

TESE DE MESTRADO

**Implementação de um sensor de campo magnético baseado no
fenômeno de Magnetoresistência Gigante**

Sarah dos Santos Rabelo

**MESTRADO EM INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA
CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS**

Rio de Janeiro, Março de 2004

TESE DE MESTRADO

**Implementação de um sensor de campo magnético baseado no
fenômeno de Magnetoresistência Gigante**

Sarah dos Santos Rabelo

**Tese submetida ao Departamento de Matéria Condensada e Física Estatística
como requisito para obtenção do grau
de Mestre em Instrumentação Científica.**

Orientador

Ivan S.Oliveira

Ao meu noivo

Fábio Rezende

e ao meu sobrinho

Yago Belloni,

com amor. . .

Agradecimentos

Quando importantes etapas de minha vida vão chegando ao fim, um emaranhado de sentimentos se emolduram como teias e machucam... Quisera eu adornar meu próprio destino e não perder de meus olhos o brilho e a alegria destes dois últimos anos. Mas seria em vão tal desejo. Porém, levo comigo o aprendizado sem medida deste mestrado.

Este agradecimento é meu reconhecimento aos que de uma forma ou de outra ajudaram a realizar este trabalho. Durante este tempo no CBPF tive a felicidade de estar integrada a um ambiente sempre muito agradável e cooperativo, que além de minha formação, proporcionou a oportunidade de fazer grandes amizades.

O principal agradecimento é ao meu orientador Dr. Ivan S. Oliveira, quem acreditou no meu trabalho, e instruiu meu caminho até aqui. Obrigada Ivan, pela amizade, o companheirismo e respeito de todos os dias.

Aos professores de graduação, Ademar B. Guimarães – meu orientador de Iniciação Científica – e Romeu Abrahão, que acreditaram em mim, e me encorajaram no ingresso ao CBPF.

Gostaria de agradecer ao professores Ademarlaudo Barbosa, Geraldo Cernicchiaro, Elis Sinnecker, Luiz Sampaio e Marcelo Albuquerque. E ao Márcio Albuquerque, quem me socorreu em momentos difíceis.

Agradeço também aos amigos do grupo de magnetismo Alberto Passos, Roberto Sarthour, Ângelo Gomes, Flávio Garcia, Victor Montero, Felipe Navarro, Valter Lima, Silvânia Carvalho e Suenne Riguetto pela agradável companhia e apoio imensurável. Em especial ao amigo Ruben Auccaise que, por muitas vezes, me ouviu, repreendeu, mas, principalmente, me apoiou.

Gostaria de manifestar meu carinho a todos funcionários, recepcionistas, guardetes e vigilantes... Marina, Atanilde, Marta, Ismael... ao Josemar, Moreira, Alan, Martins, Jorge, Cláudio, Alexandre, Márcia... os quais sempre me receberam com um sorriso, uma agradável conversa ou até mesmo um cafezinho.

Sou grata também ao Sr. Valmir Mendonça e a todos da oficina, que fizeram reais meus rabiscos de projetos. E também ao Vicente Cunha, vidreiro, sempre pronto a puxar um fio de vidro para minhas hastes.

Um agradecimento especial aos amigos de luta, Marcelo, Francisco, Alexandre, Salvador, Valberto, Rogério, Luciano, Lula e a maninha Érica, pelos bons dias de estudo na biblioteca, pela alegria, e, muitas vezes, pelo socorro.

A todos das secretarias e diretoria. E à secretária Célia, que se revelou minha amiga incondicional. Você é inesquecível Célia!

Aos amigos do CAT, departamento que, também, me considero parte. A todos que me acolheram e me apoiaram: Eliene, Rogério, Fagner, Eduardo, Leandro, Beethovem, Jabur, Nilton, Sandro, Denise, Jaime, Aline, Deyse, Gabriel e Ismar.

Às minhas *roomates* Maria Ana, Ana Amélia, e, novamente, Érica. Quem nos momentos difíceis e alegres estavam presentes. O que aprendi com vocês não tem medida!

Aos amigos da vida Cristiani, Karine, Bruno, Elisângela, Amanda, Ná, Bia, Eduarda, Cícero, Ernesto, Alana, Javier, Augusto, Humberto...

A toda minha família, em especial minha mãe Fátima, meu pai Manoel, minhas irmãs Suzamary, Rauliane e Daianny, ao vô Tião, e também ao meu futuro sogro Luiz.

Ao meu noivo, que além de dedicar, agradeço pelo incondicional apoio desde meu ingresso ao mestrado. Sua força e seu carinho constituíram “degraus” de suma importância nesta conquista.

É meu devoto agradecimento ao meu Deus amado. Quem em todos os instantes cuidou de mim! Quem me deu coragem, ânimo e garra para continuar. A Ti, oh Deus, seja o meu louvor!

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento da implementação de um sensor magnético baseado no fenômeno de magnetoresistência gigante, capaz de medir, simultaneamente, o campo magnético nas três componentes cartesianas (x, y, z) . Para o controle, aquisição e análise de dados foi construído um programa em linguagem *LabView* em interface com o sensor HMC2003, da empresa Honeywell, através de uma porta paralela.

Testes de calibração e sensibilidade foram realizados a fim de verificar o funcionamento do sensor e sua capacidade de mapeamento de um campo magnético estático, sendo utilizados para este fim, solenóides de diferentes tamanhos. No intuito de propor novas aplicações para este sensor, foi feita uma montagem experimental, na qual uma amostra magnetizada vibra, numa certa frequência, posicionada acima do sensor, testando suas características, alta sensibilidade, resolução e velocidade de leitura, sendo feitas, portanto, algumas aplicações como respostas do sensor a sinal AC, à ressonância de sistemas, e à aplicação de sinal pulsado.

A partir deste protótipo possíveis aplicações são discutidas como detecção de ruído e oscilações de sistemas mecânicos como pontes e prédios, onde o sensor funciona como um sismógrafo. Outros exemplos são a detecção de partículas magnéticas em fluidos, sensor de movimento e presença e mapeamento tridimensional de rotas de migrações da formiga *Pachycondyla marginata*, ou de outros insetos, cujos movimentos da colônia são orientados pelo campo geomagnético.

Abstract

This work describes the implementation of a magnetic sensor based on the giant magnetoresistance (GMR) phenomenon. The Honeywell sensor HMC2003 can measure simultaneously the three Cartesian components, x , y and z of a magnetic field, either DC or AC. Communication with the sensor is made through a parallel port, and a Labview routine was developed for data acquisition and analysis.

Calibration and sensitivity tests were carried out in order to check the sensor capabilities, including its directional property. Solenoids with different diameters were built, and the sensor was used to map the static magnetic field around them. In another set of applications, a magnetic sample of ferrite was made to oscillate with a continuous (CW) known frequency, directly above the sensor. The amplitude of the sensor response was recorded as a function of the AC frequency, and various resonance curves corresponding to different samples were obtained. From this experiment, we modulated the amplitude of the signal applied to the sensor at resonance frequencies for each sample, in an experiment similar to what is done in Nuclear Magnetic Resonance. The response in this case are damped oscillations which, Fourier transformed, yield the spectra in a kind of “single shot” experiment. The spectra obtained from pulsed experiments exhibit, as one of their Fourier components, the CW line, but present a richer structure, which become more complex as the pulse width is narrowed.

The basic set up can be developed for various practical applications. Some suggestions are: (1) by combining the sensor with a Global Positioning System (GPS) one can build a portable magnetic field mapping apparatus, which could be used in geological and biophysical applications (such as the study of migration of some insects which

orient themselves from the Earth magnetic field); (2) as a motion detector for general applications such as security in buildings, monitoring oscillations in bridges, and earthquakes detector. (c) Due to his high sensitivity and resolution, it can also be used to detect magnetic particles in flowing fluids.

Trabalhos produzidos nesta tese

1. S. Rabelo, S.B Belmonte, R.S. Sarthour, I.S. Oliveira. **Implementação de um sensor magnético por MRG**. apresentado na IV Escola Brasileira de Magnetismo “Jorge André Swicca”. São Carlos - SP, 23 a 29/11/2003.
2. S. Rabelo, S.B Belmonte, R.S. Sarthour, M.F. Lopes, I.S. Oliveira, **Implementation and applications of a 3D-sensitive Giant Magnetoresistance (GMR) Sensor** (em redação)

Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	iv
Trabalhos produzidos	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xii
Introdução	1
1 A Magnetoresistência Gigante	5
1.1 História da MRG	8
1.2 Válvulas de <i>spins</i>	9
1.3 Primeiras aplicações	11
2 Sensores Magnéticos	14
2.1 O uso de sensores magnéticos na indústria	14
2.2 Sensores em geral	15
2.2.1 O dispositivo supercondutor de interferência quântica – SQUID	16
2.2.2 <i>Fluxgate</i>	16
2.2.3 Os interruptores <i>reed</i>	17
2.2.4 Dispositivos baseados no uso da força de Lorentz	19
2.3 Sensores magnéticos Honeywell	20
2.3.1 Circuitos internos	22
2.3.2 O sensor magnético HMC2003	27

3 Instrumentação	29
3.1 Primeiros testes	29
3.1.1 Calibração	29
3.1.2 Sensibilidade tridimensional	31
3.2 Programa de controle	33
3.2.1 Conversor A/D	35
3.2.2 Rotina de aquisição e tratamento de dados	38
3.2.3 Placa de circuito para o sensor HMC2003	38
4 Resultados	40
4.1 Mapeamento do campo magnético em torno de um solenóide.	40
4.2 Montagem experimental	41
4.3 Resposta a sinal AC	42
4.4 Resposta do sensor na ressonância do sistema	45
4.4.1 Resposta à aplicação de sinal pulsado	51
4.4.2 Efeitos da redução da largura do pulso	58
4.5 Propostas	62
4.5.1 Detecção de ruído	62
4.5.2 Mapeamento magnético	63
4.5.3 Sensores de movimento e detecção de partículas magnéticas	63
Conclusão	65
A O Sensor HMC2003	68
B Unidades no Magnetismo	73
Bibliografia	78

Lista de Figuras

1.1	Esquema ilustrativo do modelo de espalhamento de elétrons dependente da orientação dos spins para a MRG.	7
1.2	Curva do comportamento magnetoresistivo em uma multicamada magnética.	8
1.3	Magnetoresistência de três redes de Fe/Cr a 4,2K. A corrente e o campo aplicados são ao longo das mesmas linhas centrais no plano das camadas [110].	10
1.4	Estrutura de uma válvula de <i>spins</i>	11
1.5	Esquema ilustrativo de multicamadas em cabeça leitora por MRG.	12
2.1	Esquema ilustrativo de um SQUID.	17
2.2	Esquema ilustrativo de um <i>fluxgate</i>	18
2.3	Princípio de funcionamento de um interruptor <i>reed</i>	18
2.4	Esquema ilustrativo do efeito Hall.	20
2.5	Configuração dos resistores de MRG em um sensor de ponte Wheatstone e os componentes internos do chip HMC1001.	21
2.6	Princípio de Funcionamento de Sensores Magnetoresistivos.	21
2.7	Diagrama de blocos para os circuitos do chip HMC2003.	23
2.8	Orientação de Domínios Magnéticos em filmes MRG.	25
2.9	Circuito simples de pulsos <i>set/reset</i> para o sensor HMC1001.	26
2.10	Placa com o sensor MRG.	27
2.11	Diagrama de pinagem do Sensor HMC2003.	28
3.1	Calibração obtida para o sensor por MRG em comparação ao Sensor Hall - $B \times I$	30

3.2	Montagem experimental para o teste de sensibilidade dos eixos.	31
3.3	Teste de sensibilidade do eixo z.	32
3.4	Teste de sensibilidade do eixo Y.	33
3.5	Programa de Controle: (a)interface com o usuário; (b)diagrama.	34
3.6	Fluxograma do programa principal.	35
3.7	Diagrama de pinagem do conversor AD974.	36
3.8	Diagrama de temporização básico do AD974.	37
3.9	Esquema da placa de circuito para o sensor HMC2003.	39
4.1	Mapeamento do campo magnético em torno de um solenóide usando o sensor HMC2003.	41
4.2	Esquema ilustrativo da montagem experimental.	42
4.3	Montagem experimental.	42
4.4	Gráfico resultante da aplicação de 1Hz em amostra de 33mg e respectivo espectro de Fourier.	43
4.5	Aplicação de sinal modulado senoidal → Portadora = 1Hz e sinal modulante = 100mHz.	44
4.6	Aplicação de sinal modulado quadrado → Portadora = 2Hz e sinal modulante = 100mHz.	45
4.7	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 32,95mg.	46
4.8	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 26,55mg.	46
4.9	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 20,95mg.	47
4.10	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 11,3mg.	47
4.11	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 5,25mg.	48
4.12	Frequência de Ressonância para amostra de massa = 2,5mg.	48
4.13	Frequência de ressonância em função da massa da amostra, em escala logarítmica.	50
4.14	Frequência de ressonância em função da massa da amostra, em escala logarítmica (haste sólida).	52
4.15	Frequência de ressonância medida ponto-a-ponto para amostra de 33mg.	53

4.16	Esquema ilustrativo do pulso aplicado: $\Delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}$	53
4.17	Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 33mg. $F_r =$ 22,25Hz \rightarrow Pulso aplicado = 5,6s.	54
4.18	Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 21mg. $F_r =$ 27,316Hz \rightarrow Pulso aplicada = 2s.	55
4.19	Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 11,3mg. $F_r =$ 35,03Hz \rightarrow Pulso aplicado = 2,4s.	56
4.20	Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 2,5mg. $F_r =$ 52,89Hz \rightarrow Pulso aplicado = 1,8s.	57
4.21	(a) Pulso retangular e (b) sua transformada de Fourier.	58
4.22	Transformada de Fourier de um pulso retangular para vários valores de largura.	59
4.23	Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 33mg.	60
4.24	Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 21mg.	60
4.25	Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 11,3mg.	61
4.26	Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 2,5mg.	61
4.27	Deteção de ruído provocado sobre a bancada.	62

Lista de Tabelas

2.1	Principais características de alguns sensores magnéticos	20
3.1	Resultados da calibração do sensor por MRG	30
3.2	Tabela de seleção de canais do AD974.	37
4.1	Resumo das freqüências de ressonância obtidas e parâmetros de ajuste.	49
4.2	Parâmetros resultantes do gráfico <i>Freqüência de ressonância</i> $\times m_{amostra}$	49
4.3	Comparação: parâmetros calculados e medidos.	51
4.4	Resumo das novas Freqüências de Ressonância obtidas com a haste sólida.	52
B.1	Valores do campo B associados a diferentes fontes.	76
B.2	Grandezas Magnéticas e unidades.	77

Introdução

Para a maioria das pessoas os últimos dez anos podem representar apenas mais uma década, mas para as ciências esse foi um período de verdadeira revolução. Afinal, as invenções que se tornaram indispensáveis no mundo moderno, como telefone celular, CD, controle-remoto e internet são o resultado de anos de intensas pesquisas e descobertas da Física.

Para a Informática, assim como para a Engenharia, a Física é ferramenta essencial e indispensável. E o magnetismo é o ramo da Física de amplo estudo nesta área, uma vez que a busca por maior capacidade de armazenamento de dados em discos rígidos está nele fundamentado.

Não se sabe quando foi observada, pela primeira vez, a existência do magnetismo. Há mais de 2.000 anos, porém, os gregos sabiam que um certo tipo de pedra (a magnetita) atraía pedaços de ferro; existem também registros sobre a utilização de magnetos na navegação, datados do século XII [1, 2].

Em 1269, Pierre de Maricourt [3] descobriu que uma agulha colocada em diversas posições sobre um magneto natural esférico orientava-se ao longo de curvas que passavam por pontos diametralmente opostos na esfera. Estes pontos foram denominados por ele, os pólos do magneto ou ímã. Depois, muitos experimentadores verificaram que todo ímã, qualquer que fosse a sua forma, tinha dois pólos, o pólo norte e o pólo sul, onde a força exercida pelo ímã era a mais intensa. Também se observou que os pólos de mesmo nome de dois ímãs se repeliam mutuamente, e que pólos de nomes opostos se atraíam mutuamente.

