

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/271194915>

# Uso de sensores GMR para estudo do campo magnético gerado por solenóides

Article · January 2004

---

CITATIONS

0

READS

253

2 authors, including:



Vagner Bernal Barbeta

FEI University

51 PUBLICATIONS 518 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Best models in Technology Transfer Offices (TTO) [View project](#)

# USO DE SENSORES GMR PARA ESTUDO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR SOLENÓIDES

*Neste trabalho apresentamos um sistema didático para o estudo do campo magnético gerado por solenóides, utilizando sensores de campo magnético baseados no efeito de magnetorresistência gigante (GMR). O efeito de magnetorresistência gigante é observado em diversos compostos, e consiste de grandes alterações das propriedades de transporte do material, quando este é submetido a um campo magnético externo. O baixo custo destes sensores e a sua boa sensibilidade têm levado à sua aplicação em diversos sistemas em que a medida de campos magnéticos (contínuos e alternados) se faz necessária. O sensor utilizado consiste basicamente de uma ponte de Wheatstone, onde dois braços opostos são compostos de um material que apresenta efeito de magnetorresistência gigante, e os outros dois são resistores comuns blindados. O campo magnético é obtido através da diferença de potencial na saída da ponte. Esta diferença de potencial é medida por meio de uma placa de voltímetro eletrônico DVM4060 da National Instruments, conectada a um PC, o qual contém um software que foi desenvolvido em linguagem Visual Basic para análise dos dados. Dessa forma, é possível mapear o campo magnético de um solenóide em tempo real, possibilitando assim a rápida comparação com o modelo teórico e a correção de eventuais erros de medida.*

*In this work we present a didactical experiment for studying the magnetic field created by a coil. The magnetic field is measured using a sensor based on the Giant Magnetoresistance (GMR) effect. The GMR effect is observed in some special compounds, and it is characterized by strong changes in the transport properties of the material when it is exposed to a magnetic field. Low cost and good sensitivity are the main aspects that make these sensors suitable to many applications where it is necessary to measure magnetic fields (continuous or alternated). The sensor is encapsulated in a small integrated circuit and it contains four resistors connected in a Wheatstone Bridge configuration. Two of these resistors, located in opposite arms of the bridge, are sensible to the magnetic field and the other two are common shielded resistors. The magnetic field is proportional to the potential in the output of the bridge. This potential is measured through a National DVM4060 data acquisition board that is connected to a PCI bus in a PC compatible microcomputer. The computer contains a software developed in Visual Basic to acquire and to analyze the data. Therefore it is possible to map, in real time, the magnetic field of a coil, making possible to quickly compare the results with the theoretical model and to correct any experimental error, while the experiment is being performed.*

**C.R. MARZULLI - Engenheira formada pelo Centro Universitário da FEI**  
**V.B. BARBETA - Professor doutor e chefe do Departamento de Física do Centro Universitário da FEI**

**Palavras-chave:** Magnetorresistência gigante, sensores de campo, laboratórios didáticos de física, campo magnético.

**Key words:** Giant magnetoresistance, field sensors, physics lab classes, magnetic field.

## INTRODUÇÃO

As atividades de laboratório são uma parte importante do processo de ensino de Física. Tradicionalmente, na disciplina de Física III <sup>[1]</sup>, são explorados os conceitos relativos aos fenômenos da eletrostática e do magnetismo. Dentro da área de magnetismo, o estudo de solenóides infinitos, é muitas vezes utilizado para mostrar uma aplicação da Lei Circuital de Ampère. Uma atividade de laboratório normalmente desenvolvida nesse momento, é o estudo do campo gerado por solenóides finitos. Geralmente isso é feito alimentando-se o solenóide com uma corrente alternada, e medindo-se o campo magnético criado por ele em diferentes posições ao longo de seu eixo de simetria, com o uso de um sistema de bobina sonda (*pick-up coil*). Tal arranjo apresenta alguns problemas, como as dimensões não desprezíveis da bobina-sonda, o fato de se necessitar alimentar o solenóide com corrente alternada, etc.

O uso de algum outro tipo de sensor <sup>[2]</sup> pode, a princípio, tornar o experimento mais simples, podendo-se assim concentrar o conteúdo da aula de laboratório muito mais no experimento, e menos na técnica utilizada para realizá-lo. Neste sentido, o uso de um sensor de aplicação simples, integrado a um sistema de coleta automática de dados, pode fornecer uma forma bastante proveitosa de se realizar o experimento.

O elemento principal deste trabalho é o desenvolvimento de um experimento didático para mapeamento do campo magnético produzido por um solenóide. Para tanto, estamos utilizando um sensor baseado no efeito de magnetorresistência gigante (GMR), o qual apresenta uma diferença de potencial em sua saída diretamente proporcional ao campo magnético a que está sujeito. Este sensor está integrado a um sistema de medida com aquisição de dados por computador. Além de tornar possível o mapeamento do campo magnético em tempo real,

com a visualização do gráfico do campo magnético em função da posição do sensor, possibilita ainda a comparação dos resultados com o modelo teórico e assim, facilita a identificação de eventuais erros de medida durante a realização do experimento. Experimentos deste tipo, em que recursos de aquisição e análise de dados por computador são utilizados, têm se mostrado uma ferramenta poderosa nos laboratórios didáticos de física <sup>[3]</sup>.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Campo gerado por um solenóide

Ao percorrermos um condutor com uma certa corrente, este irá gerar um campo magnético em seu entorno que pode ser calculado utilizando-se a lei de Biot-Savart. No caso de sistemas com alto grau de simetria, a lei de Ampère nos fornece uma alternativa muito mais simples e elegante de se obter este campo magnético.

