Considere o experimento de Oersted apresentado na Figura 10.12 e descrito no vídeo entre os minutos 26:00 e 29:20.

Figura 0.12 – Esquema e Fotografia da montagem usada no experimento de Oersted.



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

3.1.1. Explique o fenômeno observado.

3.1.2. Qual a direção e sentido do campo magnético em torno de um fio longo?

*Entre os minutos 30:30 e 41:00 do vídeo é discutido o princípio de funcionamento da sonda Hall e apresentada uma curva de calibração para aquela usada nos experimentos. Nas análises a serem feitas a partir daqui você deve usar essa calibração para obter o campo magnético a partir da leitura da tensão Hall.*

3.2. Considere o experimento de mapeamento de campo magnético de um condutor retilíneo longo percorrido por corrente elétrica, descrito entre os minutos 41:00 e 50:00 do vídeo.

3.2.1. Considerando que neste experimento o fio retilíneo infinito será simulado, na prática, por uma bobina quadrada com  $N$  espiras ( $N \cong 30$ ), como mostra a figura 10.13a.

explique porque na proximidade externa ao centro de uma dada aresta, o campo pode ser aproximado por um campo de um fio retilíneo. Ou seja,

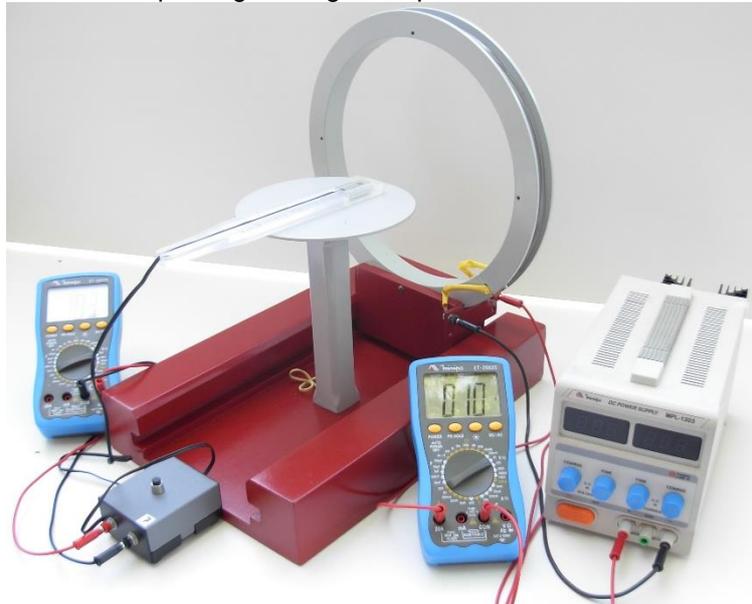


3.2.3. Na mesma escala, faça um gráfico do campo magnético medido, em função de  $r$ , e o campo esperado (calculado utilizando a equação 12). Analise a concordância entre o resultado calculado e o experimental.

**Observação:** Você pode utilizar o editor gráfico e sua preferência, mas se preferir fazer no papel, existem vários sites na internet que disponibilizam modelos de papel milimetrado que você poderá imprimir e usar.

3.3. Considere o experimento de mapeamento de campo magnético ao longo do eixo de uma bobina de 130 espiras e de diâmetro 28 cm e percorrida por uma corrente de 1A, Figura 10.14. Esse experimento está apresentado entre 1:02:30 e 1:13:00 do vídeo.

Figura 0.14 - Medida do campo magnético gerado pela bobina usando uma sonda Hall



Fonte: Elaborada pelos compiladores.

3.3.1. Baseado nos resultados das medidas apresentadas no vídeo, preencha a tabela 10.2.  $z$  é a distância do ponto de medida do campo ao centro da bobina.

3.3.2. Faça um gráfico do campo magnético medido e do campo esperado (calculado utilizando a equação 19). Analise a concordância entre o resultado calculado e o medido.



