



# Construção de um medidor de campo magnético utilizando um sensor de efeito Hall linear de baixo custo

.....

Wenderson R.F. Silva<sup>#</sup> e  
Jakson M. Fonseca

Departamento de Física, Universidade  
Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

## RESUMO

Neste trabalho, propomos uma maneira de se construir um gaussímetro de baixo custo que pode ser utilizado em ambientes de ensino para enriquecer as discussões e tornar o assunto mais claro, uma vez que o aluno pode detectar os campos magnéticos produzidos por diferentes sistemas. O gaussímetro proposto possui um custo aproximado de R\$ 40,00, é constituído por equipamentos eletrônicos simples e possui um intervalo de detecção de 1 a 100 mT ( $10^{-3}$  Tesla). Exemplificamos seu uso com o campo magnético criado por uma bobina cuja construção também é proposta no trabalho. O equipamento proposto permite também detectar a polaridade de campos magnéticos.

**Palavras-chave:** sensor de campo magnético; gaussímetro; sonda de efeito Hall; ensino de física

.....

## 1. Introdução

Aparelhos de medidas de campos eletromagnéticos são fundamentais quando se deseja estudar experimentalmente fenômenos elétricos e magnéticos. Existem muitas versões de tais aparelhos disponíveis comercialmente, versáteis e com amplo intervalo de medição. Porém, normalmente são de alto custo, o que muitas vezes impede que tais dispositivos sejam adquiridos pelas escolas e por professores. No que tange ao ensino, “o laboratório didático é considerado, hoje em dia, peça-chave no aprendizado da física” [1]. Na escola secundária, devido ao alto custo de aparelhos, como o gaussímetro (aparelho usado para se medir campos magnéticos), por exemplo, é rara sua presença e utilização nesse nível de ensino, o que dificulta o desenvolvimento dos conteúdos pelos professores e oculta dos alunos a relação de conectividade entre os estudos teóricos e o método experimental, o qual, em grande parte, deu origem às teorias [2].

A construção de um medidor de campo magnético (gaussímetro) de baixo custo vem como uma forma de contribuir para a redução desse problema, auxiliando professores e alunos a construir seu próprio dispositivo [3]. Outros autores propuseram a construção de medidores de campo magnético de baixo custo, utilizando como sensor o próprio magnetômetro do celular [4, 5], uma bobina [6] ou dispositivos semicondutores baseados no efeito Hall [3], associados a circuitos com microcontroladores [7], sendo que nenhum dos equipamentos acima citados possui um indicador da

polaridade do campo magnético no instrumento. Nesse contexto, propõe-se a construção de um gaussímetro de fácil montagem, robusto, compacto e de baixo custo, e sua utilização no estudo do campo magnético gerado por um solenoide. Por ser simples, o aluno pode construí-lo em casa e verificar, por conta própria, vários fenômenos relacionados ao eletromagnetismo.

Para entender os princípios físicos por trás do gaussímetro que será proposto, precisa-se entender o efeito Hall, pois esse é o princípio físico de funcionamento do sensor aqui utilizado. O efeito Hall consiste na geração de uma diferença de potencial entre as superfícies opostas de um condutor ou semicondutor quando este é submetido a um campo elétrico e um campo magnético perpendiculares. A Fig. 1 ilustra o efeito.

Um campo elétrico aplicado ao longo do eixo  $x$  (negativo) produz um fluxo de cargas (corrente elétrica) nessa direção. O campo magnético aplicado ao

longo do eixo  $z$  negativo produz uma força magnética sobre os portadores de carga, de forma que os elétrons são defletidos no sentido negativo do eixo  $y$  e os portadores de carga

positiva são defletidos em sentido oposto (alguns semicondutores possuem portadores de carga positivos chamados de buracos, e negativos, os elétrons). Isso causa um acúmulo de cargas positivas na parte superior do condutor ou semicondutor e um acúmulo de cargas negativas na parte inferior, acarretando uma diferença de potencial entre essas superfícies. Essa diferença de potencial  $V_{hall} = V_{P1} - V_{P2}$  é chamada de diferença de potencial ou

**A construção de um gaussímetro de baixo custo auxilia na conectividade entre os estudos teóricos e o método experimental em eletromagnetismo**

<sup>#</sup>Autor de correspondência. E-mail: wenderson.f@ufv.br.