Em 1600, William Gilbert [4] descobriu que a Terra era um ímã natural, com os

pólos magnéticos nas vizinhanças dos pólos norte e sul geográficos. Em 1750, aproximadamente, John Michell fez uma investigação quantitativa sobre a atração e a repulsão de pólos magnéticos, com uma balança de torção. Descobriu que a força exercida por um pólo sobre outro variava inversamente com o quadrado da distância entre os pólos. Pouco depois, Coulomb confirmou estes resultados.

Embora a força entre dois pólos magnéticos seja semelhante à que existe entre duas cargas elétricas, há uma diferença importante entre as cargas elétricas e os pólos magnéticos – estes pólos magnéticos sempre ocorrem aos pares. Se um ímã for quebrado pela metade, aparecerão pólos iguais e opostos na quebraçura; isto é, de um ímã se fazem dois, cada qual com um pólo norte e um pólo sul.

A relação ente a eletricidade e o magnetismo não foi conhecida até o século XIX, quando Hans Christian Oersted [5] descobriu que uma corrente elétrica afetava a orientação da agulha de uma bússola. Experiências posteriores, de André-Marie Ampère e outros, mostraram que as correntes elétricas atraíam pequenos fragmentos de ferro e que correntes elétricas paralelas se atraíam mutuamente. Ampère propôs um modelo teórico do magnetismo que ainda serve de base para a teoria moderna do magnetismo. Segundo sua proposta, a fonte fundamental do magnetismo não é o pólo magnético, mas a corrente elétrica. Propôs ainda que o magnetismo dos ímãs permanentes fosse explicado pelo alinhamento de correntes circulares fechadas no interior do material. Sabemos, nos dias de hoje, que estas correntes circulares resultam, em parte, do movimento dos elétrons nos átomos e em parte também do *spin* do elétron, que é uma propriedade quântica do elétron. A interação magnética básica é a força magnética que uma carga elétrica em movimento exerce sobre outra carga em movimento.

Nas vizinhanças de 1830, Michael Faraday e Joseph Henry demonstraram, mediante experiências independentes, que a alteração de um campo magnético provoca um campo elétrico. Alguns anos depois (aproximadamente 1860), James Clerk Maxwell desenvolveu uma teoria completa da eletricidade e do magnetismo, na qual mostrava que um campo elétrico variável gerava um campo magnético.

O fascínio aos fenômenos relacionados ao magnetismo faz deste um dos objetos de

estudo mais interessante na Física de hoje. Mas somada à necessidade de desvendar os mistérios da natureza existe um grande interesse econômico, o qual faz do magnetismo uma das maiores forças tecnológicas neste momento. Por exemplo, o mercado de gravação magnética e equipamentos de gravação atinge U\$100 bilhões por ano [6, 7, 8].

Desde a descoberta da magnetoresistência gigante em 1988 [9], novas aplicações, envolvendo sensores baseados neste fenômeno, vêm sendo desenvolvidas. Os exemplos vão desde medidas de campo magnético a dispositivos de detecção de proximidade.

A perspectiva de novas linhas de emprego destes sensores magnéticos é a grande motivação à realização deste trabalho, que tem por objetivo desenvolver um sistema de controle, aquisição e tratamento de dados de um sensor magnético. Para isto, foi construído um programa em linguagem *LabView*, capaz de controlar os pulsos de *set/reset* no sensor, controlar e adquirir os dados de um conversor analógico/digital e armazenar estes dados para posterior análise.

O sensor utilizado HMC2003, da Honeywell [10], além de possuir alta sensibilidade e velocidade de leitura, é capaz de medir, ao mesmo tempo, o campo magnético nas três componentes cartesianas (x, y, z). Foram, então realizados testes destas características, obtendo respostas significativas que permitiram a realização de algumas aplicações, como mapeamento de um campo magnético estático ao redor de um solenóide, detecção de sinal AC e respostas do sensor na ressonância de um sistema e à aplicação de sinal pulsado. A partir destas aplicações são feitas sugestões como, a detecção de ruído em superfícies, detecção de partículas magnéticas em fluidos, sensor de movimento e mapeamento tridimensional de grandes áreas.

Em resumo:

O Capítulo 1 contém uma breve introdução ao fenômeno de magnetoresistência gigante, seu princípio de funcionamento e desenvolvimento ao longo de menos de duas décadas.

O Capítulo 2 discute a importância dos sensores magnéticos na indústria, descreve o princípio de funcionamento dos sensores mais utilizados e, principalmente, o sensor implementado neste trabalho, seus circuitos internos e pinagem.

O Capítulo 3 aborda o desenvolvimento de uma instrumentação capaz de testar e analisar o funcionamento e sensibilidade do sensor e, descreve, em detalhe, o programa de controle desenvolvido.

O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais obtidos e discute algumas sugestões de possíveis aplicações para este sensor.

A Conclusão e discussão dos resultados analisam as metas e objetivos alcançados.

Capítulo 1

A Magnetoresistência Gigante

A resistência de um material depende do campo magnético aplicado ao mesmo, ou seja, o aumento ou a redução da resistência é determinado pela intensidade e orientação do campo aplicado. Essa característica do material é chamada de magnetoresistência (MR). Em metais de transição, em particular nos ferromagnetos (Fe, Co, Ni e suas ligas), os elétrons que participam da condução da corrente elétrica são os elétrons das camadas externas. Podemos separar estes elétrons em duas “famílias”, de acordo com a orientação relativa da componente z de seus *spins* em relação à magnetização local: os elétrons com *spin* para cima (orientação positiva do eixo z) e os elétrons com *spin* para baixo (orientação negativa do eixo z). Nesta descrição, o eixo z é escolhido como o eixo de quantização e é paralelo à magnetização.

Em multicamadas Co/Cu, para determinadas espessuras de Cu, por exemplo, os momentos magnéticos das camadas de Co são antiparalelos em campos pequenos devido o acoplamento antiferromagnético das camadas de Co mediante o espaçador de Cu. Quando um campo magnético é aplicado, o suficiente para superar o acoplamento antiferromagnético das camadas, os momentos do Co se alinham paralelamente ao campo aplicado. O interesse nas multicamadas com acoplamento de troca se intensificou em 1988 [9] com a observação da magnetoresistência gigante em sistemas de filmes de Fe/Cr que apresentavam acoplamento ferromagnético entre as camadas quando se aplicava um campo estático e paralelo ao plano do filme e antiferromagnético, quando se desligava este campo. A alta variação da resistência do filme no estado a campo

zero para o estado no campo de saturação do material ferromagnético cunhou o termo magnetoresistência gigante (MRG).

A magnetoresistência de filmes finos e multicamadas magnéticas é uma propriedade de transporte que resulta do espalhamento diferenciado de elétrons com *spin* para cima e *spin* para baixo. Os sensores magnetoresistivos são baseados neste fenômeno, em que a resistência elétrica varia em função de um campo magnético aplicado.

O valor observado de MRG, se expresso em porcentagem relativa ao estado de maior resistência, é:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 = \frac{\rho(0, T) - \rho(Hs, T)}{\rho(0, T)} = \frac{\rho_m}{\rho_0(T) + \rho_m(T)} \quad (1.1)$$

onde $\rho_0(T)$ é a resistividade independente do campo e $\rho_m(T)$ é o termo responsável pela MRG. O valor da resistividade magnética, $\rho_m(T)$, em relação a $\rho_0(T)$ é o que determina o valor do efeito da MRG. Alternativamente, este valor pode ser escrito em porcentagem relativa ao estado de menor resistência:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 = \frac{\rho(0, T) - \rho(Hs, T)}{\rho(Hs, T)} \quad (1.2)$$

A dependência da resistividade com o campo, $\rho(Hs, T)$, se dá através da dependência da magnetização M com o campo magnético. A magnetoresistência depende da orientação relativa da magnetização das camadas ferromagnéticas [11]. Ao aplicar um campo magnético sobre um metal de transição ferromagnético, os elétrons de condução dos estados $4s$ podem sofrer espalhamento, passando a ocupar os estados $3d$ incompletos. Este fenômeno é denominado espalhamento sd . A consequência desta transferência de elétrons é uma variação na resistência do metal. Porém, isto não ocorrerá para os metais de transição que possuem a camada $3d$ completa, característica dos metais não magnéticos, como é o caso do cobre.

A dependência da magnetoresistência gigante com a orientação relativa da magnetização nas diferentes camadas pode então ser compreendida supondo-se que o espalhamento de elétrons seja dependente de *spin*, conforme o modelo apresentado na Figura 1.1. Os elétrons com *spin* paralelo à direção de magnetização das camadas são fraca-

mente espalhados, enquanto elétrons com *spin* antiparalelo ao sentido de magnetização são fortemente espalhados. Pode-se representar a condução de elétrons dependente de *spin* por uma rede de resistores, onde r_1 representaria elétrons com *spins* paralelos à direção de magnetização e r_2 com *spins* antiparalelos. Assim, ramos do circuito que apresentam somente resistências r_1 serão menos resistivos do que caminhos de condução elétrica que envolva resistências r_1 e r_2 .

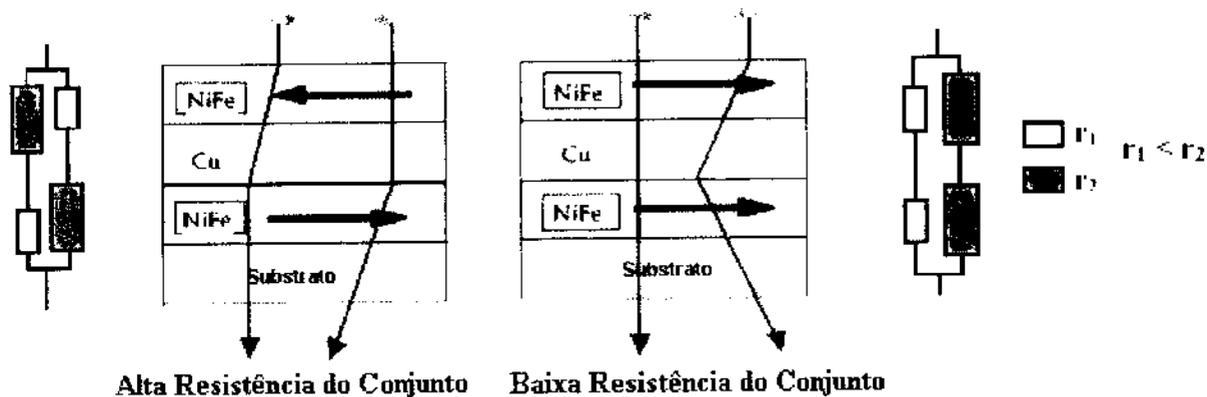


Figura 1.1: Esquema ilustrativo do modelo de espalhamento de elétrons dependente da orientação dos spins para a MRG.

A aplicação de um campo magnético externo resulta no alinhamento paralelo das magnetizações das camadas e, conseqüentemente, reduz a resistência elétrica da multicamada. O comportamento magnetoresistivo típico em uma multicamada magnética é ilustrado na Figura 1.2. Para campo magnético igual a zero, o material apresenta um comportamento antiferromagnético correspondendo ao máximo de resistência elétrica. Para valores crescentes de campo magnético (em módulo), ocorre a reversão da magnetização nas camadas com sentido contrário ao do campo e o material passa a ter um comportamento ferromagnético com a resistência decrescendo rapidamente, tendendo a um valor mínimo.

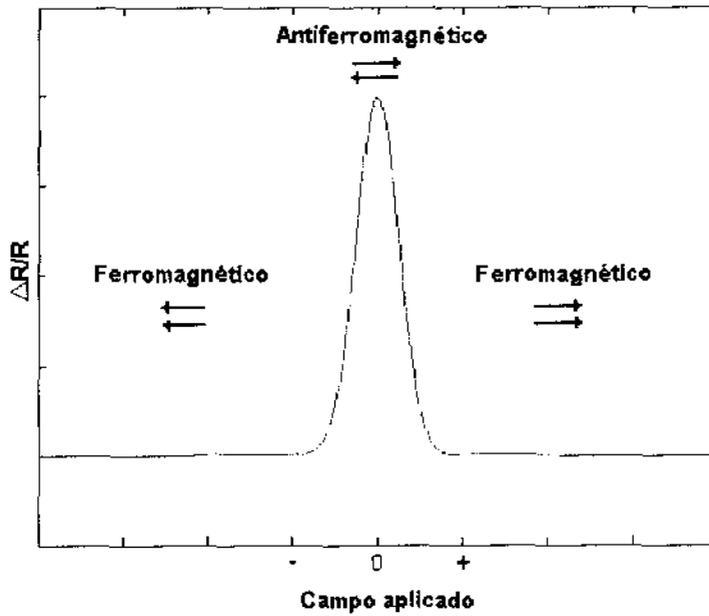


Figura 1.2: Curva do comportamento magnetoresistivo em uma multicamada magnética.

1.1 História da MRG

O fenômeno de magnetoresistência já é conhecido há muitos anos, porém não era observável à temperatura ambiente (alguns materiais somente se tornam magnéticos a baixas temperaturas) e nem ocasionava uma mudança apreciável na resistividade. Em 1986 Peter Grünberg, em Jülich, Alemanha, construiu um dispositivo com duas camadas de ferro separadas por uma fina camada de cromo [12]. Se a voltagem permanece constante, ele mostrou ser possível variar a corrente através do dispositivo apenas com a aplicação de um campo magnético externo. Este primeiro experimento apresentou uma pequena MR. Dois anos mais tarde, o pesquisador brasileiro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Mário Baibich [9], trabalhando no laboratório de Física dos Sólidos da Universidade de Paris, descobriu uma forma de observar este fenômeno à temperatura ambiente ao colocar finas camadas de Ferro intercaladas com camadas ainda mais finas de Cromo, alinhadas de maneira antiferromagnética, ou seja, com orientações magnéticas contrárias. Ao se aplicar um campo magnético externo,

havia então um alinhamento dessas orientações magnéticas conforme o campo, de forma que quaisquer elétrons que tivessem seus *spins* orientados com esse alinhamento passariam através do material sem dificuldades; caso contrário seriam barrados numa das interfaces do material. Essa redução na resistividade era da ordem de 50%. A Figura 1.3 ilustra um dos resultados originais de Mário Baibich. No anos seguintes, a pesquisa em MR cresceu rapidamente em todo o mundo. Em 1990, Parkin [13] estudou o efeito de magnetoresistência em sistemas Co/Ru e Co/Cr. Em 1991, o brasileiro Dante Mosca [14], na Universidade de Paris, já analisava as oscilações amortecidas na variação da amplitude do acoplamento ferro-antiferromagnético em função da espessura do espaçador não magnético. Posteriormente, em 1996, Yvan Bryunseraede e seu grupo, da Universidade de Leuven na Bélgica, estabeleceram um recorde de 220% de variação no valor inicial da resistividade em uma multicamada de 50 camadas finas alternadas de ferro e cromo, a uma temperatura de 1,5K. A este fenômeno deu-se o nome de Magnetoresistência Gigante (do inglês *Giant Magnetoresistance*, ou GMR).

Em 1935 [15] fora observado um fenômeno semelhante ao de MRG — a magnetoiimpedância gigante — mas de mecanismo basicamente clássico, que consiste na grande variação da impedância elétrica do material devido à aplicação de um campo magnético externo, cujo efeito é provocar mudanças na permeabilidade magnética efetiva do material, a qual determina a distribuição de campos e correntes no interior da amostra [16, 17, 18].

Desde então, muitos grupos de pesquisa no mundo estudam a magnetoresistência em sistemas de filmes finos e granulares. Este é um tema que a Philips, a Sony, a IBM, a Xerox, entre outras empresas, financiam em seus países de origem, pelo simples fato de que a gravação magnética de alta densidade pode ser aprimorada a partir dos resultados dessas pesquisas.