Se analisarmos, por exemplo, uma espira circular de raio  $R$  percorrida por uma certa corrente  $I$ , o campo magnético  $B$  num ponto cuja distância do centro da espira é  $x$ , ao longo do seu eixo de simetria, será dado por:

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

Se juntarmos uma série de espiras, uma ao lado da outra, iremos constituir um solenóide, cujo campo pode ser

deduzido utilizando-se o princípio da superposição, isto é, realizando-se uma integração sobre a região do espaço onde se encontram as espiras.

Consideremos um solenóide de secção reta circular composto de  $N$  espiras, de raio  $R$ , comprimento  $L$  e que é percorrido por uma corrente  $I$ , conforme mostrado na figura 1. Se fixarmos a origem do eixo  $x$  no centro do solenóide, podemos mostrar que o campo magnético  $B$  ao longo deste eixo será dado por:

$$B(x) = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot L} \cdot (\text{sen}\Phi_1 + \text{sen}\Phi_2)$$

Os ângulos  $\text{sen}\Phi_1$  e  $\text{sen}\Phi_2$  dependem da posição  $x$  em que se deseja obter o campo e serão dados por:

$$\text{sen}\Phi_1(x) = \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} + x\right)^2 + R^2}}$$

$$\text{sen}\Phi_2(x) = \frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + R^2}}$$

De maneira análoga, no caso de um solenóide de secção reta quadrada, a expressão para o campo magnético gerado pode ser obtida partindo-se do campo magnético gerado por uma única espira. Pode-se mostrar que o campo magnético a uma distância  $x$  do centro de uma espira quadrada de lado  $2R$ , ao longo do eixo de simetria desta

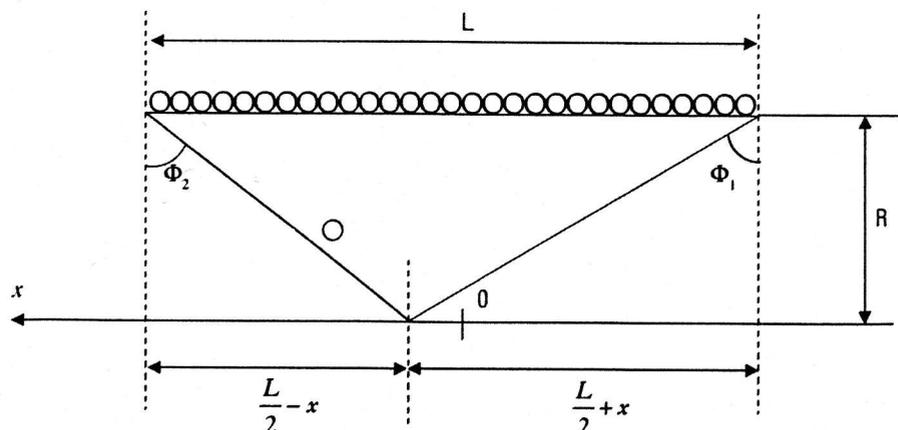


Fig. 1 - Vista em corte de um solenóide de secção reta circular de comprimento  $L$  e raio  $R$ .

espira, quando esta é percorrida por uma corrente  $I$ , é dado por:

$$B(x) = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot R^2}{\pi \cdot (x^2 + R^2) \cdot \sqrt{2 \cdot R^2 + x^2}}$$

Novamente, se fizermos uma integração, superpondo o campo gerado por uma série de  $N$  espiras colocadas uma ao lado da outra formando um solenóide de comprimento  $L$ , obteremos o campo magnético ao longo do eixo de simetria desta bobina, que será dado por:

$$B(x) = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{\pi \cdot L} \times \left[ a \tan \left[ \frac{tg_2(x)}{\sqrt{\frac{1+cs_2(x)^2}{cs_2(x)^2}}} \right] - a \tan \left[ \frac{tg_1(x)}{\sqrt{\frac{1+cs_1(x)^2}{cs_1(x)^2}}} \right] \right]$$

As funções  $tg_1(x)$ ,  $tg_2(x)$ ,  $cs_1(x)$  e  $cs_2(x)$  são dadas por:

$$tg_1(x) = -\frac{\frac{L}{2} - X}{R}$$

$$tg_2(x) = -\frac{\frac{L}{2} + X}{R}$$

$$cs_1(x) = -\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} - X\right)^2}}$$

$$cs_2(x) = -\frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} + X\right)^2}}$$

Embora as expressões que descrevem o campo magnético gerado pelos dois tipos de solenóides apresentem características bastante distintas, se analisarmos o perfil do campo esperado para cada uma das geometrias, estes não apresentam grandes diferenças. A figura 2 mostra uma comparação entre os dois modelos teóricos (solenóide com secção reta quadrada e circular).