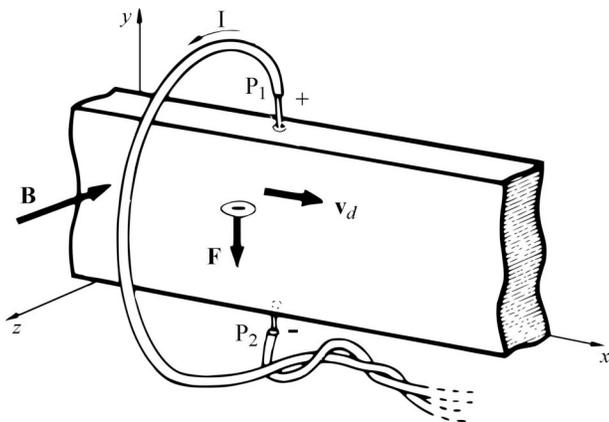


Figura 1 - Condutor de seção retangular com uma corrente elétrica ao longo do eixo  $x$ ,  $V_d$  é a velocidade média dos elétrons,  $F$  a força magnética e  $B$  é o campo magnético externo.  $P_1$  e  $P_2$  são pontos para se medir a tensão Hall  $V_{hall}$  [8].

voltagem Hall [8]. O valor de  $V_{hall}$  depende também da geometria da placa, bem como de sua constituição química, que influencia na densidade de portadores de carga. Um modelo matemático que engloba esses fatores pode ser observado na Eq. (1) [9]:

$$V_{hall} = \frac{BI}{ne} = V_{P1} - V_{P2}, \quad (1)$$

onde  $B$  é o módulo do campo magnético aplicado,  $I$  é a corrente elétrica que passa pelo material,  $e$  é a carga do elétron,  $n$  é a densidade de portadores de carga e  $l$  é a largura da placa do sensor (distância entre os pontos  $P_1$  e  $P_2$  na Fig. 1). Note que o sinal da tensão Hall depende do sentido do campo magnético aplicado.

Um dispositivo ou sensor que possui seu funcionamento baseado no efeito Hall descrito é o chamado sensor de efeito Hall SS49E [10], que é um dispositivo semiconductor que, quando em funcionamento, sendo submetido a um campo magnético  $B$ , induz uma diferença de potencial Hall diretamente proporcional ao campo magnético aplicado. Para sensores como o SS49E, os valores de  $e$ ,  $n$  e  $l$  são constantes do material e, mantendo-se  $i$  constante (condição em que o sensor é alimentado com uma tensão fixa), pode-se obter uma proporcionalidade entre  $V_{hall}$  e  $B$ , como mostrado na Eq. (2) abaixo, sendo  $\alpha$  um fator de proporcionalidade a partir do qual se pode obter o valor do campo magnético  $B$  por meio do valor de  $V_{hall}$ ; portanto, tem-se:

$$V_{hall} = \alpha B. \quad (2)$$

No equilíbrio, a força magnética sobre

os portadores de carga é contrabalanceada pela força elétrica produzida pela diferença de potencial Hall. Quanto maior o campo magnético aplicado, maior a força magnética sobre os portadores de carga e conseqüentemente maior será o campo elétrico Hall gerado pelo deslocamento dos portadores de carga, o que acarreta uma maior tensão Hall.

Além de se propor como construir um gaussímetro de baixo custo, vai-se discutir como produzir um campo magnético controlável utilizando-se bobinas. Como forma de testar e validar o equipamento aqui proposto, fez-se uma calibração com um equipamento industrializado, a fim de determinar o fator  $\alpha$  da Eq. (2) para, com ele, chegar-se aos campos magnéticos associados. Como o campo magnético de um solenoide varia com a distância de seu centro e ao longo de seu eixo, para dada corrente elétrica fixa, posteriormente, variando-se a corrente e fixando-se o sensor do aparato proposto no centro do solenoide, verificou-se a dependência do campo magnético com a corrente elétrica. Os resultados obtidos pelo dispositivo proposto são apresentados juntamente com aqueles obtidos pelo equipamento industrial.