1.2 Válvulas de *spins*

Válvulas de *spins* são estruturas formadas basicamente por três camadas de MRG. Duas das camadas são magneticamente macias e sensíveis a pequenos campos magnéti-

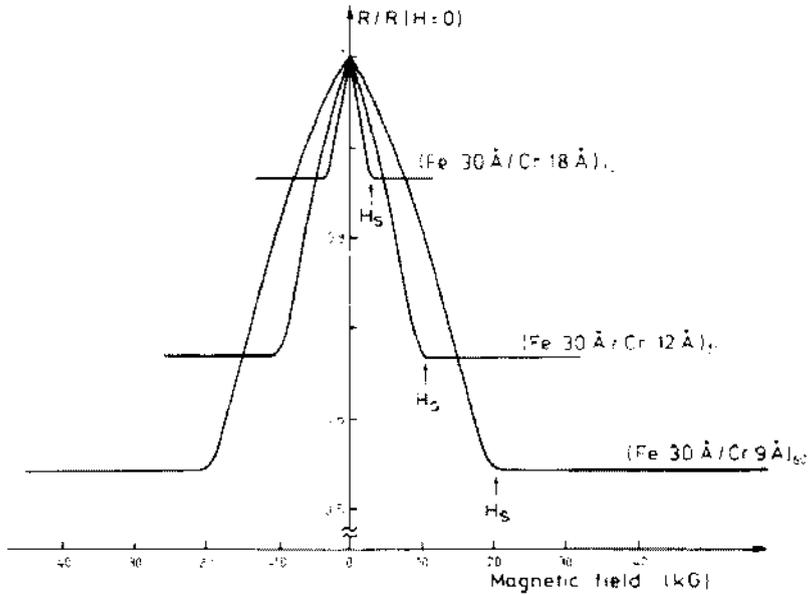


Figura 1.3: Magneto-resistência de três redes de Fe/Cr a 4,2K. A corrente e o campo aplicados são ao longo das mesmas linhas centrais no plano das camadas [110].

cos. A outra é magneticamente dura e é insensível a campos de intensidade moderada. Como o momento da camada livre move-se ao ser aplicado um campo magnético, a resistência total da estrutura varia.

Por exemplo, no diagrama da Figura 1.4, uma camada de FeMn é usada para fixar a magnetização da camada de Co em uma certa direção. A camada de NiFe, que é magneticamente macia, pode ter alinhamento paralelo ou antiparalelo, bastando para isso um pequeno campo magnético. Há um espaço de Cu espesso o suficiente entre essas duas camadas de forma a suprimir o acoplamento magnético entre as mesmas. As camadas de Ta servem para dar uma boa superfície para ligamento e também como camada protetora contra a oxidação da amostra. Sob uma das camadas de tântalo é depositada uma fatia de Si, que na realidade é muito mais espessa que a estrutura de multicamadas. A região ativa terá uma densidade de aproximadamente 100Å^2 , com a estrutura toda sendo aproximadamente 300Å^2 .

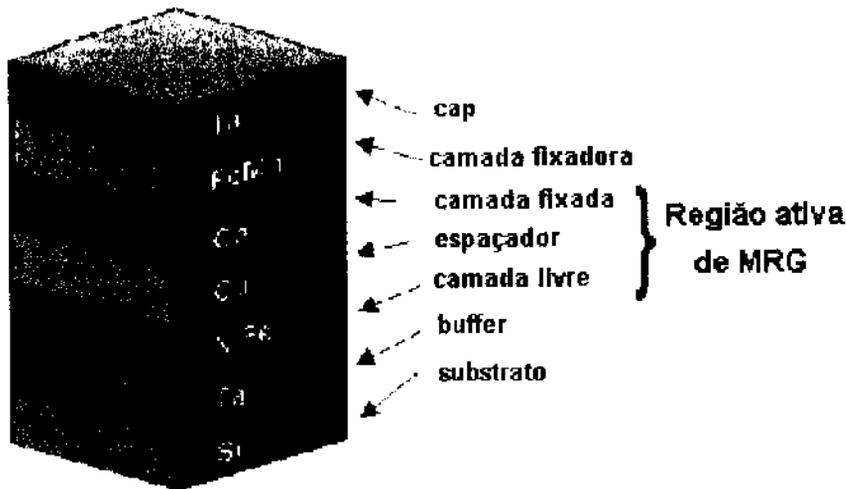


Figura 1.4: Estrutura de uma válvula de *spins*.

1.3 Primeiras aplicações

Após a descoberta de Mário Baibich houve uma grande procura por parte de vários cientistas e laboratórios devido à potencialidade deste dispositivo para diversas aplicações. Em 1997 foi colocado no mercado o primeiro aparelho comercial utilizando essa tecnologia, discos rígidos com cabeça leitora de MRG da IBM [19] que ofereciam maior confiabilidade, velocidade (pelo fato de serem sensíveis a campos muito pequenos) e de menor tamanho e custo.

As cabeças de MRG são formadas por quatro camadas dentro de uma estrutura única (Figura 1.5):

- Camada Livre - camada sensível, feita de uma liga de níquel-ferro, disposta de forma a passar sobre a superfície de dados a ser lida. Como seu nome diz, ela está livre para girar em resposta a orientação magnética dos dados gravados no disco.
- Espaçador - camada não-magnética, tipicamente feita de cobre, colocada entre a camada livre e a camada fixa para isolar magneticamente as mesmas.
- Camada fixa - de cobalto, fixada em uma orientação magnética em virtude de

sua adjacência à camada de troca.

- Camada de troca - feita de um material antiferromagnético, tipicamente ferro e manganês, define a orientação magnética da camada fixa.

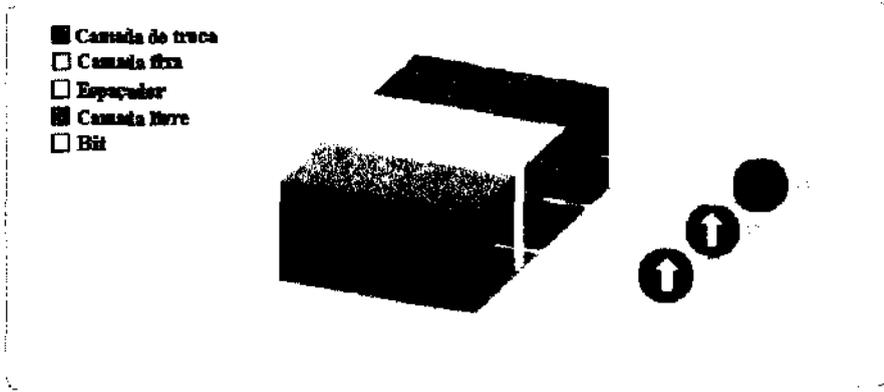


Figura 1.5: Esquema ilustrativo de multicamadas em cabeça leitora por MRG.

Quando a cabeça passa sobre um campo magnético com uma certa orientação (diz-se, um “0” no disco), a magnetização da camada livre se orienta no mesmo sentido de magnetização da camada fixada; isto cria uma baixa resistência na estrutura inteira. Quando a cabeça passa sobre um campo magnético de orientação contrária (diz-se, um “1” no disco), a magnetização da camada livre ficará antiparalela à da camada fixada. Como a cabeça se move através de um *bit*¹, a magnetização da camada livre “gira”, alternando a resistência global da estrutura.

Cabeças de MRG são superiores às cabeças magnéticas convencionais porque elas são mais sensíveis. Enquanto as cabeças magnéticas mais velhas tipicamente exibem uma resistência de uma polaridade magnética para outra de aproximadamente 2%, para a cabeça MRG esta resistência está em torno de 5 a 8%. Estas cabeças podem detectar sinais muito menores e mais fracos, que é a chave para aumentar a densidade de área, e assim capacidade e desempenho. As cabeças de MRG são geralmente blindadas, o

¹Os computadores “lêem” impulsos elétricos, positivos ou negativos, que são representados por 1 e 0, respectivamente. A cada impulso elétrico, damos o nome de *Bit* (*Binary digiT*). Um conjunto de 8 *bits* reunidos como uma única unidade forma um *Byte*.

que previne que as mesinas sejam afetadas por campos magnéticos dispersos. Os discos rígidos que utilizam essa tecnologia possuem capacidade de até 100GB e densidade de área de 10 à 15*Gbits/pol*². Outra empresa a colocar no mercado sensores magnéticos utilizando a MRG foi a Honeywell. Seus sensores magnetoresistivos são sensíveis a campos magnéticos pequenos, são de pequeno tamanho e suportam aplicações que requerem menos fragilidade do sistema.

Capítulo 2

Sensores Magnéticos

Este capítulo aborda a importância dos sensores magnéticos na indústria, faz uma recapitulação dos vários modelos de sensores magnéticos utilizados e descreve o princípio de funcionamento dos sensores Honeywell, em especial o sensor HMC2003 utilizado nesta tese.

2.1 O uso de sensores magnéticos na indústria

A detecção de campos magnéticos se expandiu vastamente à medida que a indústria adaptou uma variedade de sensores magnéticos para detectar presença, força, ou sentido de campos magnéticos não somente da Terra, mas também de ímãs permanentes, de veículos, de atividades de onda do cérebro, e de campos gerados por correntes elétricas, de forma geral. São utilizados ainda em contadores de revolução, tacômetros, contadores de pulso, velocímetros, controladores de velocidade, controle de posição, entre outros. Os sensores magnéticos podem medir estas propriedades sem contato físico e têm-se transformado nos “olhos” de muitos sistemas industriais.

Usar sensores magnéticos para medir campos magnéticos não é geralmente a intenção preliminar. Um outro parâmetro é geralmente desejado como a velocidade de rotação, a presença de um material magnético, a detecção de um veículo. Estes parâmetros não podem ser medidos diretamente, mas podem ser extraídos das mudanças, ou dos distúrbios provocados em campos magnéticos.

Hoje, empresas como a Brubeki [20], a Industrial Instruments [21], a IFM Electronic [22], a Festo [23] e tantas outras, oferecem soluções em aplicações de sensores para as mais importantes áreas industriais. Na indústria automobilística, por exemplo, inserem-se em aplicações que contribuem para um processo de fabricação eficiente e contínuo. Na indústria farmacêutica constitui uma solução no processo de inspeção.

A tecnologia de gravação magnética representa o maior mercado de investimentos tecnológicos das próximas décadas. Em todo o mundo, aproximadamente US\$100 bilhões são movimentados no comércio e pesquisa de discos rígidos e de outros dispositivos de gravação. Neste mercado, a tecnologia das MRAM (*magneto-resistive random-access memory*) já é uma realidade, competindo com as memórias integradas de estado sólido. Dentro desta perspectiva, o estudo das propriedades físicas básicas dos compostos utilizados nestas memórias é de fundamental importância para o progresso da ciência e tecnologia de gravação magnética. A IBM [19], após intensa e dedicada pesquisa desenvolvida sobre a MRG, conquistou um mercado de discos rígidos de 16,8 Gbytes para *desktops* usando uma estrutura especial de MRG por ela desenvolvida chamada *válvula de spins* (Seção 1.2).

2.2 Sensores em geral

Uma maneira de classificar os vários sensores magnéticos é pela escala de campo que eles detectam [24]. Os sensores podem, *grosso modo*, ser divididos em três categorias - baixo, médio e alto campo. Os sensores que detectam campos magnéticos de menos de 1 μ Gauss serão classificados sensores de baixo campo. Estes são usados para aplicações médicas e militares. Tendem geralmente a ser volumosos e caros comparados a outros sensores de campo magnético. Cuidado deve ser tomado devido os efeitos do campo da Terra, uma vez que as variações diárias no campo da Terra podem exceder a escala deste sensor. Os sensores com escala de 1 μ Gauss a 10 Gauss serão considerados sensores do campo da Terra. Estes são capazes de detectar a presença de veículos, e medir a derivada na mudança do campo para determinar a velocidade do mesmo. Os sensores que detectam campos acima de 10 Gauss serão considerados sensores do campo de

ímãs.

2.2.1 O dispositivo supercondutor de interferência quântica – SQUID

O sensor de baixo campo mais sensível que existe é o *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID), ou dispositivo supercondutor de interferência quântica. Desenvolvido em 1962 com a ajuda do trabalho de Brian J. Josephson que inventou a junção do tipo ponto-contato para medir corrente extremamente baixa [25]. O magnetômetro SQUID tem a capacidade de detectar campos na escala de 10^{-15}T até 9T. Esta é uma escala acima de 15 ordens de magnitude! Isto é chave para o uso médico, uma vez que o campo neuromagnético do cérebro humano é somente alguns fT , ou seja, 10^{-8} vezes mais fraco que o campo magnético da Terra.

O dispositivo básico consiste em um anel supercondutor (Figura 2.1) interrompido por uma (SQUID RF) ou duas (SQUID DC) junções. Trata-se de um conversor de variação de fluxo magnético em variação de corrente crítica: $I_c = F(\phi)$. Baseia-se no efeito Josephson e na quantização do fluxo em um circuito supercondutor fechado [26].

2.2.2 Fluxgate

Os magnetômetros do tipo *fluxgate* (Figura 2.2) são os sensores mais usados para sistemas de navegação. Foram desenvolvidos em torno de 1928 e depois aprimorados pelas forças armadas para detectar submarinos. Foram usados também para o mapeamento do campo magnético. O tipo mais comum de magnetômetro *fluxgate* [27] é um dispositivo que envolve duas bobinas, uma primária e uma secundária, enroladas em torno de um núcleo ferromagnético de alta permeabilidade. A indução magnética deste núcleo muda na presença de um campo magnético externo. Um sinal dependente do tempo é aplicado ao enrolamento primário na frequência f (por exemplo, 10kHz), que faz a magnetização do núcleo oscilar entre pontos de saturação. O enrolamento secundário de saída gera um sinal que é acoplado com o núcleo primário. Este sinal é afetado por toda mudança na permeabilidade do núcleo e aparece como uma variação

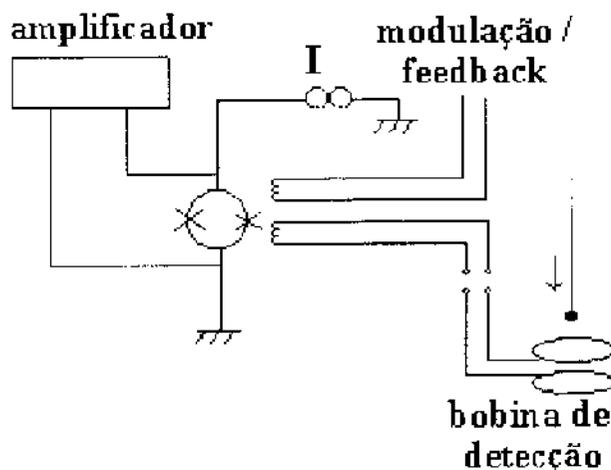
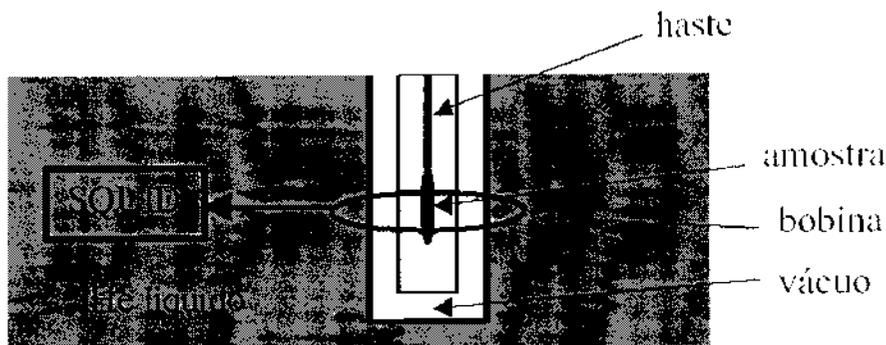


Figura 2.1: Esquema ilustrativo de um SQUID.

da amplitude na saída da bobina. Usando um detector sensível de fase, o sinal detectado pode ser demodulado e filtrado para recuperar o valor do campo magnético. Os *fluxgates* podem medir o valor e o sentido de campos magnéticos estáticos e podem operar até uma faixa de frequência de 1kHz. Tendem também a ser volumosos.