Analisando o comportamento do campo no centro do solenóide (onde  $x=0$ ), percebemos que o campo é ligeiramente maior na geometria circular. Por outro lado, se observarmos o campo em pontos mais afastados do centro (ainda no eixo de simetria) observamos que a situação é inversa. Este comportamento é esperado, pois podemos identificar a competição de dois fatores para a determinação do valor do campo magnético do solenóide. De um lado, cada espira quadrada tem um comprimento maior que a correspondente espira circular, contribuindo assim com uma "quantidade maior" de elementos infinitesimais para a determinação do campo. Por outro, a distância dos elementos infinitesimais ao centro da espira é maior na espira quadrada do que na espira circular. Deste modo, para pequenas distâncias  $x$ , o campo gerado pela configuração quadrada é menor do que o gerado pela circular, pois o fator distância é o dominante. Para grandes distâncias  $x$ , o comprimento maior da espira quadrada é o fator dominante, e assim, o campo gerado pelo solenóide de secção reta quadrada é maior.

Embora estas diferenças sejam pequenas, quando desejamos realizar o ajuste de um conjunto de pontos experimentais ao modelo teórico, é importante levar em conta o tipo de secção reta do solenóide utilizado, conforme veremos mais adiante na análise de nossos resultados experimentais.

### Técnicas para medida de campo magnético

Existem muitas formas de se medir campos magnéticos [1] e a maior parte delas é baseada na junção de dois fenômenos: o elétrico e o magnético. Dependendo da técnica utilizada, têm-se diferentes faixas de sensibilidade de campo. A tabela 1 mostra a comparação de vários tipos de sensores magnéticos em termos de faixa de sensibilidade. Porém, não é só a sensibilidade que determina a aplicação ou não de um determinado tipo de sensor. Existem outros parâmetros que podem ser os determinantes na escolha do tipo de sensor mais adequado para uma determinada aplicação como, por exemplo, a potência consumida, as dimensões, a capacidade de medir campos contínuos e alternados e a resposta em frequência.

Tipo de sensor	Campo mínimo (gauss)	Campo máximo (gauss)
Bobina sonda	$10^{-7}$	$10^9$
Flux-Gate	$10^{-6}$	$10^3$
Squid	$10^{-9}$	$10^{-3}$
Efeito Hall	10	$10^8$
Magnetorresistivo	$10^{-5}$	$10^3$
Fibra óptica	$10^{-5}$	$10^2$
Magneto-óptico	10	$10^9$

Tab. 1 – Diferentes tipos de sensores de campo magnético e respectivas faixas de sensibilidade.

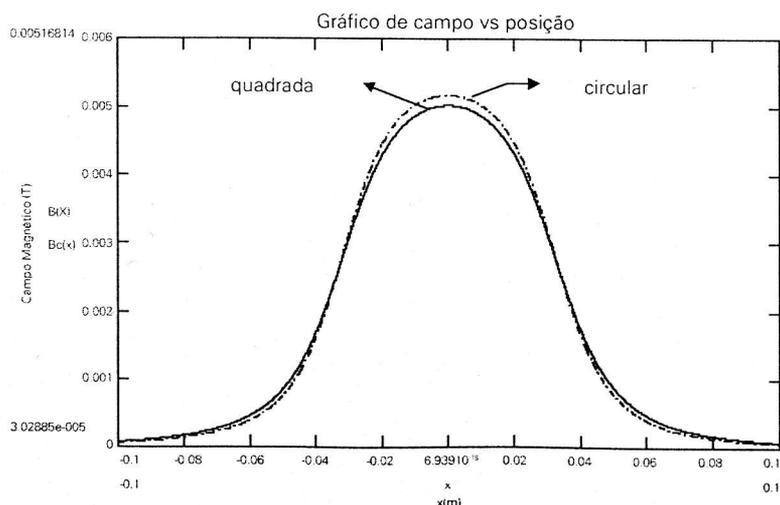


Fig. 2 – Comparação entre o campo gerado por um solenóide de secção reta circular e quadrada.

Vejamos a seguir, mais detalhadamente, as técnicas de medida de campo magnético baseadas nestes tipos de sensores, seus princípios de funcionamento, limitações e faixas de sensibilidade.

#### » Bobina Sonda

Esta técnica de medida de campo magnético é baseada na lei de Indução de Faraday. Consiste basicamente de um enrolamento (bobina-sonda), sendo que em alguns casos uma barra de material ferromagnético é inserida no interior deste enrolamento para concentrar mais linhas de campo e dessa forma aumentar a densidade de fluxo magnético que passa pela barra. A variação de campo magnético faz com que seja induzida uma diferença de potencial na bobina-sonda, sendo esta diferença de potencial proporcional à variação do fluxo do campo magnético. Como a área da secção transversal da bobina sonda é fixa, a diferença de potencial é proporcional à variação do campo magnético. Assim, se o campo magnético variar senoidalmente, teremos uma variação senoidal da tensão induzida, cuja amplitude é proporcional à intensidade do campo magnético. A sensibilidade desta técnica de medida depende da permeabilidade do material utilizado como núcleo, da área da secção transversal da bobina e do número de espiras. A resposta em frequência do sensor é limitada pela razão entre a indutância da bobina e a sua resistência. Na prática, a tensão induzida pode limitar a sensibilidade e a resposta em frequência do sensor. Sensores desse tipo conseguem detectar campos pequenos, de até  $10^{-6}$  gauss, e campos maiores que  $10^6$  gauss, porém possuem a desvantagem de conseguirem medir somente campos magnéticos alternados. Esta técnica é muito utilizada para a medida de magnetização de materiais magnéticos (isto é, para a medida do campo magnético gerado por certos materiais). Neste caso, o que se faz é movimentar a amostra dentro das

bobinas, pois deste modo teremos uma tensão induzida que será proporcional à magnetização da amostra. Este sistema de medida de magnetização é conhecido como magnetômetro de amostra vibrante.