## 2. Material e métodos

Tendo em vista os aspectos da construção do equipamento mencionados acima, buscou-se desenvolver um aparelho de baixo custo, fácil manuseio e fácil montagem, que possibilitasse realizar medidas precisas. Para isso, utilizaram-se os seguintes materiais: um minivoltímetro digital DC (0-30 V), um sensor Hall SS49E, um circuito integrado (CI) LM7805, um transistor BC639, um diodo LED vermelho, um resistor de 10 k $\Omega$  (10<sup>3</sup> ohms), um resistor de 100  $\Omega$ , uma bateria de 9 V montada a partir da ligação em série de duas baterias de celular descartadas (pode-se utilizar, no entanto, uma bateria industrializada que forneça a mesma tensão), uma fonte de tensão DC variável (0-12 V) e fios para conexão. Para

fins de comparação, utilizou-se também um teslâmetro da marca Phywe modelo 13610.98 [11]. O custo de todos os componentes do dispositivo proposto ficou em torno de R\$ 40,00 (quarenta reais). Todos os componentes eletrônicos podem ser facilmente encontrados em lojas especializadas, na internet e em lojas eletrônicas. Com os materiais citados acima, a montagem do equipamento pode ser realizada seguindo o esquema elétrico mostrado na Fig. 2.

Há dois estágios no diagrama elétrico apresentado na Fig. 2. O primeiro é o destacado com o tracejado. Ele é um complemento para o equipamento, mas poderia ser omitido sem prejuízo para o funcionamento do gaussímetro. Nesse estágio, quando há um campo magnético nas proximidades do sensor SS49E, esse circuito detecta a tensão  $V_B$  gerada por ele e a amplifica no transistor BC639, gerando uma corrente no LED vermelho proporcional a essa tensão. A tensão  $V_B$  gerada pelo sensor sem a presença de um campo magnético sensível é de  $V_{B=0} = 2,56$  V, o que já é suficiente para acender o LED. Entretanto, quando o equipamento detecta um campo magnético  $B$  divergente (exterior a um polo norte magnético), ele gera uma tensão positiva, acima do valor de base ( $V_{B=0} = 2,56$  V), o que aumenta a corrente elétrica no LED e, conseqüentemente, o seu brilho. Já quando o campo  $B$  detectado é um campo convergente (exterior a um polo sul magnético), há uma diminuição da tensão em relação a 2,56 V, e com isso o brilho do LED diminui. Portanto, esse estágio do circuito elétrico serve como um detector de polaridade do campo magnético e é também uma forma de acompanhar qualitativamente o aumento ou a diminuição da intensidade do campo magnético por meio do brilho do LED.

O restante dos componentes dispostos no circuito são os que irão proporcionar o funcionamento do sensor SS49E e realizar a leitura. O regulador de tensão LM7805 é o responsável por manter uma tensão constante de 5 V no terminal (V-IN) do sensor e, assim, manter sua saída de tensão (V-OUT) fixa  $V_{B=0} = 2,56$  V. O fato de se ter uma tensão constante no terminal (V-IN) do sensor é o que faz com que a corrente elétrica  $I$  que passa pelo material seja constante. Com esse regu-

**Buscou-se desenvolver um aparelho de baixo custo, fácil manuseio e montagem e que possibilite realizar medidas precisas**

lador de tensão LM7805 é o responsável por manter uma tensão constante de 5 V no terminal (V-IN) do sensor e, assim, manter sua saída de tensão (V-OUT) fixa  $V_{B=0} = 2,56$  V. O fato de se ter uma tensão constante no terminal (V-IN) do sensor é o que faz com que a corrente elétrica  $I$  que passa pelo material seja constante. Com esse regu-