2.2.3 Os interruptores *reed*

Possivelmente o sensor magnético mais simples que produz uma saída utilizável para o controle industrial é o interruptor *reed*. Consiste em um par de contatos flexíveis, ferromagnéticos, selados hermeticamente em um recipiente cheio de gás inerte, frequentemente de vidro (Figura 2.3). O campo magnético ao longo da linha central dos contatos magnetiza os contatos que fazem com que atraiam um ao outro fechando o circuito.

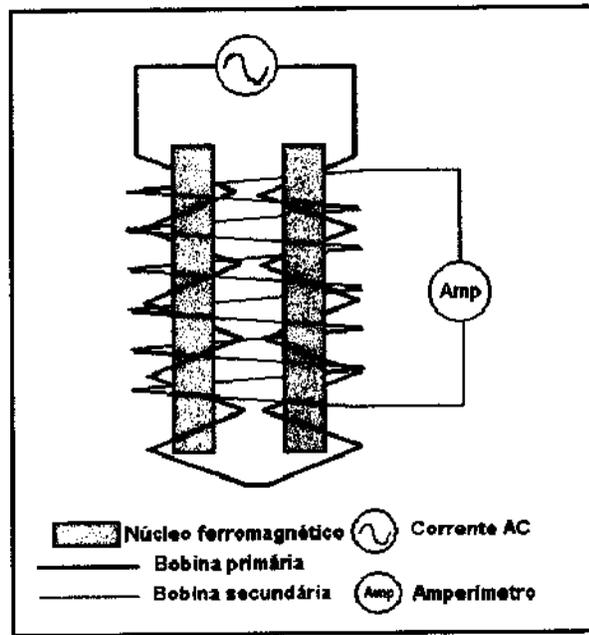


Figura 2.2: Esquema ilustrativo de um *flusgate*.

Os interruptores *reed* têm elevada imunidade à sujeira e à contaminação. As potencialidades típicas são 0,1 a 0,2A de corrente e 100 a 200V de tensão. A vida do contato é medida em 10^6 a 10^7 operações em 10 mA. O baixo custo, a simplicidade, a confiabilidade, e o consumo de potência zero fazem os interruptores *reed* populares em muitas aplicações. Um interruptor *reed* junto a um ímã permanente pequeno faz um interruptor usado frequentemente em sistemas de segurança para monitorar a abertura de portas ou janelas.

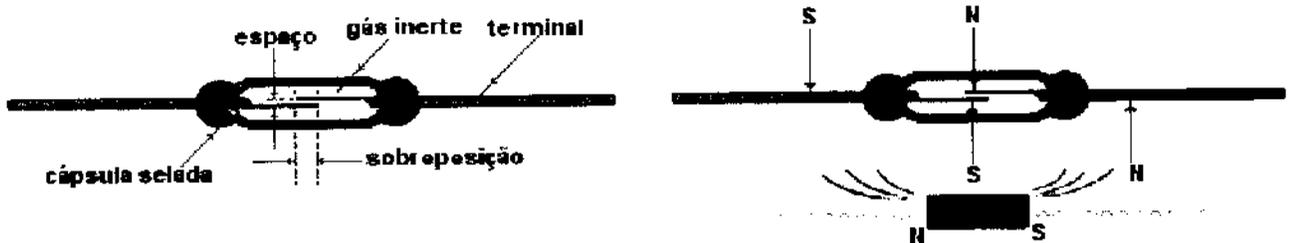


Figura 2.3: Princípio de funcionamento de um interruptor *reed*.

2.2.4 Dispositivos baseados no uso da força de Lorentz

Existem diversos sensores que utilizam a força de Lorentz em portadores de carga em um semicondutor. A força de Lorentz descreve a força \vec{F}_L exercida em uma partícula carregada que se move com velocidade \vec{v}_d em um campo magnético \vec{B} .

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v}_d \times \vec{B})$$

Uma vez que as quantidades \vec{F}_L , \vec{v}_d , e \vec{B} são vetores, têm módulo, direção e sentido. A força de Lorentz é proporcional ao produto vetorial entre os vetores que representam a velocidade e o campo magnético. Assim, é perpendicular a ambos e, para um portador de carga positivo, tem o sentido do parafuso girado de \vec{v} para \vec{B} (regra da mão direita). A aceleração causada pela força de Lorentz é sempre perpendicular à velocidade da partícula carregada; conseqüentemente, na ausência de todas as outras forças, um portador de carga segue uma trajetória curva em um campo magnético. O efeito *Hall* é uma conseqüência da força de Lorentz. Quando uma tensão é aplicada a uma extremidade de material condutor à outra extremidade, os portadores da carga começam a fluir. Se ao mesmo tempo um campo magnético perpendicular for aplicado, os portadores são defletidos pela força de Lorentz, fazendo com que cargas de sinais opostos se acumulem nas extremidades opostas do material, gerando uma tensão. Esta tensão através das extremidades é chamada tensão *Hall* (V_H). A Figura 2.4 explica, de modo simplificado este efeito.

O efeito Hall proporciona um método conveniente para medir campos magnéticos [1]. A força magnética está equilibrada pela força eletrostática de módulo qE , onde E é o campo elétrico da separação das cargas. Então, devemos ter $E = v_d B$. Se a largura da fita for w , a diferença de potencial será Ew . A voltagem Hall é então $V_H = Ew = v_d Bw$, assim, o valor do campo aplicado será:

$$B = \frac{V_H}{v_d w}$$

A Tabela 2.1 descreve, resumidamente as características de alguns sensores magnéticos.

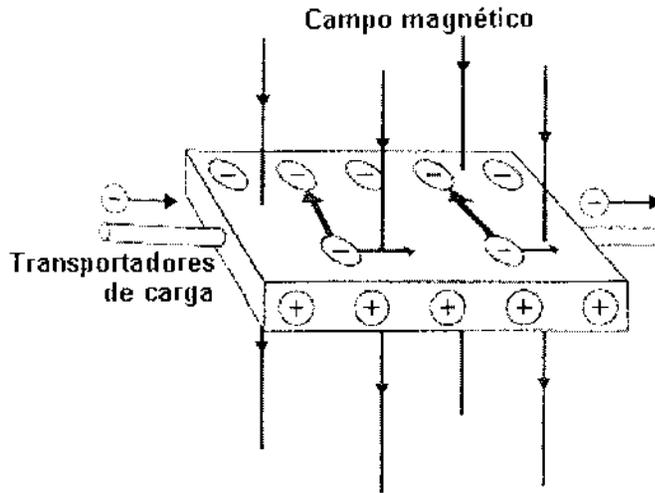


Figura 2.4: Esquema ilustrativo do efeito Hall.

Sensor	Tamanho	Escala de leitura (Gauss)	Frequência de resposta
Squid	3 - 4 μm	$10^{-9} - 10^5$	5MHz
Fluxgate	10 - 20mm	$10^{-6} - 10^2$	5kHz
Hall	10 - 100 μm	$10 - 10^6$	1MHz
MIRG	10 - 100 μm	$10^{-1} - 10^8$	1MHz

Tabela 2.1: Principais características de alguns sensores magnéticos

2.3 Sensores magnéticos Honeywell

Os sensores de magnetoresistência da Honeywell, são dispositivos de resistência em ponte que requerem unicamente uma tensão de alimentação para medir campos magnéticos [10]. Quando uma tensão de 0V a 10V é conectada ao V_{ponte} (ver Figura 2.5), o sensor começa a medir o campo magnético do ambiente, ou o campo magnético aplicado ao longo de um eixo sensível. Além do circuito em ponte, o sensor possui dois circuitos internos: o circuito de *offset* e o circuito de *set/reset*.

Geralmente, estes sensores são feitos de um filme fino de níquel-ferro (NiFe) depositado em um substrato de silício (Figura 2.6) e padronizado numa faixa de resistência, a resistência de *Permalloy* (marca registrada da *Western Electric Company* para as

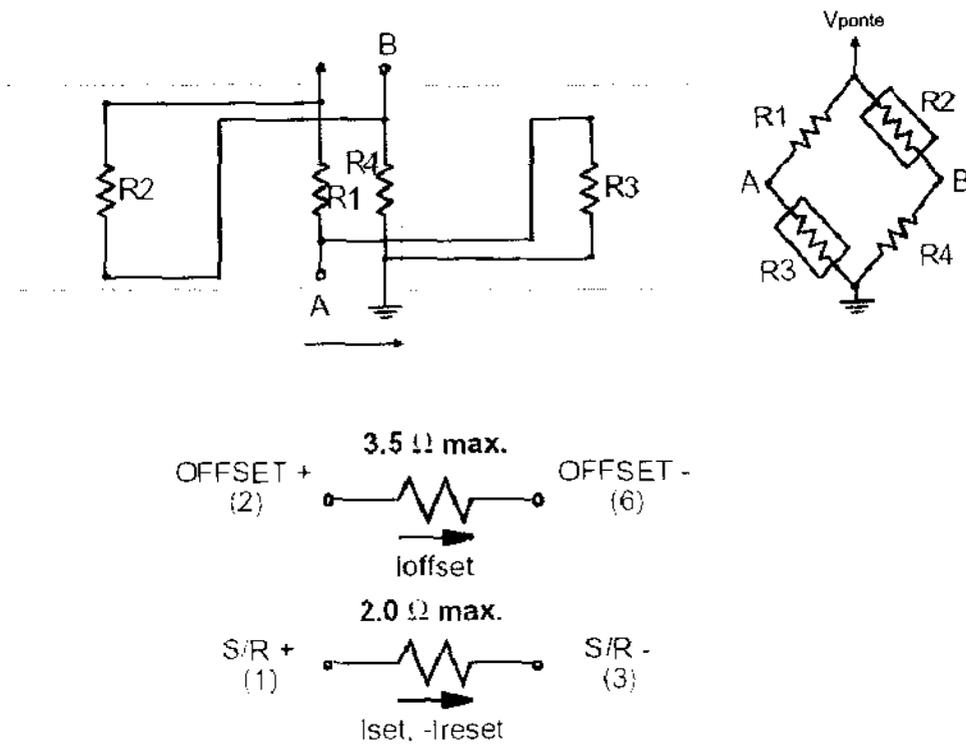


Figura 2.5: Configuração dos resistores de MRG em um sensor de ponte Wheatstone e os componentes internos do chip HMC1001.

ligas de níquel-ferro que tem uma permeabilidade magnética muito mais elevada que a do ferro puro). Na presença de um campo magnético qualquer, uma mudança na resistência da ponte causa uma mudança correspondente na tensão de saída.

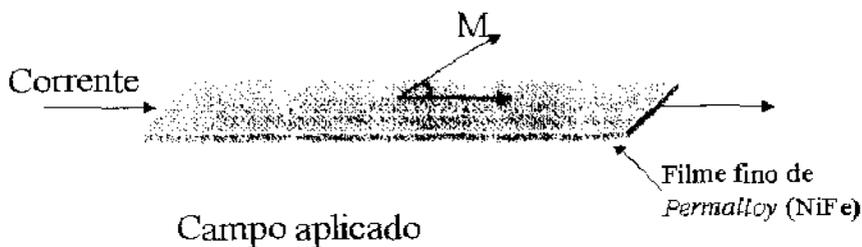


Figura 2.6: Princípio de Funcionamento de Sensores Magnetoresistivos.

Um campo magnético aplicado perpendicularmente à lateral do filme faz o vetor de magnetização da camada livre girar e mudar o ângulo (Equação 1.1). Isto faz com que

o valor da resistência varie ($\Delta R/R$) e produza uma mudança na tensão de saída da ponte de *Wheatstone*. Esta mudança na resistência de *Permalloy* é chamada de efeito magnetoresistivo, e é diretamente relacionado ao ângulo entre o fluxo de corrente e o vetor de magnetização.

2.3.1 Circuitos internos

Durante a fabricação, o eixo de magnetização pode ser facilmente direcionado ao longo do comprimento do filme (preferencialmente na direção do campo magnético). Isto permite o máximo de carga na resistência para um campo aplicado no filme. Entretanto, a influência de um campo magnético forte (mais de 10 Gauss) ao longo do eixo de magnetização pode perturbar a polaridade de magnetização do filme, mudando assim as características do sensor. Um forte campo magnético deve ser aplicado por um certo tempo para restaurar as características do sensor. A polaridade do sinal de saída da ponte depende da direção de magnetização do filme interno.

O circuito de *offset* possui vários modos de operação quando uma corrente DC é percorrida através do mesmo:

- um campo magnético indesejado pode ser subtraído da saída;
- *offset* da ponte pode ser regulado para zero;
- a saída da ponte de *Wheatstone* pode ser ligada à entrada do circuito de *offset* para zerar a saída de campo;
- ganho de ponte pode ser auto-ajustável pelo sistema.

A Figura 2.7 ilustra o diagrama de blocos para os circuitos do chip HMC2003 (ver Seção 2.3.2). Neste diagrama é mostrado o circuito interno de *set/reset* e o seu circuito externo de controle. Da mesma maneira, são mostrados os circuitos internos de *offset* e o circuito externo que deve ser projetado para controlá-lo.

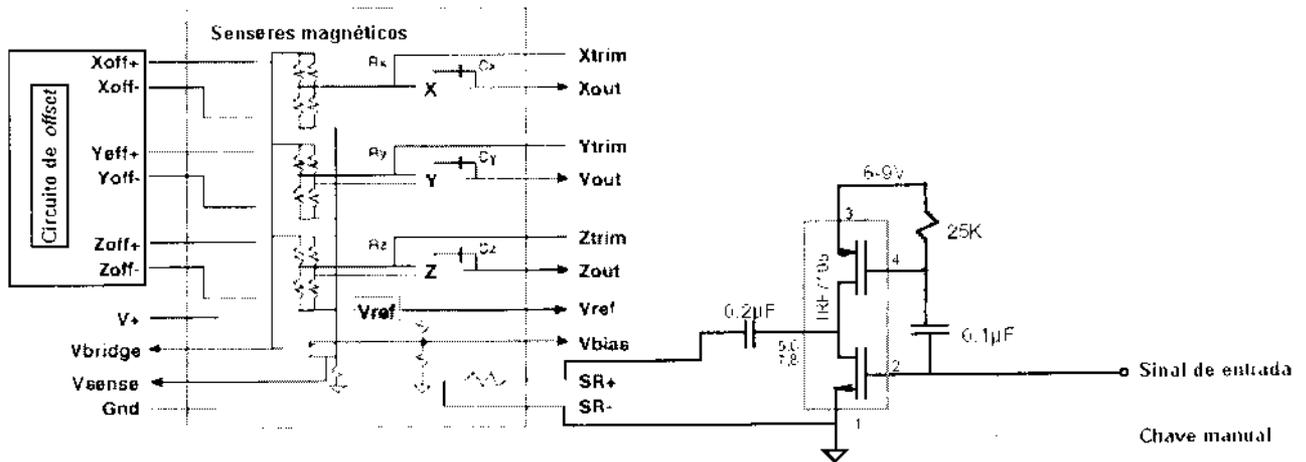


Figura 2.7: Diagrama de blocos para os circuitos do chip HMC2003.

Circuito de *offset*

Um campo magnético ambiente de pouca intensidade pode ser cancelado, aplicando-se uma corrente definida através do circuito de *offset*. Isto é útil para eliminar os efeitos de distorção, no campo magnético da Terra. Um exemplo de aplicação na área automotiva seria a redução dos efeitos de uma carroceria de um carro no campo magnético da Terra. Se o sensor tem uma posição fixa dentro do automóvel, o efeito da carroceria no campo magnético da Terra pode ser aproximado como um desvio, ou *offset*, deste campo. Se este desvio no campo da Terra pode ser determinado, então isto pode ser compensado aplicando um campo de igual intensidade e de sentido contrário usando o circuito de *offset*. Outra forma de utilizar o circuito de *offset* é aplicar uma corrente através do pino de entrada de forma a cancelar o efeito devido a campos magnéticos indesejados. Isto é chamado configuração em malha fechada, onde o sinal de retorno de corrente é uma medida direta do campo aplicado.