#### » Flux-Gate

Este sensor consiste de um material ferromagnético envolvido por duas bobinas e é baseado na combinação da indução magnética com a histerese apresentada em materiais ferromagnéticos.

Quando uma corrente alternada é aplicada em uma das bobinas a corrente magnetiza o material ferromagnético, fazendo com que ocorra saturação em cada metade do ciclo (histerese). Devido à histerese, o fluxo do campo magnético através do núcleo será um *loop* se for graficado contra a intensidade do campo magnético. Alterações na densidade de fluxo através do material será sentida pela segunda bobina. Como o material é levado à saturação, sua relutância para o campo magnético externo aumenta, fazendo com que este caminho seja menos atrativo para o campo externo. Como este campo é repellido, a segunda bobina sente esta alteração. Quando o material sai da região de saturação por causa da redução da corrente que passa pela bobina, o campo magnético é novamente atraído pelo material, sendo então sentido pela segunda bobina. Assim, alternadamente atração e repulsão criam linhas de fluxo magnético que cortam a segunda bobina. A tensão na saída da segunda bobina consistirá de harmônicos ímpares da frequência de excitação, e será proporcional ao campo magnético a que se encontra submetida.

A sensibilidade do sensor depende do aspecto da curva de histerese do material. Para uma sensibilidade máxima, a curva de indução do campo magnético deverá ser quadrada, já que nesta situação produz a maior diferença de potencial induzida para um dado valor de campo magnético. Para uma mínima potência de consumo o material

deve ter baixo valor de coercitividade e de campo de saturação. A faixa de sensibilidade vai de  $10^{-6}$  gauss a 100 gauss. A resposta em frequência do sensor é limitada pelo campo de excitação e o tempo de resposta do material ferromagnético. O limite superior de frequência é de aproximadamente 10 kHz. Este sensor assemelha-se com o de bobina sonda, em termos de tamanho, porém consome cinco vezes mais potência. A maior vantagem em relação ao sistema de bobina-sonda é a habilidade para a medida de campos magnéticos contínuos.

#### » SQUID

O *SQUID* (*Superconducting Quantum Interference Device*) é atualmente o mais sensível de todos os sensores utilizados para medir campo magnético, tendo uma sensibilidade de mais de três ordens de grandeza maior que os sensores de campo convencionais. Ele se baseia na interação entre corrente elétrica e campo magnético quando certos materiais, a partir de uma determinada temperatura, tornam-se supercondutores.

O *SQUID* é formado por um anel supercondutor interrompido por uma fina camada de material isolante. Pode possuir uma ou duas junções supercondutor/isolante deste tipo, também chamadas de junções Josephson, formando os chamados *SQUID RF* e *SQUID DC*, respectivamente. O Efeito Josephson se caracteriza por uma corrente crítica, abaixo da qual uma junção supercondutor-isolante-supercondutor apresenta uma baixa resistência à passagem da corrente, e assim a voltagem entre seus terminais é nula. Se a corrente excede a corrente crítica, a junção passa para o estado normal, e é observada uma voltagem entre seus terminais.

Quando uma linha de fluxo é introduzida no anel do *SQUID*, a corrente crítica diminui. Deste modo, uma medida da variação da corrente crítica possibilita a determinação, com alta resolução, da variação do fluxo que atravessa o anel.

Sua sensibilidade está numa faixa entre  $10^{-10}$  G e  $10^{-4}$  G. O *SQUID* em si, é pequeno, porém a necessidade de hélio líquido para estabelecer o estado supercondutor torna o sistema grande e pesado. *SQUIDS* mais modernos podem fazer uso de supercondutores de alta temperatura e serem operados na faixa de temperatura do nitrogênio líquido (77 K). O grande consumo de potência se deve basicamente à eletrônica envolvida no tratamento do sinal.

#### > Sensor de efeito Hall

Se pegarmos uma fina placa retangular de material condutor, sujeita a um campo magnético externo perpendicular ao plano do retângulo, e fizermos passar por ela uma corrente elétrica ao longo de seu comprimento, haverá uma força que agirá sobre esses elétrons em movimento, arrastando-os em uma direção perpendicular à trajetória e à direção do campo magnético. Com o passar do tempo elétrons irão se acumular em uma das bordas da placa, deixando a outra eletricamente positiva. Dessa forma surge uma diferença de potencial entre as duas bordas (aquelas paralelas à direção de movimento dos elétrons), a qual é proporcional ao campo magnético externo.

O silício tem uma sensibilidade que vai de 10 G a 1000 G. Pode medir campos magnéticos contínuos e alternados, até uma frequência máxima de aproximadamente 1 MHz. A potência necessária para seu funcionamento está entre cerca de 0,1 e 0,2 W, sendo que podem ser operados em uma larga faixa de temperaturas, limitada somente pelo tipo de invólucro e do sistema de ligação dos terminais.