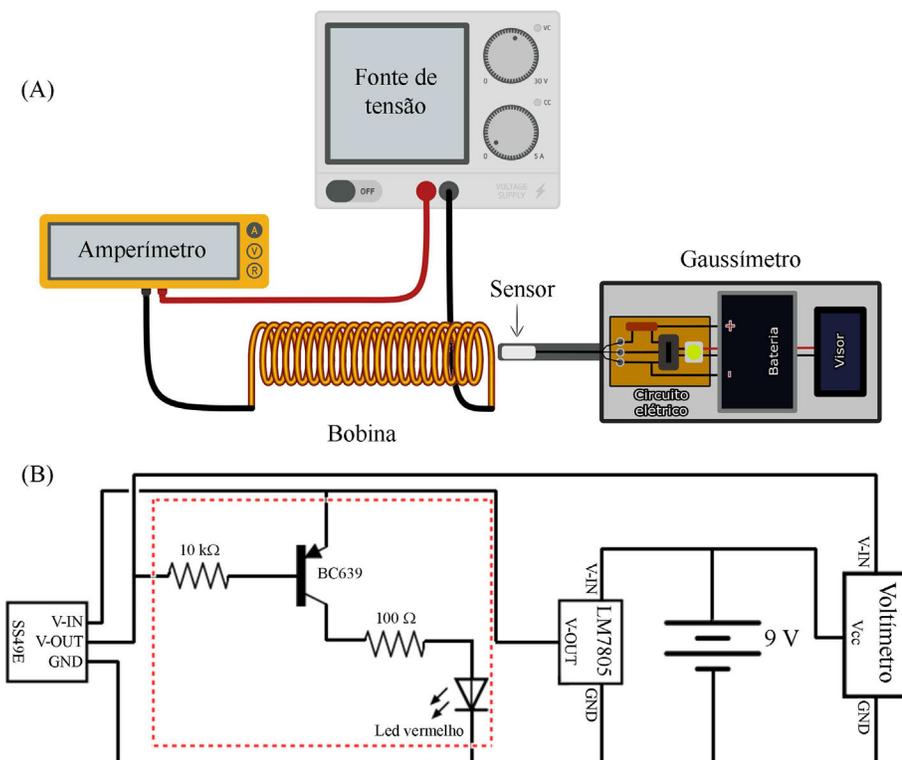


Figura 2 - (A) Diagrama esquemático mostrando os principais elementos. (B) Esquema elétrico do gaussímetro proposto. Na região dentro da linha tracejada encontra-se a porção do circuito que será usada para detecção da polaridade do campo magnético.

lador, mesmo quando a tensão da bateria diminui para valores entre 9 V e 6 V, a tensão de base não varia. Caso contrário, se a bateria fosse ligada diretamente ao sensor, a tensão de base iria mudar à medida que ela se descarregasse, não sendo possível uma referência de tensão para a situação em que o sensor não está na presença de um campo magnético detectável. As medições do campo magnético são feitas de forma indireta pelo voltímetro, que é alimentado pela tensão de 9 V da bате-

ria. A tensão de saída do sensor (V-OUT) é ligada no terminal de leitura do voltímetro (V-IN). Todos os terminais negativos são interligados e conectados ao negativo da bateria.

Para conduzir o sensor até o interior do solenoide, foi construída uma extensão utilizando um tubo plástico reaproveitado de uma caneta. Foram utilizados bornes para circuitos, ficando a extremidade fêmea fixa na placa do gaussímetro e, prolongando com três fios dentro do tubo, foi soldado um bor-

ne macho em uma extremidade e um fêmea na outra. Isso possibilitou que se pudesse optar por usar a extensão ou não, bastando realocar o sensor, na extensão ou na placa. A Fig. 3 mostra o equipamento montado juntamente com sua extensão.

Para o solenoide utilizado na realização dos testes, os materiais foram: um carretel de plástico com raio de 10,5 mm e comprimento 52,5 mm, reaproveitado de um rolo de esparadrapo; fio de cobre esmaltado AWG 28 (0,32 mm de diâmetro), encontrado em lojas de suplementos para consertos de motores elétricos. Pode-se, também, reaproveitar o fio de algum transformador elétrico, desde que ele esteja em boas condições e seja viável para o usuário. Para o carretel utilizado, gastaram-se cerca de 60 g de fio para se enrolar uma bobina com 720 voltas.