O circuito de *offset* de campo (*offset+* e *offset-*) gerará um campo magnético na mesma direção do que está sendo medido. Este circuito fornece 1Gauss por 50mA de corrente para HMC1001/1002. Por exemplo, se 25mA for drenado do pino de *offset+* ao pino *offset-* um campo de 0,5Gauss poderia ser adicionado ao campo medido.

Também, uma corrente de -25mA poderia subtrair $0,5\text{Gauss}$ do campo ambiente.

O *offset* pode ser utilizado como um elemento de realimentação em um circuito malha fechada. Fazendo isto, é possível produzir resultados desejáveis para medir campos magnéticos conectando-se a saída do amplificador em ponte a uma fonte de corrente, a qual é drenada pelo circuito.

Usando alto ganho e realimentação negativa, a saída da ponte de magnetoresistência cai a zero, $(OUT+) = (OUT-)$. Este método tem uma excelente resposta de linearidade a variações de temperatura. A idéia aqui é sempre operar com a ponte de magnetoresistência com resistência balanceada. Quando não há campo magnético sendo medido, a corrente através do circuito de *offset* cancelará a saída. A ponte sempre “vê” uma condição zero de campo. A corrente resultante utilizada para cancelar o campo aplicado é uma medida direta do campo e pode ser convertido para o valor de campo.

O *offset* pode ser utilizado também para autocalibrar a ponte de magnetoresistência durante uma operação normal. Isto é útil para ocasionalmente verificar o ganho da ponte para um determinado eixo ou para fazer adaptações devido à temperatura.

Circuito de *set/reset*

A maioria dos sensores magnéticos para pequenos campos é afetado por grandes campos magnéticos ($> 1 - 20\text{Gauss}$) que podem gerar uma degradação no sinal de saída. Para reduzir este efeito, e maximizar a precisão do sinal de saída, uma técnica de chaveamento magnético pode ser aplicada à ponte de magnetoresistência de forma a eliminar o efeito de campo remanescente. O propósito do circuito de *set/reset* é restaurar o estado de alta sensibilidade do sensor de magnetoresistência. Isto é obtido através de pulsos de alta corrente no circuito de S/R.

Quando o sensor MR é exposto a um campo magnético, os elementos do sensor são colocados em uma orientação aleatória dentro do domínio magnético, levando a uma sensível degradação (Figura 2.8). Um pulso de corrente (I_{set}) com um pico de corrente acima da corrente mínima necessária através do circuito de S/R gerará um

campo magnético forte que reordenará os domínios magnéticos em uma direção, isto irá assegurar uma alta sensibilidade e a possibilidade de outras leituras sem a distorção causada por campos remanescentes. Um pulso negativo (I_{reset}) irá girar a orientação do domínio magnético na direção contrária, e mudará a polaridade de saída do sensor. Os estados destes domínios magnéticos podem ser retidos por anos, enquanto não existirem campos magnéticos presentes perturbando.

O circuito de *set/reset* deve pulsar uma corrente para realinhar, os domínios magnéticos no sensor. Este pulso pode ser curto ($2\mu s$) e em média consome menos de 1mA DC quando pulsando continuamente.

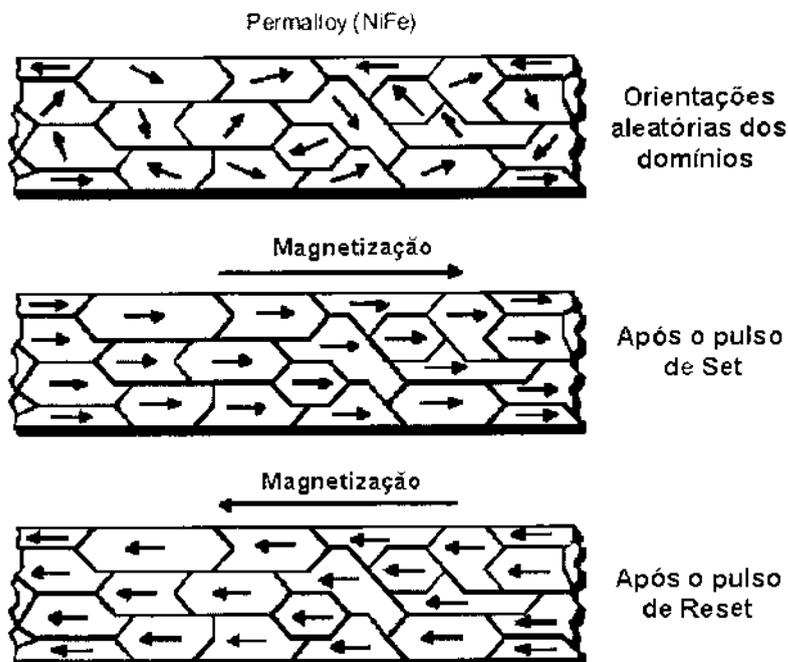


Figura 2.8: Orientação de Domínios Magnéticos em filmes MRG.

Usando o circuito de *set/reset* muitos efeitos podem ser eliminados ou reduzidos, como variação de temperatura, erro de não linearidade, e perda de sinal de saída devido à presença de altos campos magnéticos. Isto pode ser feito utilizando os seguintes procedimentos:

- Um pulso de corrente, I_{set} , pode ser aplicado aos pinos S/R+ e S/R- para de-

sempenhar uma condição “*Set*”. A saída da ponte pode então ser medida e armazenada como $V_{out}(Set)$.

- Outro pulso igual e de corrente contrária deve ser aplicado ao pinos para desempenhar uma condição “*Reset*”. A saída da ponte pode então ser medida e armazenada como $V_{out}(Reset)$.
- A saída da ponte, V_{out} , pode ser expressa como:

$$V_{out} = \frac{V_{out}(Set) - V_{out}(Reset)}{2} \quad (2.1)$$

Esta técnica cancela a saída de *offset* e os efeitos de temperatura, principalmente a variação de temperatura da ponte.

Há muitos caminhos para projetar um circuito de pulsos *set/reset*, embora, o custo e a resolução final do campo determinarão o melhor tipo de circuito para uma dada aplicação. Um circuito simples de *set/reset* é mostrado na Figura 2.9.

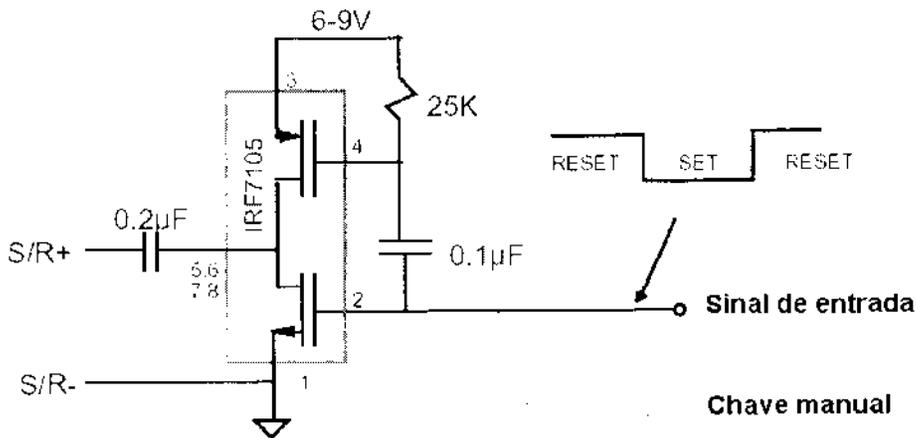


Figura 2.9: Circuito simples de pulsos *set/reset* para o sensor HMC1001.

2.3.2 O sensor magnético HMC2003

O sensor magnético para medida de campo em três componentes dimensionais HMC2003, ilustrado na Figura 2.10, utiliza um transdutor magnetoresistivo adaptado para interface eletrônica para medir a intensidade e a direção de um campo magnético [10]. Esses transdutores são sensíveis a campos magnéticos ao longo do comprimento, largura e altura (x, y, z). Campos inferiores a 2 Gauss podem ser detectados, com uma resolução de $40\mu\text{G}$ e sensibilidade de $1\text{V}/\text{Gauss}$. Possui frequência de leitura de 1kHz . Saídas analógicas estão disponíveis para cada um dos eixos x, y e z .

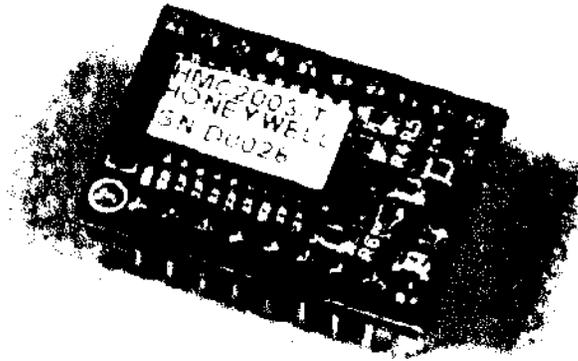


Figura 2.10: Placa com o sensor MRG.

O sensor é montado em uma pequena placa baseado na tecnologia SMD, utilizando os sensores HMC1001 e HMC1002. Além disso, ele possui um chip de tensão de referência interno que opera em uma faixa de tensão de 6V a 15V . O HMC2003 é ideal para aplicações que requerem medidas magnéticas em 2 ou 3 dimensões e ao mesmo tempo, um pequeno espaço para operação. A Figura 2.11 ilustra o diagrama de pinagem do sensor HMC2003.

Este sensor foi anteriormente utilizado na construção de um gaussímetro digital tridimensional, neste Centro de Pesquisas [28]. Neste projeto foi desenvolvido um sistema de aquisição e tratamento de dados do sensor HMC2003 através dos recursos de um microcontrolador de 8 *bits*, linguagem de programação *Assembly* e interface

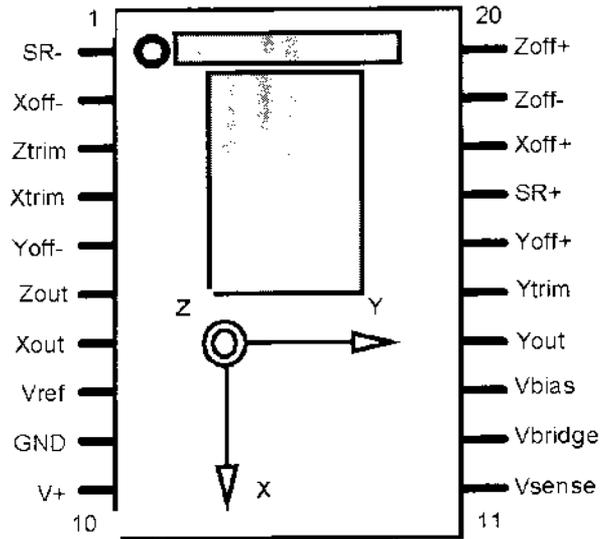


Figura 2.11: Diagrama de pinagem do Sensor HMC2003.

visual utilizando um mostrador de cristal líquido.

Na presente tese, o sensor é implementado em diversas aplicações. O capítulo seguinte descreve o trabalho de instrumentação, os testes realizados, o interfaceamento com o computador e a montagem experimental. Seguem-se, então, os resultados obtidos, as considerações finais e conclusões com sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 3

Instrumentação

Neste capítulo serão descritos os primeiros testes realizados com o sensor magnético HMC2003 e o programa de controle, aquisição e tratamento de dados.

3.1 Primeiros testes

3.1.1 Calibração

Os primeiros testes realizados com o sensor magnético tiveram por objetivos sua calibração e teste de sensibilidade ao longo dos eixos x , y e z . Para isso foi construído um solenóide com as seguintes características:

- comprimento = 20cm
- densidade = 1200 voltas/m
- raio = 1cm

Foi aplicada ao solenóide uma corrente DC, até que, em sua extremidade, se obtivesse o valor 2 *Gauss* (valor de saturação do sensor MRG usado). As medidas foram comparadas com as obtidas por um sensor comercial *Hall*, previamente calibrado. Para cada valor de corrente foram feitas várias medidas, sendo feita uma média destas, a fim de estabelecer o erro. O gráfico *campo (B) × corrente (I)* obtido, para os dois

sensores, está representado na Figura 3.1. Dado $Y = A + B * X$, o resultado da Tabela 3.1 mostra uma boa concordância entre as duas medidas.

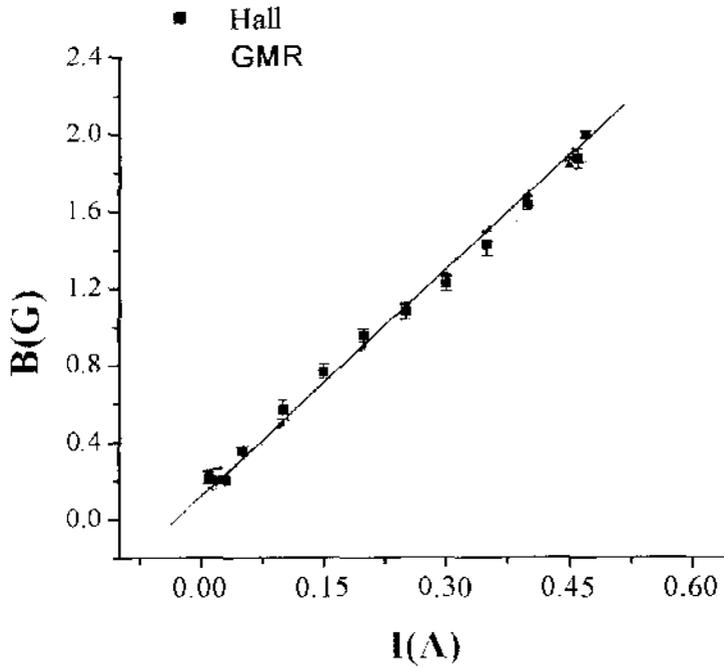


Figura 3.1: Calibração obtida para o sensor por MRG em comparação ao Sensor Hall - $B \times I$.

Parâmetro	sensor Hall	sensor MRG
A (G)	$0,12 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,03$
B (G/A)	$3,93 \pm 0,06$	$3,90 \pm 0,10$

Tabela 3.1: Resultados da calibração do sensor por MRG

3.1.2 Sensibilidade tridimensional

Fazendo-se necessário um teste de sensibilidade de cada eixo, foi usado um conjunto de bobinas de *Helmholtz*¹ e nele aplicado uma corrente DC em um certo intervalo. A Figura 3.2 mostra a montagem para este experimento.

A separação das bobinas é igual ao raio. Desta forma, a indução magnética B , em gauss, no ponto médio será

$$B_z = \frac{\mu_0 NI}{a} \frac{8}{5^{3/2}} \quad (3.1)$$

em que $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, N é o número de espiras em cada uma das bobinas, I é a corrente, dada em ampère, e a é a separação das bobinas, igual ao raio.

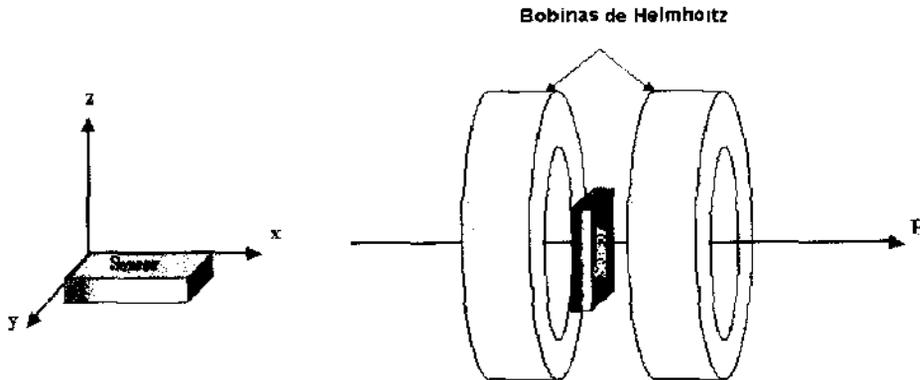


Figura 3.2: Montagem experimental para o teste de sensibilidade dos eixos.