#### > Sensor Magnetorresistivo

Este sensor se baseia no efeito de magnetorresistência, uma variação no valor da resistência causada por um campo magnético externo. Materiais

como *permalloy* (uma liga de níquel e ferro) podem ser magnetizados em uma certa direção, passando-se uma corrente em uma direção paralela à direção em que se deseja estabelecer a magnetização. Se um campo magnético é então aplicado perpendicularmente à corrente, a direção de magnetização sofre uma rotação para a direção do campo magnético. O ângulo de rotação depende da amplitude do campo magnético externo. A resistência desse elemento (*permalloy*) decresce conforme a direção de magnetização é rotacionada em relação à direção da corrente, pois os elétrons se movendo na direção de magnetização têm uma grande tendência a serem espalhados. A resistência é bem maior quando a magnetização é paralela à corrente, e é bem menor quando é perpendicular à corrente. O *permalloy* é o material mais comum para fabricação de sensores deste tipo, por ser o coeficiente de magnetorresistência relativamente alto e por ter magnetostrição (isto é, variação do comprimento com o campo) nula.

A sensibilidade deste tipo de sensor está entre  $10^{-2}$  G e 50 G, podendo chegar até  $10^{-6}$  G, dependendo da eletrônica utilizada. Pode medir campos magnéticos contínuos ou alternados, sendo o limite de frequência superior de cerca de 1 GHz. Além de ser um sensor pequeno, utiliza potências entre 0,1 e 0,5 mW e pode ser operado em temperaturas de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$ .

#### > Sensor por fibra óptica

Este sistema consiste de dois cabos de fibra óptica, um deles de referência e o outro envolto com um material magnetostriativo. Um feixe de laser é dividido em dois subfeixes que são enviados pelos dois cabos. Ao final são recombinados e detetados por um fotodetector. Quando o material magnetostriativo é submetido a um campo magnético, ocorre uma alteração em seu comprimento e, consequen-

temente, o caminho percorrido pela luz é ligeiramente menor. A interferência dos dois feixes causa uma variação na intensidade detectada pelo fotodetector, sendo esta alteração proporcional à variação do comprimento do material magnetostriativo, e consequentemente proporcional ao campo magnético externo. Alterações de até  $10^{-13}$  m podem ser detectadas com esse interferômetro. Este sistema tem uma sensibilidade que está na faixa de  $10^{-7}$  G até 10 G. Pode ser utilizado para detetar campos constantes ou alternados, com frequências abaixo de 60 kHz. Seu tamanho depende da sensibilidade necessária.

#### > Sensor Magneto-Óptico

Este sensor explora um outro efeito descoberto por Faraday, que envolve a rotação de um plano de luz polarizada quando esta atravessa um material magnético. Este efeito é mais intenso em cristais quando as direções de propagação da luz, o eixo do cristal e o campo magnético aplicado estão alinhados.

Pode-se considerar que uma onda plana de luz polarizada é composta de duas ondas polarizadas circularmente: uma no sentido horário, e outra no sentido anti-horário. A rotação da polarização da onda plana resulta de uma mudança na fase relativa das ondas horária e anti-horária. O efeito descoberto por Faraday resulta de uma mudança no índice de refração do cristal, o qual depende da precessão dos elétrons ao longo do campo magnético longitudinal ocorrer da mesma forma ou oposta à rotação do campo elétrico da luz polarizada circularmente.

A grande vantagem desse equipamento em relação aos outros é o rápido tempo de resposta. Sensores com resposta em frequência de gigahertz têm sido fabricados. A sensibilidade magnética desse sensor é mais moderada porque o efeito de polarização de Faraday é pequeno em relação ao campo magnético da Terra.

**Sensores de campo magnético GMR**

Em 1988 descobriu-se que certos compostos apresentavam variação de várias ordens de grandeza no valor de sua resistividade quando submetidos a um campo magnético externo.

Estes compostos consistem basicamente de múltiplas camadas de materiais ferromagnéticos e não-magnéticos. Quando não submetidos a um campo externo, as camadas adjacentes de material ferromagnético se alinham numa configuração antiferromagnética (com os momentos magnéticos em oposição) para minimizar a energia. Quando um campo externo é aplicado, as camadas adjacentes passam a ter uma configuração ferromagnética (isto é, com os momentos magnéticos na mesma direção). Na configuração antiferromagnética existe um maior espalhamento dos elétrons de condução do que no caso da configuração ferromagnética. Assim, o maior ou menor espalhamento dos elétrons de condução na interface entre duas camadas adjacentes, através da aplicação de um campo magnético externo, é o responsável pelo efeito de variação das propriedades de transporte. A descoberta deste efeito, conhecido como Magnetorresistência Gigante (GMR), levou ao desenvolvimento de sensores que permitem a medição de campos magnéticos contínuos e alternados.

Uma aplicação deste tipo de sensor é na indústria eletrônica, principalmente na produção de cabeças de leitura de gravadores de vídeo e de discos rígidos de computadores, com alta sensibilidade, o que permite a construção de discos de armazenamento magnético com alta densidade de dados.

Uma grande vantagem na utilização do efeito GMR é a rapidez com que a informação magnética é transformada em sinal elétrico [5].