A confecção do solenoide se deu enrolando o fio de cobre no carretel de forma ordenada, mantendo sempre a coerência no sentido de enrolamento e preenchendo toda a extensão do carretel. Quando preenchida a primeira “camada” do solenoide, volta-se, em sentido contrário, enrolando outra camada acima da primeira, até preencher a segunda camada. Foi repetido esse procedimento até se obter o número de voltas desejado. É muito importante que não se perca o número de voltas no ato de enrolar. Uma estratégia é enrolar continuamente até um certo valor, por exemplo, de 50 em 50 voltas. Os dois extremos do fio são direcionados para fora da bobina, fazendo dois pequenos furos sobre o seu disco lateral, deixando 5 centímetros de sobra, que serão os terminais do solenoide. Na Fig. 4 abaixo, pode-se observar o solenoide confeccionado.



Figura 3 - (A) equipamento montado com a extensão do sensor desconectada ao lado. (B) Imagem ampliada do circuito elétrico.



Figura 4 - Solenoide com 720 voltas usado no experimento.

O procedimento experimental adotado para a verificação do campo magnético  $B$  de um solenoide deu-se da seguinte maneira: foi disposto o gaussímetro sobre uma bancada e fixada uma régua sobre sua superfície. Posiciona-se a régua ao lado e o sensor no centro do solenoide, como mostrado na Fig. 5.

Variando-se a posição do sensor em relação ao solenoide, partindo do centro, movimentando-se o solenoide na direção de seu eixo e mantendo-se fixo um valor da corrente elétrica que percorre o solenoide, aqui regulado em 1,30 A, analisou-se como o campo magnético varia com a distância do centro do solenoide (Fig. 8(B)). Para verificar a dependência do campo magnético com a corrente elétrica, fixou-se a posição do sensor no centro do solenoide, vari-

ando-se a tensão aplicada sobre ele. Para evitar o superaquecimento da bobina, fez-se circular a corrente elétrica por ela somente no momento da coleta das medidas. Com auxílio do amperímetro já acoplado à fonte de tensão, mediu-se a corrente para cada tensão aplicada. Utilizou-se uma fonte de tensão contínua de 30 V. Em ambas as análises, as condições foram mantidas, para as medidas com o equipamento proposto e com o equipamento industrial.

O “chip” SS49E apresenta características que variam de sensor para sensor. Tal chip, fabricado pela empresa Honeywell International Inc. e distribuído pela Farnell.com, por exemplo, aparece no catálogo com uma sensibilidade de  $14 \pm 3,5 \text{ V/T}$  [10]. Já aquele fabricado pela SEC Electronics Inc. e distribuído pela Addicore.com apresenta uma sensibilidade de  $25 \pm 5,0 \text{ V/T}$  [12]. Dada a variação na sensibilidade desse sensor apresentada por diferentes fabricantes e as variações que podem ocorrer de sensor para sensor dentro do mesmo fabricante, fez-se necessário efetuar uma calibração, a fim de se obter o fator de conversão necessário para se transformar o valor de diferença de potencial medido pelo gaussímetro proposto em valores de intensidade de campo magnético.

### 3. Resultados e discussão

Com o gaussímetro e o solenoide montados, pode-se fazer medidas para testar, calibrar e compreender o funcionamento do dispositivo proposto. Para

calibrar o dispositivo, mediu-se o campo magnético produzido por uma corrente elétrica do solenoide igual a 1,30 A, em função da distância  $y$  ao centro do solenoide e ao longo de seu eixo, com o gaussímetro proposto, o qual retorna valores de diferença de potencial  $V_B$ , e com o teslâmetro industrializado da marca Phywe.

Para se chegar ao valor da tensão Hall  $V_{hall}$  gerada pelos campos magnéticos aplicados, subtraiu-se dos valores de  $V_B$  o valor gerado pelo aparelho quando o campo magnético nas proximidades do sensor é nulo

$V_{B=0} = 2,56 \text{ V}$ . Os valores de  $V_{hall}$  em função do campo magnético  $B_{industrial}$  medidos pelo teslâmetro industrial foram plotados em um gráfico (Fig. 6), a partir do qual pode-se obter, por meio da regressão linear dos dados, o valor da constante de proporcionalidade, chegando-se ao valor de  $\alpha = 21,19 \text{ V/T}$ . O valor do fator  $r^2$ , chamado de coeficiente de correlação linear, indica o quanto a distribuição dos pontos experimentais se aproxima do regime linear proposto (Eq. (2)). Valores próximos de 1 indicam alta correlação, o que se verifica nesse experimento. Todos os gráficos aqui apresentados foram plotados com auxílio do *software* Origin.