O sensor foi então posicionado no centro do conjunto, de modo que seu eixo z estivesse alinhado com a direção do campo gerado pelas bobinas. Foram feitas medidas em função da corrente e os dados armazenados, obtendo-se o gráfico da Figura 3.3. Neste gráfico a curva para o eixo z é linear, enquanto as medidas para x e y permanecem constantes. Um teste para o eixo y também nos dá os resultados esperados: x e z

¹Uma bobina de *Helmholtz* consiste de duas bobinas circulares, planas, cada uma contendo N espiras com correntes fluindo no mesmo sentido. Neste trabalho foram utilizadas bobinas de raio igual a 4cm com 10^3 voltas cada uma, estando associadas em paralelo.

apresentam respostas constantes, enquanto y exibe uma resposta linear, como mostra a Figura 3.4.

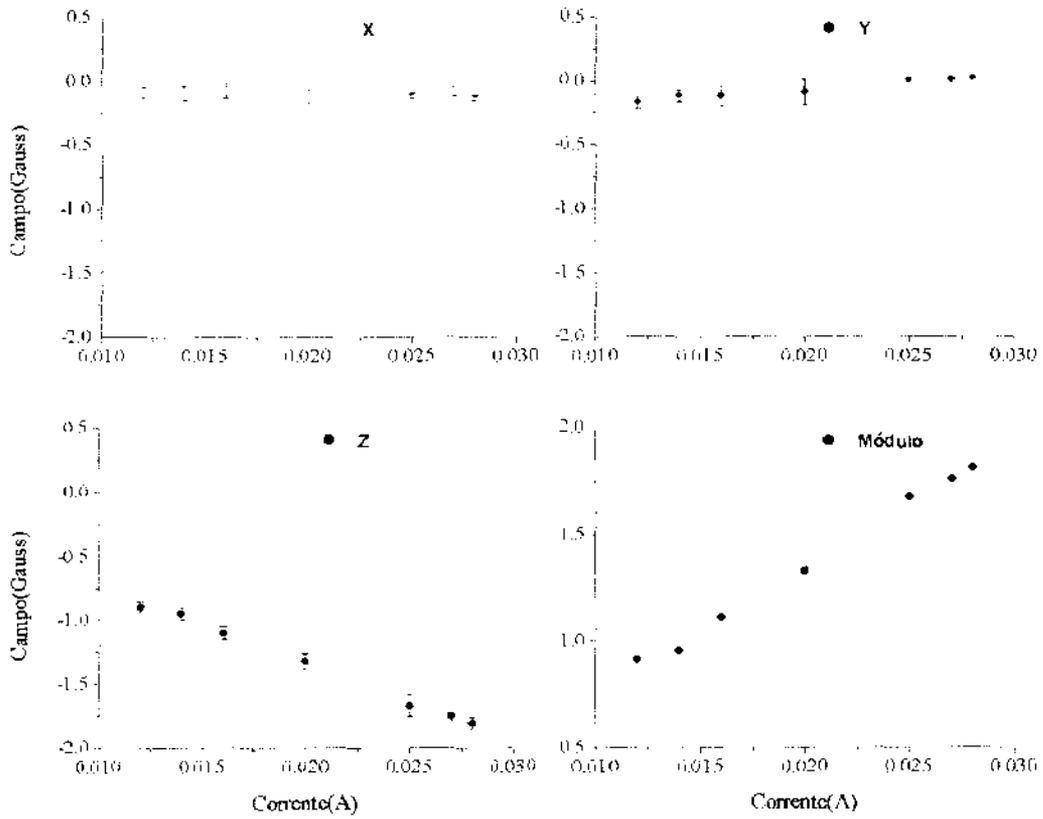


Figura 3.3: Teste de sensibilidade do eixo z.

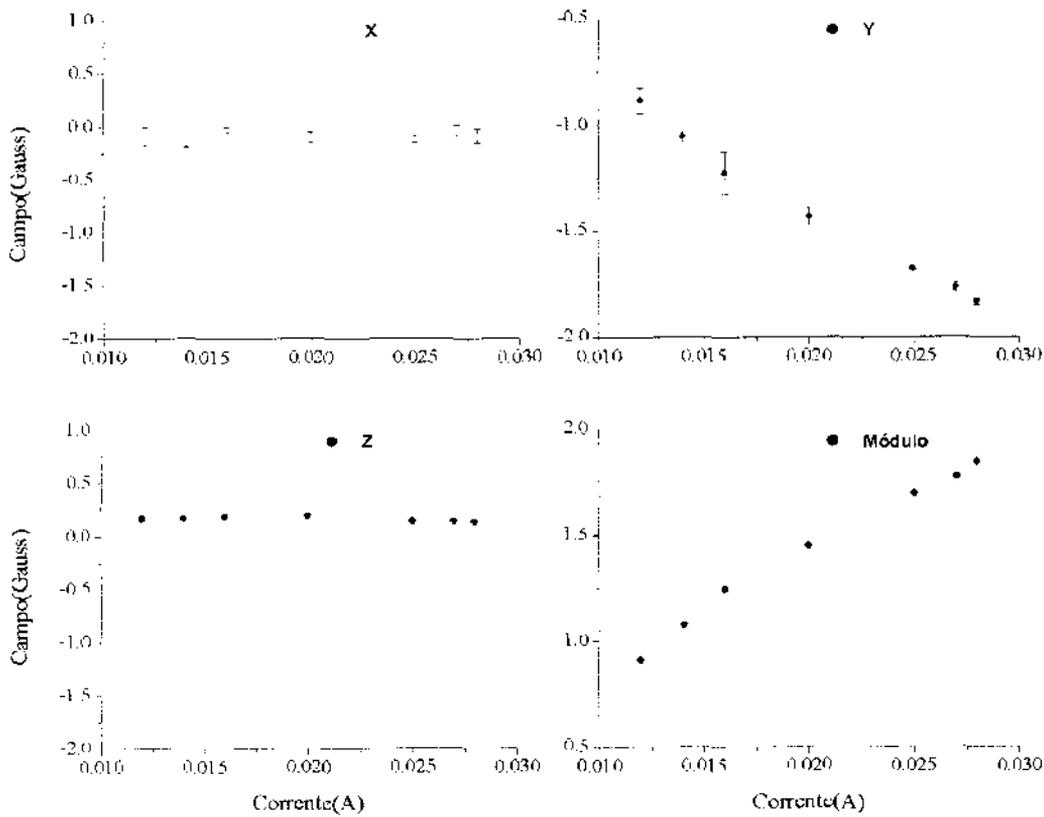


Figura 3.4: Teste de sensibilidade do eixo Y.

3.2 Programa de controle

O programa de aquisição de dados do conversor A/D e controle do sensor HMC2003 foi desenvolvido na linguagem de programação gráfica *LabView* [29]. Este *software* foi escolhido por ser dedicado à instrumentação e ter excelente interface com o usuário.

Para o interfaceamento *SensorHMC2003* \Leftarrow *Computador* \Leftrightarrow *AD974* foi utilizada uma porta paralela². Sua interface com o usuário e o diagrama do programa estão ilustrados na Figura 3.5. Nesta interface são mostrados os gráficos de medidas dos eixos *x*, *y* e *z* em tempo real, bem como o módulo do campo medido.

²A porta paralela [30] é uma interface de comunicação entre o computador e um periférico. Alguns periféricos se utilizam desta porta para enviar e receber dados para o computador (exemplos: impressora, *scanners* e outros).

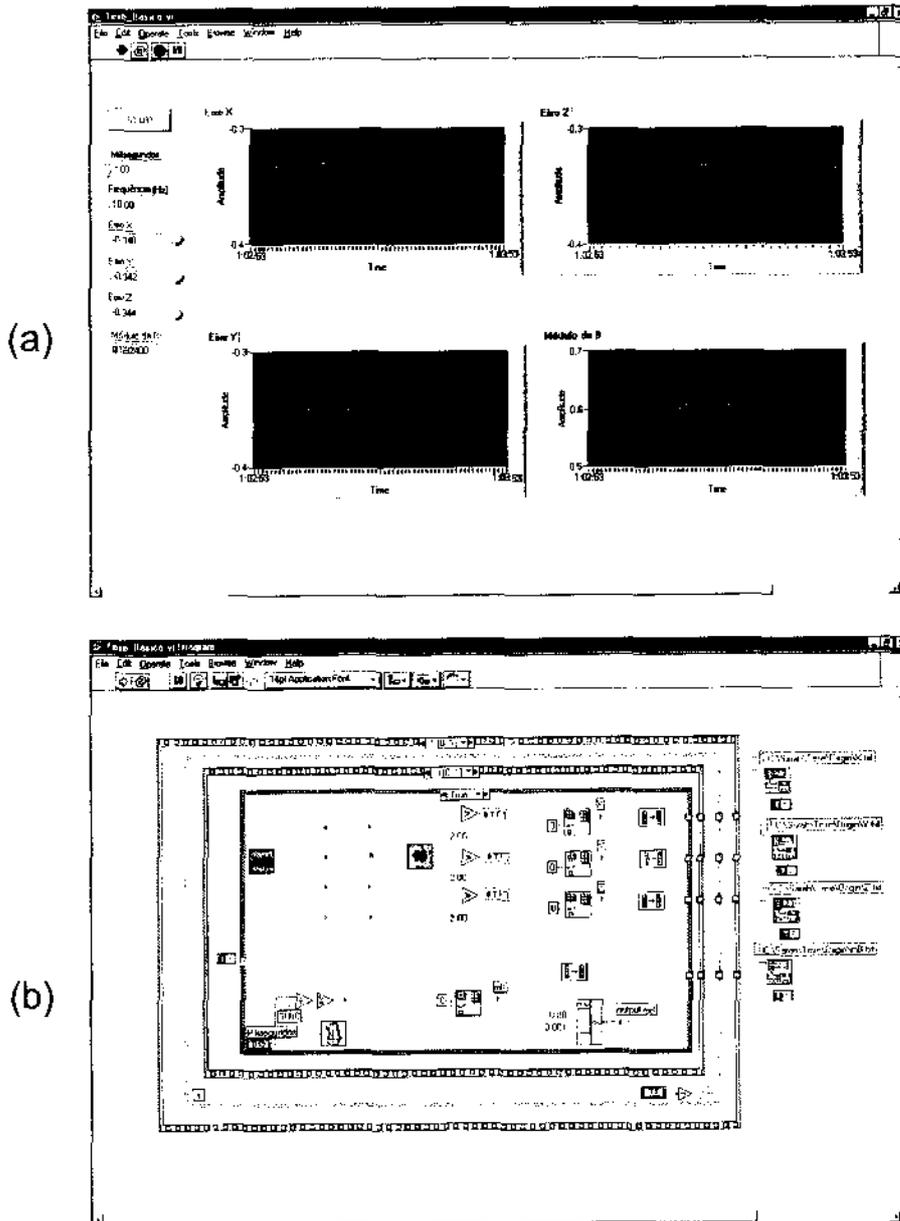


Figura 3.5: Programa de Controle: (a)interface com o usuário; (b)diagrama.

O fluxograma da Figura 3.6 descreve, de maneira simplificada, os comandos executados pelo programa.

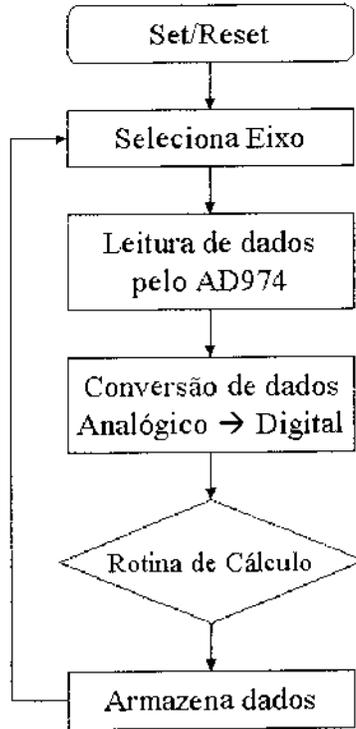


Figura 3.6: Fluxograma do programa principal.

Ao iniciar o programa, os pulsos de *Set* e *Reset* são aplicados antes de serem feitas as conversões. O programa controla a temporização necessária para que os dois FETs³ (transistores de efeito de campo) não conduzam ao mesmo tempo, ou seja, um deve ser desligado antes do outro para evitar que o circuito seja sobrecarregado. O circuito geral construído está ilustrado na Seção 3.2.3. Figura 3.9.

3.2.1 Conversor A/D

O conversor analógico/digital AD974 [31], ilustrado na Figura 3.7, é um sistema de aquisição de dados com comunicação serial de quatro canais. Possui entrada multiplexada, alta velocidade de amostragem (200kHz), 16 *bits* de resolução e tensão de

³O FET (*Field Effect Transistor*) é um dispositivo unipolar, isto é, opera com um tipo de portador, elétron ou lacuna. Um campo elétrico formado numa região chamada canal controla o fluxo de portadores através da modificação da resistência desse canal formado de material dopado do tipo *p* ou do tipo *n*, dando ao transistor, a denominação FET de canal *p* e FET de canal *n*, respectivamente.

referência interna de 2,5V.

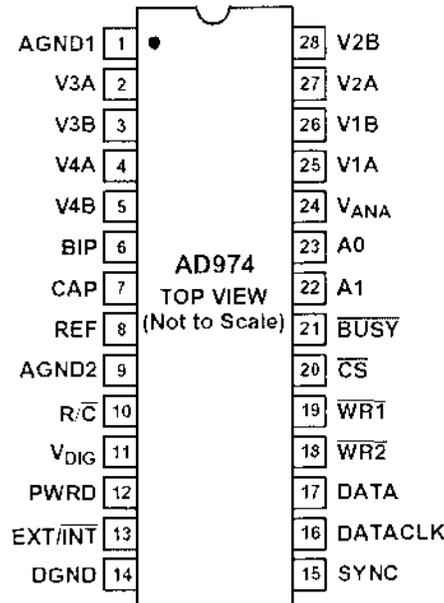


Figura 3.7: Diagrama de pinagem do conversor AD974.

É controlado por dois sinais de entrada: R/\overline{C} (*read/convert* - leitura/conversão) e \overline{CS} (*chip select* - habilitação do conversor). Quando R/\overline{C} é colocado em nível lógico baixo, com \overline{CS} em nível baixo, por no mínimo 50ns, o sinal de entrada é armazenado nos capacitores internos e a conversão é iniciada. Quando o primeiro processo de conversão começa, o sinal de \overline{BUSY} (ocupado) é colocado internamente em nível baixo até que a conversão esteja completa. Após o final da conversão, o sinal \overline{BUSY} retorna ao nível alto e o AD974 fica pronto para uma nova conversão. O pino \overline{CS} pode ser colocado permanentemente em nível baixo, com isso, R/\overline{C} pode ser usado para determinar o início da conversão ou a leitura de dados. Na primeira conversão, depois que o AD974 é iniciado, a saída de dados é indeterminada devido a carga dos capacitores internos ser aleatória.

Como o conversor possui quatro canais, o programa faz o controle através dos pinos A0 e A1 de acordo com a Tabela 3.2.

A1	A0	Canal selecionado
0	0	Canal 1
0	1	Canal 2
1	0	Canal 3
1	1	Canal 4

Tabela 3.2: Tabela de seleção de canais do AD974.

Modo pulso de disparo externo

O AD974 está configurado para aceitar a aplicação de um pulso de disparo externo para a leitura de dados, quando o pino EXT/\overline{JNT} (externo/interno) é colocado em nível alto. Este modo de operação é um dos métodos para leitura dos resultados da conversão. Os dados de saída da conversão " $n - 1$ " podem ser lidos durante a conversão ou após seu término. O pulso de disparo de dados (DATACLK) é o sinal responsável pela leitura dos dados do conversor. O sinal de DATACLK dispara o pino de saída de dados (DATA). Os dados de saída são válidos entre a borda de descida do DATACLK e a borda de subida do próximo pulso de disparo. A Figura 3.8 descreve a temporização do AD974.