**APARATO EXPERIMENTAL**

O sensor utilizado nesse experimento, conforme mostra a figura 3b, consiste basicamente de uma ponte de

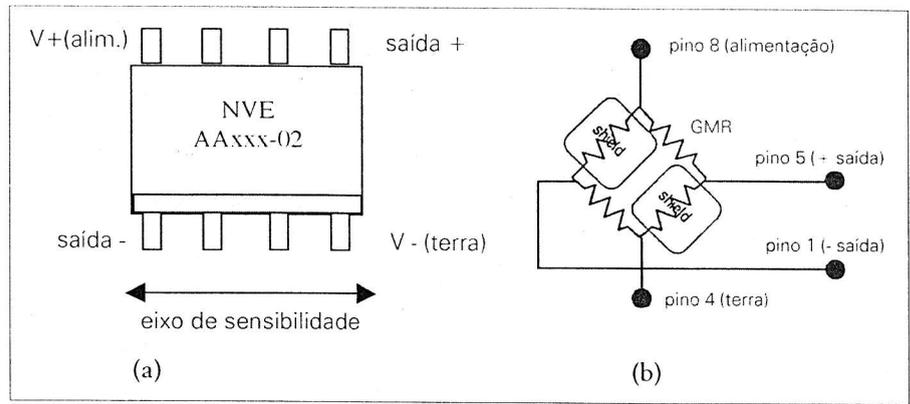


Fig. 3 - (a) Pinagem do sensor da NVE e (b) o respectivo bloco funcional.

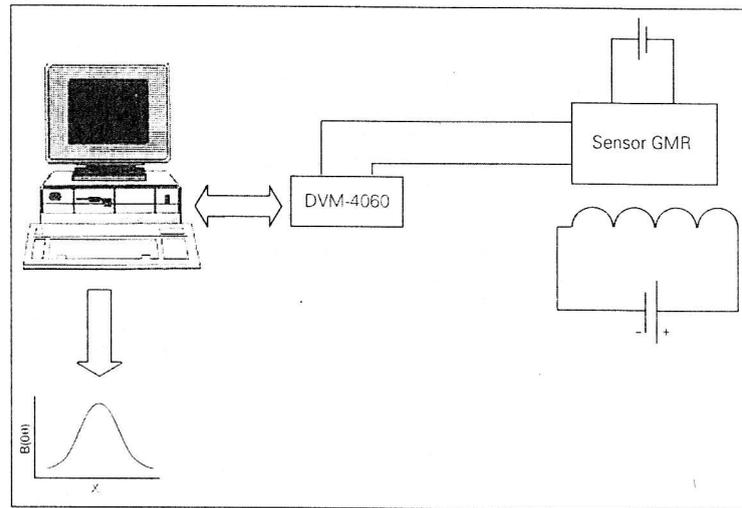


Fig. 4 - Esquema da montagem experimental implementada.

Wheatstone, onde dois braços opostos são compostos de um material que apresenta efeito de magnetorresistência gigante, e os outros dois, são dois resistores comuns blindados. Estes sensores são fabricados pela NVE [6] e são encapsulados na forma de um circuito integrado SMD (*Surface Mounting Device*), com cerca de 7 mm de comprimento por 4 mm de largura. A sua pinagem pode ser observada na figura 3a, e o seu eixo de sensibilidade é longitudinal, ao longo de sua maior dimensão.

O sensor que foi utilizado é o AA005-02. Este foi escolhido em função do seu alto valor de campo de saturação (o maior valor de campo de saturação de todos os sensores disponíveis). A tabela 2 mostra a faixa de sensibilidade de cada sensor, bem como os valores de campo de saturação.

O sensor foi alimentado com tensão contínua de 10 V (que pode ser alterada, até um máximo de 18 V), e a sua saída ligada a uma placa de voltímetro eletrônico DVM4060 (da *National Instruments*), conectada a um microcompu-

Código	Campo de saturação (Oe)	Região linear (Oe)		Sensibilidade máxima (mV/V/Oe)
		Min.	Máx.	
AA002-02	15	0	10,5	4,2
AA003-02	20	0	14	3,2
AA004-02	50	0	35	1,3
AA005-02	100	0	70	0,65

Tab. 2 - Características dos sensores da NVE.

tador PC Pentium III, através de um slot PCI. O sensor foi fixo em uma régua que corria longitudinalmente no interior de um solenóide retangular. A figura 4 apresenta um esquema do arranjo experimental.

Foi desenvolvido um software para esse experimento, utilizando-se linguagem Visual Basic. Este software converte os valores de tensão coletados na saída do sensor, em valores de campo magnético, através da aplicação de um fator de calibração. Estes resultados são apresentados em um gráfico de campo magnético em função da posição  $x$  do sensor. Toda a parte gráfica foi criada utilizando-se um controle *Active X* que se encontra no sistema de desenvolvimento "Component Works" da National Instruments. A tela principal do software é mostrada na figura 5.

Para a realização do experimento, coloca-se inicialmente o sensor no centro do solenóide, onde o campo é máximo. Digita-se a posição do sensor indicada pela régua (no caso do centro, a posição é zero) e, a seguir, clica-se sobre o botão medida, o qual efetua a leitura do campo magnético e desenha no gráfico o ponto correspondente. Efetuada a primeira medida, a régua é deslocada de um certo  $\Delta x$  (um centímetro, por exemplo) e um novo ponto é coletado, e assim sucessivamente. Com isso, obtém-se o campo para um dos lados da bobina. O campo para o outro lado da bobina é construído pelo software automaticamente, usando-se a simetria do sistema. Além da aquisição dos pontos, o software traça uma curva teórica por cima dos pontos coletados, tornando possível uma comparação entre os valores teóricos e os experimentais.