Com o auxílio das Eqs. (1) e (2), calcularam-se os valores do campo magnético  $B$  para o gaussímetro proposto a partir da diferença de potencial  $V_{hall}$  medida pelo dispositivo. A fim de possibilitar uma comparação entre os resultados experimentais e o equipamento

**Com o gaussímetro e o solenoide montados, pode-se fazer medidas para testar e calibrar o dispositivo proposto obtendo-se excelente concordância com o teslâmetro industrial**

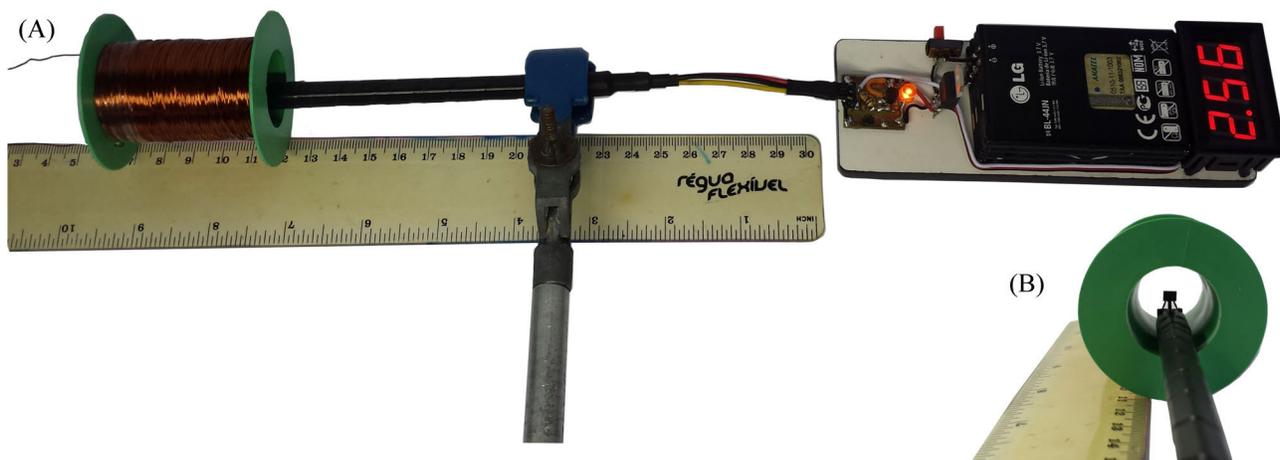


Figura 5 - Arranjo experimental adotado e o sensor no interior do solenoide. A fonte de alimentação do solenoide foi omitida nesta imagem. (A) vista de cima do equipamento montado para realização de medidas. (B) imagem do sensor dentro do solenoide.

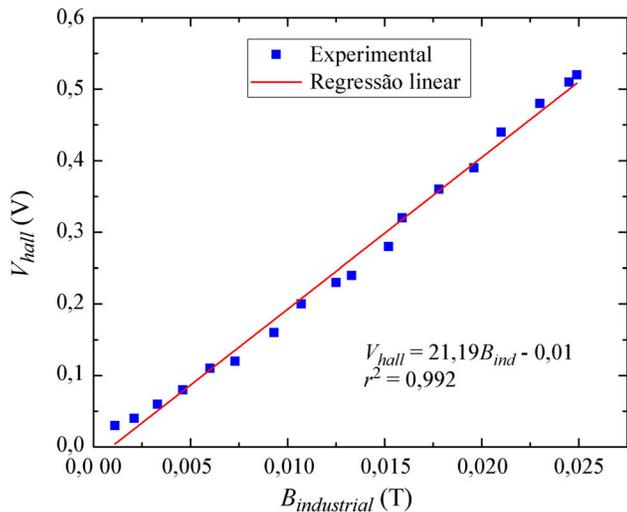


Figura 6 - Valores da voltagem Hall medidos pelo gaussímetro proposto em função do campo magnético de  $B_{industrial}$  medido pelo teslâmetro da marca Phytwe, ambos para distâncias fixas ao centro do solenoide.