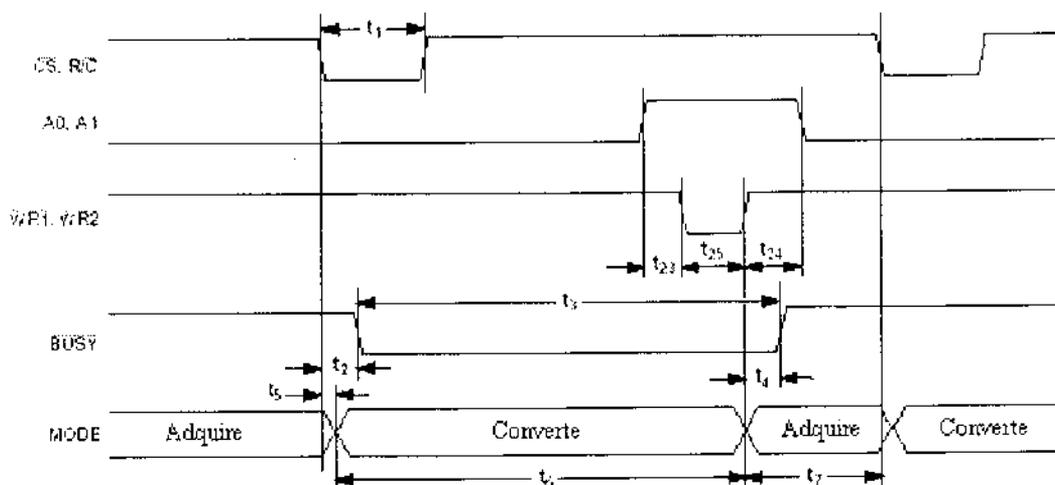


Figura 3.8: Diagrama de temporização básico do AD974.

3.2.2 Rotina de aquisição e tratamento de dados

A rotina de cálculo é responsável pelo ajuste e verificação do sinal do campo medido. Uma vez que o AD974 possui 16 *bits* de resolução e que o *bit* mais significativo é dedicado ao sinal do campo medido, temos $(2^{15}-1) \text{ bytes} = 32KB (1KB = 1024 \text{ bytes})$. Assim, essa rotina “pega” os dados de cada eixo, guardados na posição de memória, e faz os seguintes cálculos:

$$32KB = 32.767 \text{ bytes}$$

$$2,5 \text{ Volts} \rightarrow 32KB$$

$$2,0 \text{ Volts} \rightarrow x$$

$$x = 26.213 \text{ bytes}$$

Visto que o A/D possui uma referência em 2,5V e sua tensão de entrada para conversão é de 0 até 5V, acima ou abaixo da referência temos 2,5V que corresponde a 32K. O sensor possui resolução de 1V/Gauss, assim, é necessário o seguinte ajuste:

$$2 \text{ Gauss} \rightarrow 26.213 \text{ bytes}$$

$$Y \text{ Gauss} \rightarrow \text{Dado Adquirido}(A/D)$$

$$Y \text{ Gauss} = \frac{\text{Dado Adquirido}(A/D) \times 2}{26.213}$$

O primeiro *bit* da palavra recebida do A/D é que determina o sinal do campo medido. Se o bit for “0” o campo medido é negativo, se o bit for “1” o campo medido é positivo.

3.2.3 Placa de circuito para o sensor HMC2003

A Figura 3.9 ilustra o circuito construído para o sensor HMC2003. Neste esquema são mostrados o sensor magnético, o conversor AD974, o circuito de *set/reset* e uma ilustração da porta paralela, já descritos anteriormente.

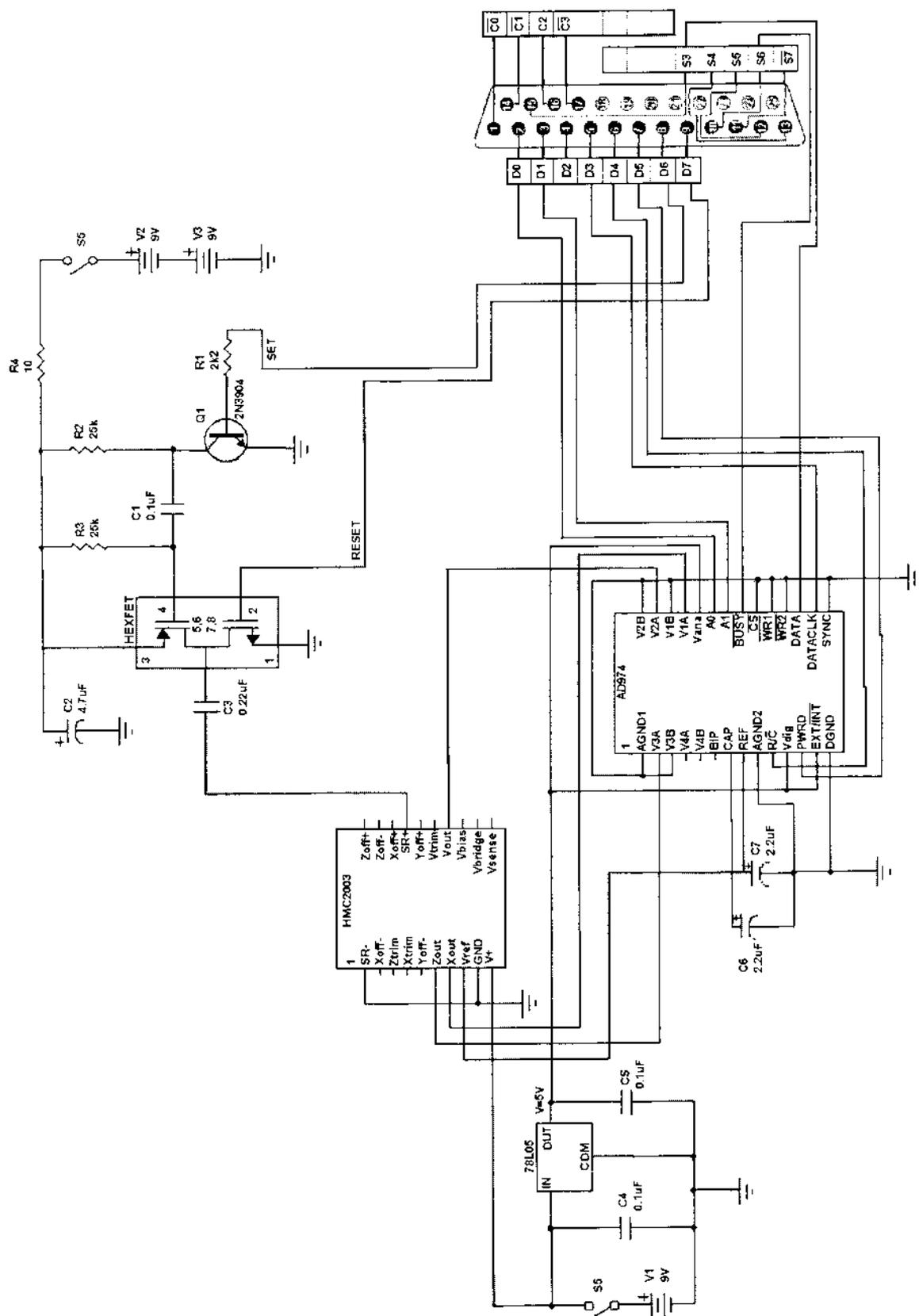


Figura 3.9: Esquema da placa de circuito para o sensor HMC2003.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são descritos o mapeamento do campo magnético em torno de um solenóide, a montagem experimental, os resultados e propostas de novas aplicações.

4.1 Mapeamento do campo magnético em torno de um solenóide.

Uma vez obtidos os parâmetros no teste de calibração e sensibilidade dos eixos, projetou-se um experimento para mapear o campo magnético em torno de um solenóide. Uma prancha foi construída numa área de $160cm^2$, sendo as medidas espaçadas de 1cm. O mapeamento obtido, ilustrado na Figura 4.1, refere-se ao valor do módulo do campo numa dada posição (x,y) do plano.

Os dois picos são os valores de campo nas extremidades do solenóide. Percebe-se que existe um vale entre os picos, que é devido ao fato do raio do solenóide ser menor que a largura da caixa do sensor, não sendo possível as medidas em seu interior. Foram feitas, então, medidas acima do solenóide. O experimento foi repetido com dois solenóides de dimensões diferentes.

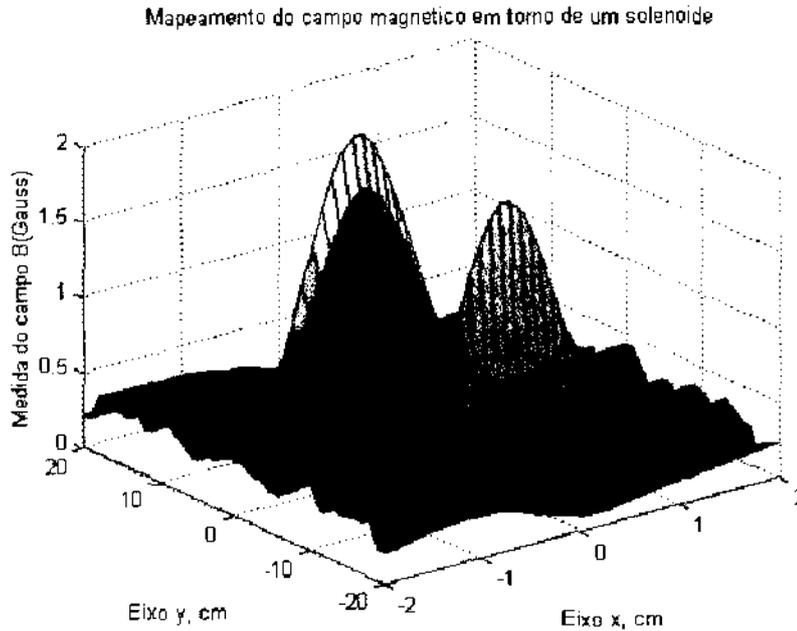


Figura 4.1: Mapeamento do campo magnético em torno de um solenóide usando o sensor HMC2003.

4.2 Montagem experimental

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram, esquematicamente, a montagem dos experimentos utilizando o interfaceamento *Sensor/Computador*. Um sinal AC (senoidal, por exemplo) é aplicado a um alto-falante que faz vibrar uma fina haste de vidro contendo em sua extremidade uma amostra magnetizada¹. O sensor é capaz de medir qualquer movimento da amostra. Os dados são lidos e armazenados pelo programa de controle.

¹Para a amostra utilizada, um grão de fíã comum (ferrita) de alguns mg, foi suficiente.

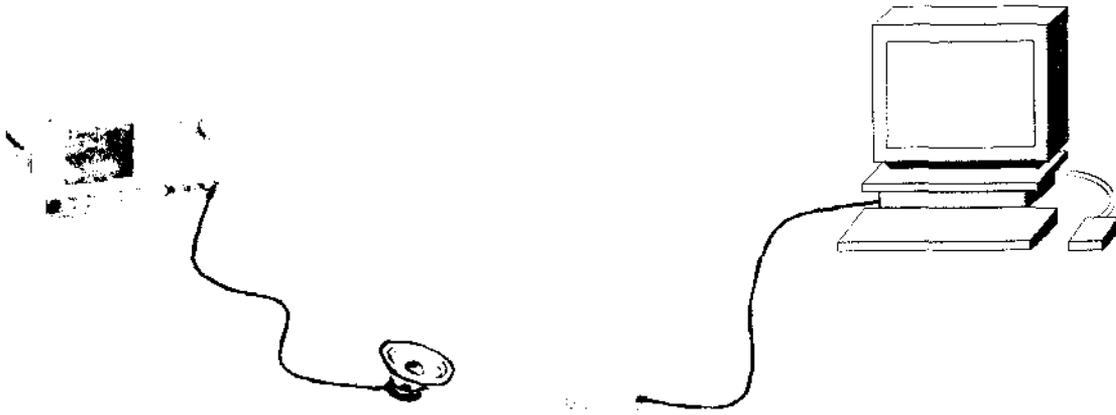


Figura 4.2: Esquema ilustrativo da montagem experimental.



Figura 4.3: Montagem experimental.

O ruído externo foi minimizado envolvendo o sistema numa caixa de alumínio aterrada. Neste protótipo, diversas massas de amostras e diferentes frequências foram testadas obtendo-se gráficos do movimento em tempo real, curvas de frequência de ressonância medidas ponto-a-ponto, como também utilizada a técnica de aplicação de pulsos.

4.3 Resposta a sinal AC

Como foi descrito, um sinal AC aplicado a um alto falante faz vibrar uma amostra magnetizada posicionada acima do sensor HMC2003. Os dados são coletados e ar-

mazenados pelo programa de controle. Desta forma, o sinal resultante da amostra pode, em seguida, ser analisado.

Aplicando, por exemplo, uma frequência de 1Hz no alto-falante, este fará vibrar a amostra, também em 1Hz, e obtemos, em tempo real, a variação de campo sobre o sensor. No gráfico da Figura 4.4 está a variação ao longo do eixo z . As leituras são feitas a cada 100ms (pontos vermelhos). A seguir, aplica-se uma transformada de Fourier ² [32] ao sinal detectado, obtendo-se assim o espectro, no qual nota-se, nitidamente, a componente de 1Hz do sinal.

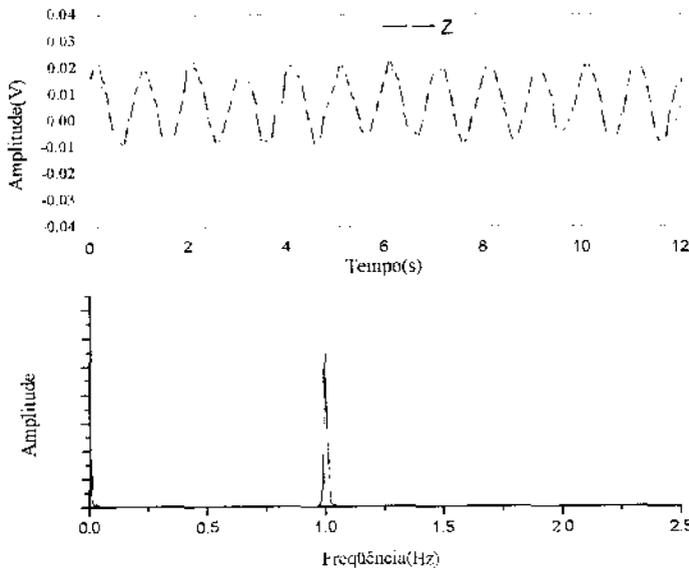


Figura 4.4: Gráfico resultante da aplicação de 1Hz em amostra de 33mg e respectivo espectro de Fourier.

Este é um exemplo simples de leitura de campo magnético pelo sensor e armazenagem

²A transformada de Fourier, é uma ferramenta utilizada na decomposição de um sinal, que varia no tempo, em seus componentes de frequência, de forma que um coeficiente de Fourier reflete a importância de determinada frequência para o sinal.

Definição: Seja um sinal genérico cuja amplitude varia com o tempo de acordo com a função $x(t)$, onde t é o tempo. A transformada de Fourier para o domínio de frequência f será a função $X(f)$, dada por: $X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i 2\pi ft} dt$.

Assim, $X(f)$ será o sinal dado por $x(t)$ no domínio de frequência, ou seja, o seu *espectro*.

de dados pelo programa. Frequências maiores aplicadas à amostra requerem uma taxa de leitura também maior, respeitando o teorema de *Nyquist*, que nos diz que a frequência de amostragem de um sinal (f_s) deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a máxima frequência do sinal (f_{max}), ou seja,

$$f_s \geq 2f_{max}$$

Outras formas de sinal podem também ser lidas pelo sensor. A Figura 4.5 e 4.6 mostram, respectivamente, a leitura de um sinal de amplitude modulada senoidal e quadrada e seus respectivos espectros de Fourier.