O software também possibilita estudar o campo magnético gerado por uma associação de dois solenóides em série com mesma fase e em oposição de fase, e para diferentes valores de corrente. A figura 6 mostra a tela do arranjo experimental onde tais configurações são feitas. Ainda nessa tela é possível variar outros parâmetros como, por

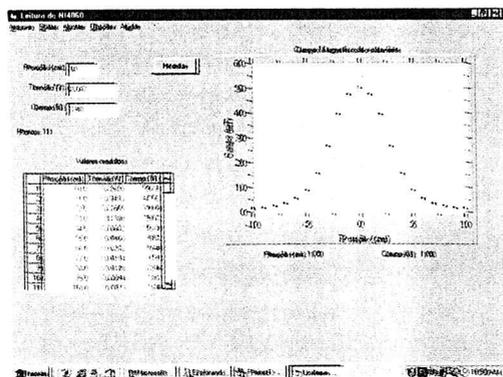


Fig. 5 – Tela principal do software para mapeamento do campo magnético de um solenóide.

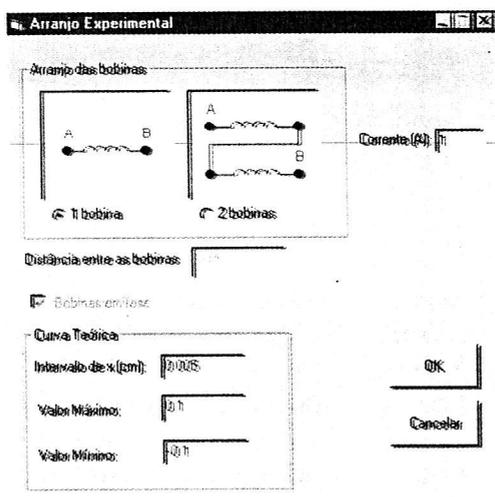


Fig. 6 – Tela do programa onde podem ser visualizadas e alteradas as características do arranjo experimental.

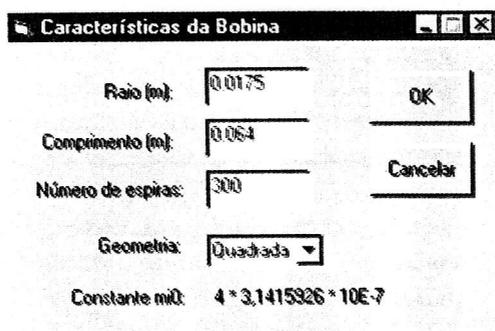


Fig. 7 – Tela do programa onde podem ser visualizadas e alteradas as características do solenóide.

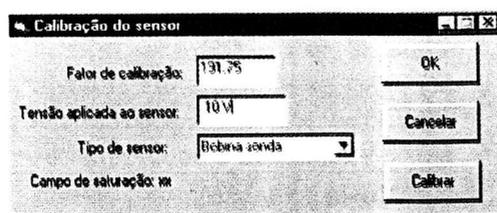


Fig. 8 – Tela do programa onde podem ser visualizadas e alteradas as características do sensor a ser utilizado na aquisição dos dados.

exemplo, a distância entre os solenóides e as características da curva teórica (valor mínimo e máximo da posição, para determinar o intervalo de valores de  $x$  em que o gráfico será traçado). As características do experimento, como o raio do solenóide, comprimento, número de espiras e geometria (quadrada ou circular) podem ser modificadas em uma outra tela, conforme mostra a figura 7.

É possível também utilizar o software desenvolvido para o mapeamento do campo magnético utilizando-se como sensor uma bobina-sonda, ao invés do sensor GMR. Uma tela foi criada para possibilitar a escolha da técnica de medida a ser utilizada, conforme é observado na figura 8.

Também foram incluídos no software uma série de outras facilidades, como a possibilidade de se salvar ou carregar um conjunto de pontos, apagar um dado incorreto, etc.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

O gráfico mostrado na figura 9 foi feito com a finalidade de se determinar a curva característica do sensor e delimitar sua região linear de funcionamento. Todos os pontos foram obtidos com o sensor localizado no centro do solenóide, pois neste ponto o campo é máximo. Nesse gráfico, temos a tensão de saída do sensor em função do campo magnético a que este se encontra submetido.

Observamos que até um pouco mais de 50 G, o sensor está em sua região linear. A partir desse valor, começa a entrar na região de saturação. Decidimos em nosso sistema trabalhar na região linear, pois existe nesse caso uma conversão simples entre o valor da diferença de potencial e o valor do campo magnético. Pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos na região linear, podemos obter o fator de calibração, que vale cerca de 191,75 G/V (para o caso de uma tensão de alimentação de 10 V).

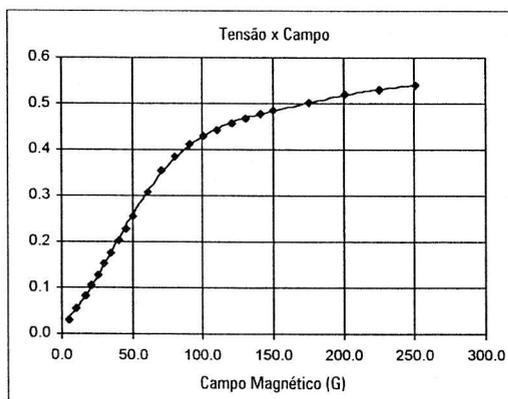


Fig. 9 - Curva de tensão de saída do sensor em função do campo magnético externo aplicado.