industrializado, plotou-se o gráfico da Fig. 7 com os valores de  $B$  e  $i_s$  (Fig. 7(A)) e  $B_{industrial}$  e  $y$  (Fig. 7(B)). Nota-se que os resultados apresentados no gráfico da Fig. 7(A) estão de acordo com o esperado, pois o campo magnético produzido por um solenoide é diretamente proporcional à corrente. Pode-se observar também que os pontos medidos pelo dispositivo proposto estão bem ajustados com os valores obtidos pelo aparelho industrializado, mostrando que o gaussímetro proposto é uma alternativa confiável.

O equipamento é apropriado para realizar medidas de campos magnéticos com magnitudes de até 100 mT, sen-

do sensível a intensidades superiores a 1 mT, dado que o voltímetro utilizado tem resolução de 0,01 V, o que corresponde aproximadamente a um campo magnético de 0,5 mT. Ele pode ser destinado a medidas de diversas fontes de campo magnético comumente encontradas, como ímãs de geladeira e ímãs de neodímio (super ímãs), cujas magnitudes detectadas pelo equipamento proposto (na superfície do sensor) foram de 1,5 e 70 mT, respectivamente. O estágio do circuito elétrico destinado à detecção da polaridade do campo magnético foi

devidamente calibrado com auxílio do solenoide utilizado, de acordo com a definição adotada para o sentido de campos magnéticos gerados por corrente elétrica, tendo-se concluído que quando o LED diminui seu brilho, o polo é o sul, e quando o LED aumenta o brilho, trata-se do polo norte. Assim, verifica-se que esse complemento é um importante atributo para o equipamento, o que justifica sua adição.

Para aqueles que possuem conhecimento básico de programação e desejam realizar medidas acompanhadas pelo computador, o dispositivo pode ser facilmente adaptado para alguma plataforma de um sistema embarcado, co-

mo o Arduino, sendo necessário direcionar o sinal dos fios V-IN e GND do voltímetro para o microcontrolador. Isso pode ser feito adicionando-se dois bornes ligados em paralelo a esses fios. Assim, o aparelho continuaria mostrando as informações em seu visor e enviaria os sinais para análise no computador.

#### 4. Conclusões

Diante do exposto, vemos que é possível montar um gaussímetro de baixo custo, de fácil manuseio, que possibilite obter resultados acurados e confiáveis de campos magnéticos. O equipamento pode ser destinado ao uso em aulas de laboratório de física, tanto no Ensino Médio quanto na graduação, para medidas do campo de ímãs permanentes, bobinas e solenoides, dentre outras fontes de campo magnético, sendo um instrumento importante para verificação de leis relacionadas ao eletromagnetismo. Por ser de fácil construção e montagem, pode ser construído sem necessidade de um grande conhecimento em eletrônica. Além dos aspectos mencionados, outra vantagem é que ele pode ser montado em casa, como alternativa aos instrumentos industrializados, comumente encontrados em laboratórios, sendo uma forma de desmistificar a impressão que muitas pessoas costumam ter de que os princípios tecnológicos envolvidos na construção de equipamentos científicos são de difícil acesso e dependem de grandes recursos.