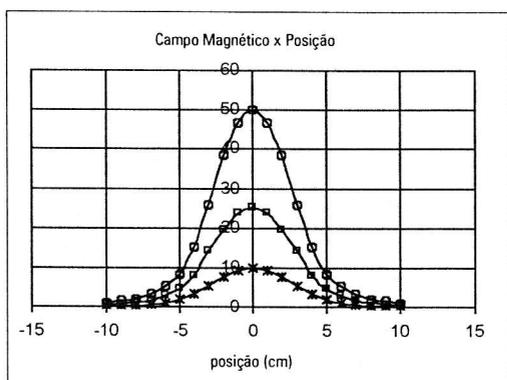


Fig. 10 - Resultados experimentais obtidos para diferentes valores de corrente do solenóide.

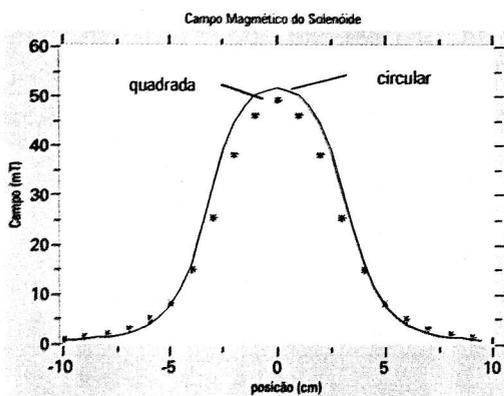


Fig. 11 - Comparação entre ajustes obtidos para solenóide de secção reta de geometria quadrada e circular.

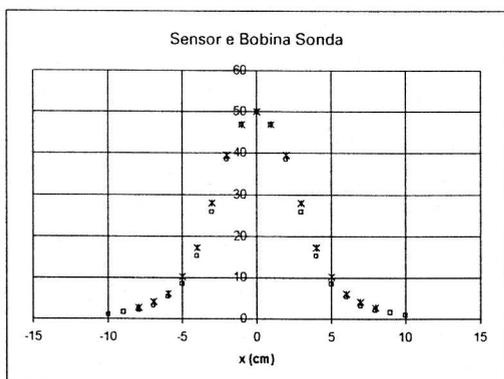


Fig. 12 - Comparação entre os resultados obtidos usando-se sensor GMR e bobina-sonda.

O gráfico da figura 10 apresenta o resultado do ensaio do solenóide para diferentes valores de corrente.

Na figura 11 estão presentes os pontos obtidos experimentalmente para uma corrente de 1 A e foram realizados dois ajustes, um para solenóide de geometria circular e outro para geometria quadrada. Como o solenóide usado nessa experiência tem secção reta quadrada, o melhor ajuste foi o do modelo para uma geometria quadrada, conforme era esperado. Os pontos mostrados na figura foram coletados pelo sistema, e os

ajustes realizados pelo próprio programa desenvolvido.

Na figura 12 temos uma comparação entre dois métodos de medida de campo, um feito com sensor GMR (em corrente contínua) e outro com bobina-sonda (em corrente alternada).

Foi feito um ajuste para que as duas curvas tivessem o valor máximo coincidindo no mesmo ponto apenas para compararmos os dois resultados. Como pode ser observado pela figura, os resultados obtidos com o sensor GMR são bastante próximos daqueles obtidos com bobina-sonda.

Como o sensor GMR nos possibilita medir campo contínuo e alternado, o próximo passo poderia ser realizar uma comparação entre os resultados obtidos com o

sensor GMR em corrente alternada com o sistema de bobina-sonda, bem como a colocação de barras de erro, de forma a determinar qual sistema apresenta melhor sensibilidade.

O estudo feito até agora para um solenóide pode ser complementado incluindo-se um segundo solenóide e alterando-se alguns parâmetros, tais como oposição ou não de fase, valor da corrente e distância entre os mesmos. Isto deverá vir a ser realizado em breve.

## CONCLUSÕES

Com os dados obtidos até agora, podemos observar que o sistema desenvolvido é simples de ser implementado e apresenta bom desempenho, assim como o mapeamento do campo magnético é fácil de ser realizado e os resultados apresentam boa precisão.

Conforme estudo feito com os modelos teóricos, o melhor ajuste para o solenóide disponível é o modelo para secção reta quadrada, o que era esperado, devido à geometria do solenóide utilizado.

Os resultados obtidos com o sensor GMR são tão bons quanto os obtidos com a bobina-sonda, com a vantagem de que ele possibilita medir campo em corrente contínua e alternada, enquanto que a bobina-sonda permite somente a medida em corrente alternada. □

## Bibliografia

1. D. HALLIDAY, R. RESNICK - Fundamentos de Física - Eletromagnetismo. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1994 - volume 3.
2. R. A. SERWAY - Física Moderna, Relatividade, Física Atômica e Nuclear. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996 - volume 4.
3. J. PRIEST, "Hands on Magnetic Field Measurements with a GMR Sensor", Phys. Teacher, vol. 37, pp345-347, setembro (1999).
4. J. LENZ, "A Review of Magnetics Sensors", Proceedings of the IEEE, vol.78, n° 6, pp973-978, junho (1990).
5. J. LOPEZ, P. N. LISBOA FILHO, W. A. C. PASSOS, W. A. ORTIZ e F. M. ARAUJO-MOREIRA, "Breve introdução à magnetoresistência colossal e outros efeitos correlacionados", Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, n° 3, pp378-381, setembro (2000).
6. Uma empresa que desde 1994 produz comercialmente estes sensores é a NVE (Non Volatile Electronics). Os sensores desenvolvidos pela NVE consistem de compostos que apresentam o efeito de Magnetoresistência Gigante encapsulados em circuitos integrados SMD.