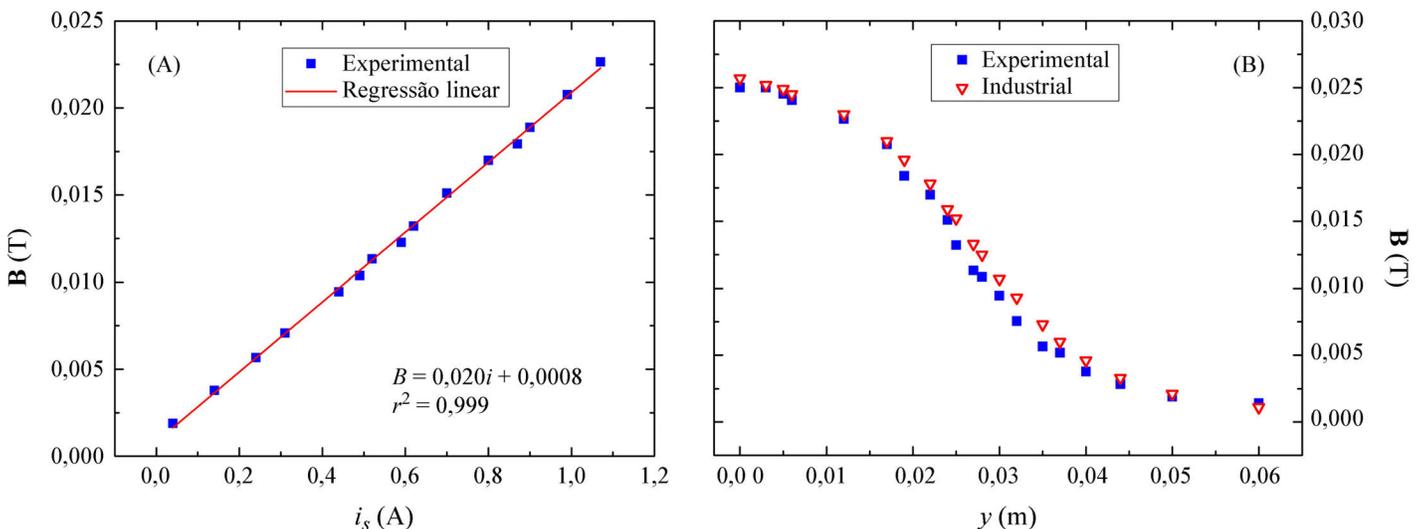


Figura 7 - (A) Campo magnético  $B$  em função da corrente  $i_s$  a aplicada no solenoide. (B) Campo magnético  $B$  em função da distância  $y$  do sensor ao centro da bobina. Dados do gaussímetro proposto e do equipamento industrial.

## Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos aos professores Ernesto von Rückert e Sergio de Abreu Mello, pela

leitura e comentários sobre o trabalho. Agradecemos também às agências de fomento CAPES (Código de Financiamento 001), CNPq e FAPEMIG pelo

apoio financeiro.

Recebido em: 10 de Setembro de 2020  
Aceito em: 31 de Dezembro de 2020

## Referências

- [1] F. Marineli, J.L.A. Pacca, Revista Brasileira de Ensino de Física **28**, 497 (2006).
- [2] R.S. Andrade, K.S.L. Viana, Ciênc. Educ. **23**, 2 (2017).
- [3] W.C. Magno, M. Andrade, A.E.P. DE Araújo, Revista Brasileira de Ensino de Física **32**, 3403 (2011).
- [4] E. Arribas, I. Escobar, R.R. Vazquez, C.P.S. Rodriguez, J.G. Rubio, A. Belendez, The Physics Teacher **58**, 182 (2020).
- [5] E. Arribas, I. Escobar, C.P. Suarez, A. Najera, A. Beléndez, Eur. J. Phys. **36**, 065002 (2015).
- [6] E. Lüdke, C.A. Gomes, Revista Brasileira de Ensino de Física **33**, 1503 (2011).
- [7] F. Marujo, G. Azzi, M. Buchner, Notas Técnicas CBPF **5**, 2 (2015).
- [8] J. Goldemberg, *Física Geral e Experimental* (Editora Nacional, São Paulo, 1973), v. 2, 1ª ed.
- [9] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2007), v. 3, 8ª ed.
- [10] Datasheet SS49E, (Honeywell International Inc, 2003), disponível em: <http://www.mosaico.com.br/Midias/Documentacao/ss49e.pdf>, acesso em 10 ago. 2020.
- [11] Phywe, *digital teslameter* (Alemanha, 2020), disponível em: <https://www.phywe.com/en/teslameter-digital.html>, acesso em 10 ago. 2020.
- [12] Datasheet SS49E, (SEC Electronics Inc, 2013), disponível em: <https://www.addicore.com/SS49E-Linear-Hall-Sensor-p/ad316.htm>, acesso em 10 ago. 2020.