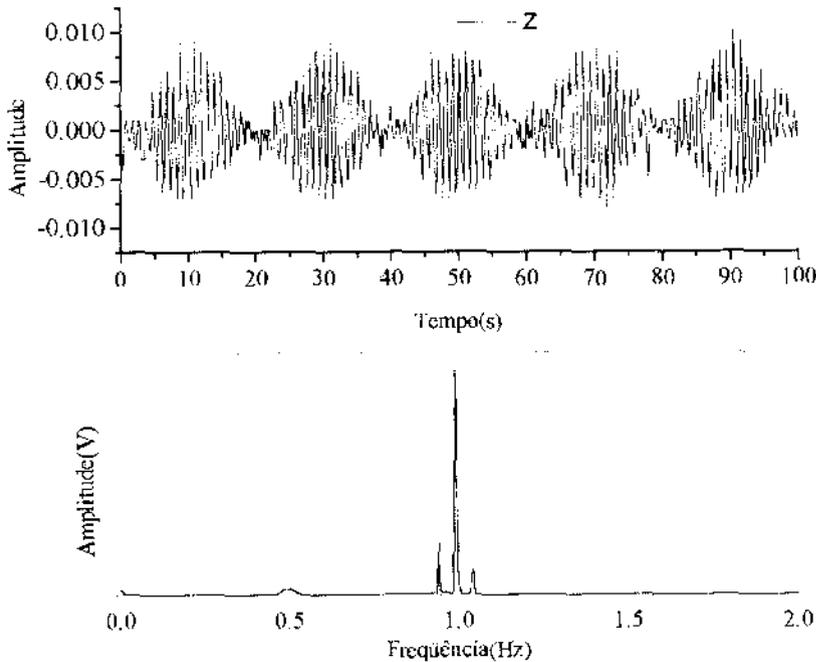


Figura 4.5: Aplicação de sinal modulado senoidal → Portadora = 1Hz e sinal modulante = 100mHz.

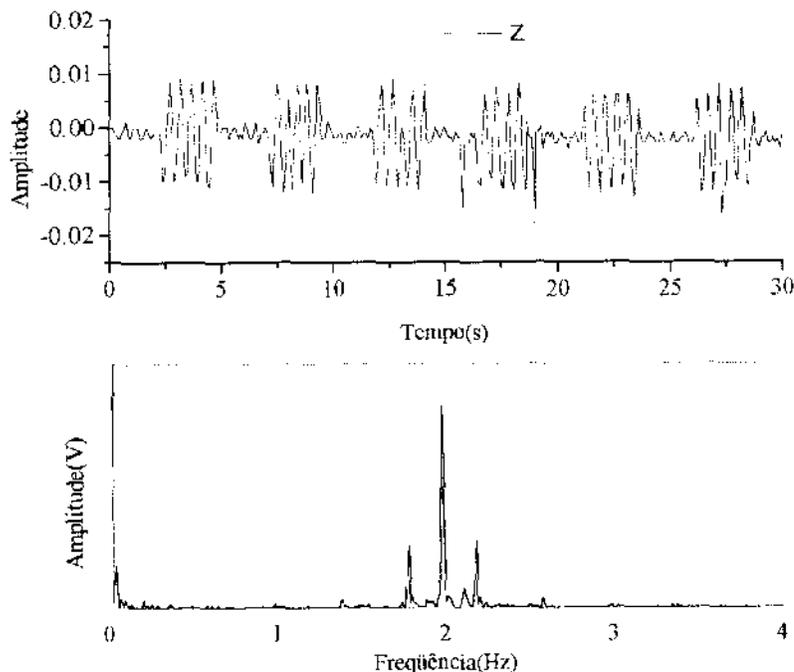


Figura 4.6: Aplicação de sinal modulado quadrado \rightarrow Portadora = 2Hz e sinal modulante = 100mHz.

4.4 Resposta do sensor na ressonância do sistema

O sistema haste + amostra possui uma frequência característica, logo, quando introduzimos uma força externa oscilatória nesta frequência haverá uma ressonância [33].

Por ser flexível, a haste terá um movimento harmônico quando sujeita a uma força externa que não ultrapasse o seu limite de elasticidade. A força que promoverá esta oscilação é do tipo $-kL$; onde k é a constante elástica da haste e L seu comprimento. A amplitude de oscilação máxima do sistema será quando ocorrer a condição [34]

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{kL}{2m}}$$

Esta será a frequência de ressonância do sistema, que dependerá das grandezas acima observadas.

Para o teste de medida da frequência de ressonância (F_r) foram utilizadas amostras de diferentes massas. Os gráficos que se seguem mostram os resultados de F_r utilizando o método de medidas ponto-a-ponto, onde variamos a frequência do sinal aplicado na

amostra e medimos sua amplitude.

A linha contínua representa um ajuste com uma função *Lorentziana*.

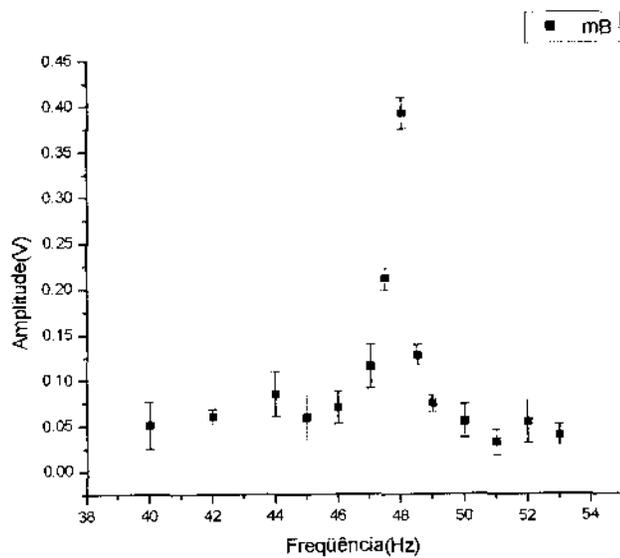


Figura 4.7: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 32,95mg.

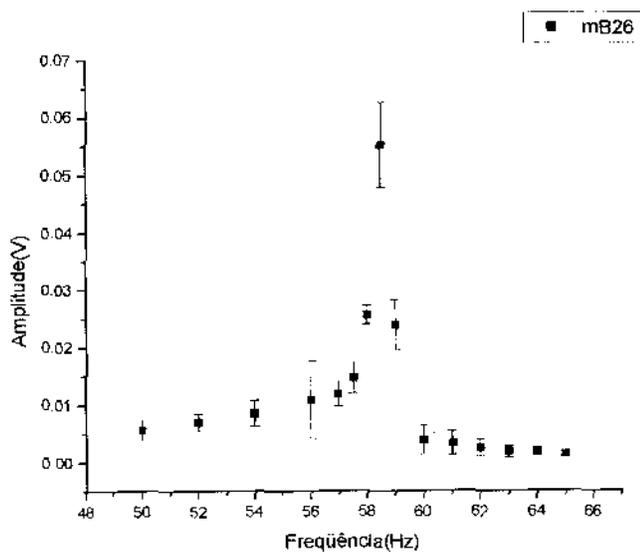


Figura 4.8: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 26,55mg.

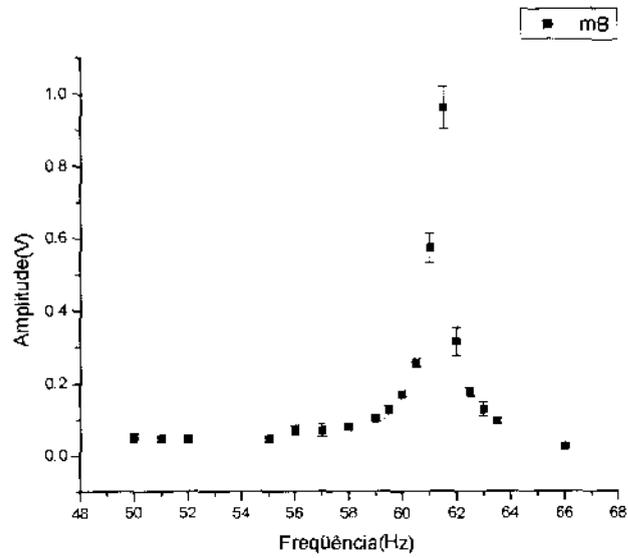


Figura 4.9: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 20,95mg.

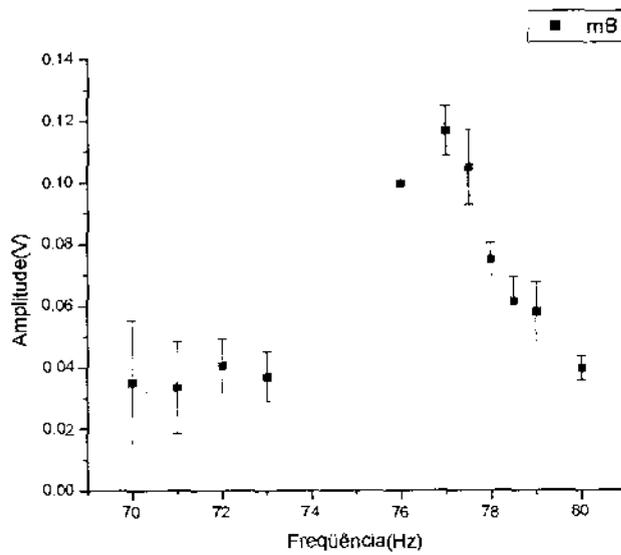


Figura 4.10: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 11,3mg.

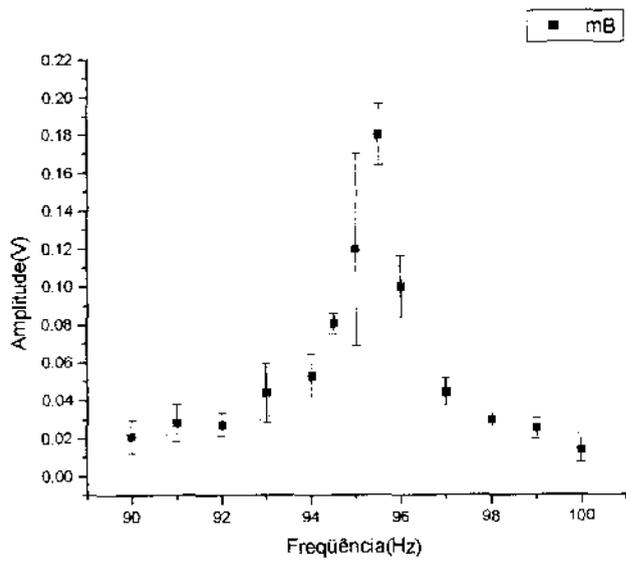


Figura 4.11: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 5,25mg.

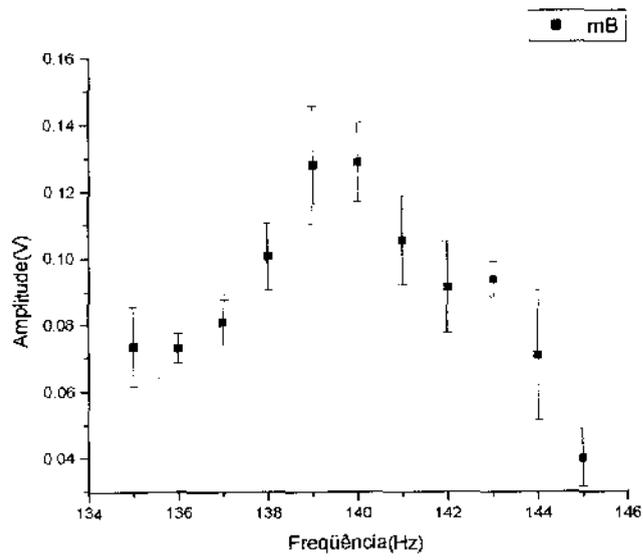


Figura 4.12: Frequência de Ressonância para amostra de massa = 2,5mg.

A Tabela 4.1 resume os dados obtidos.

Massa(mg)	Frequência de Ressonância(Hz)	Largura(Hz)
$2,50 \pm 0,01$	$139,50 \pm 0,2$	13 ± 6
$5,25 \pm 0,07$	$95,40 \pm 0,06$	$2,50 \pm 0,3$
$11,30 \pm 0,01$	$76,70 \pm 0,05$	$2,60 \pm 0,4$
$20,95 \pm 0,07$	$61,30 \pm 0,02$	$1,10 \pm 0,05$
$26,55 \pm 0,07$	$58,50 \pm 0,05$	$1,10 \pm 0,2$
$32,95 \pm 0,07$	$47,90 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,05$

Tabela 4.1: Resumo das frequências de ressonância obtidas e parâmetros de ajuste.

A frequência de ressonância do sistema é dada por:

$$\varpi_0 = \sqrt{\frac{kL}{2(m_H + m_A)}} = \left(\frac{kL}{2m_T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Aplicando o logaritmo temos:

$$\log \varpi_0 = \frac{1}{2} \log \left(\frac{kL}{2}\right) - \frac{1}{2} \log(m_T)$$

Sendo $\frac{1}{2} \log \left(\frac{kL}{2}\right)$ uma constante, A , temos uma função do tipo:

$$Y = A - 0,5x.$$

O gráfico a seguir mostra esta dependência linear em escala logarítmica, e a Tabela 4.2 os parâmetros obtidos de um ajuste linear.

Parâmetro	Valor	Erro(\pm)
A	2,27	0,05
B	-0,38	0,04

Tabela 4.2: Parâmetros resultantes do gráfico *Frequência de ressonância* $\times m_{amostra}$.

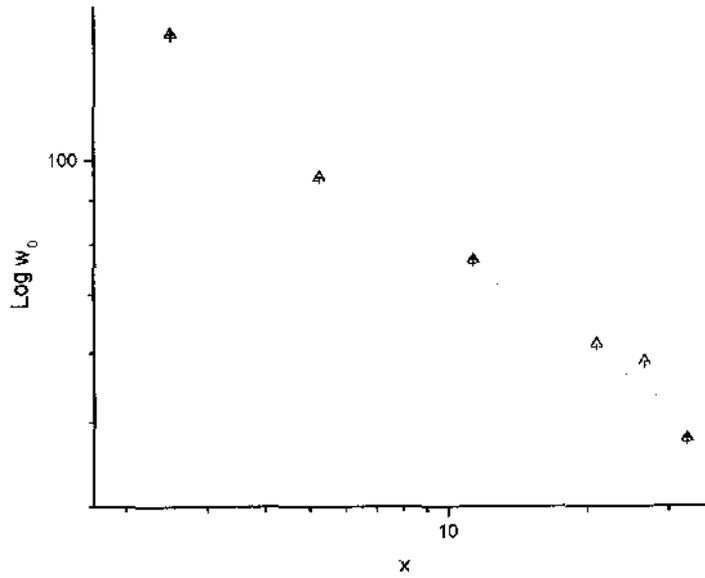


Figura 4.13: Freqüência de ressonância em função da massa da amostra, em escala logarítmica.

Para compararmos os parâmetros experimentais aos parâmetros teóricos, precisamos obter o valor teórico de A . Para isso, devemos calcular o valor de k para estes sistemas.

Usaremos, então, os dados da amostra de 11,3mg:

$$L = 4,54cm = 0,045m$$

$$m_H + m_A = 14,37 + 11,3 = 25,67mg$$

$$F_r = 76,70Hz$$

Se $\omega_0 = \sqrt{\frac{kL}{2m_T}}$, elevando os dois termos ao quadrado, temos:

$$4\pi^2 f^2 = \frac{kL}{2m_T}$$

$$\Rightarrow kL = 8\pi^2 f^2 m_T$$

$$k = \frac{8\pi^2 f^2 m_T}{L}$$

$$\dots k = 258,01 \text{ kg/s}^2$$

Assim, de

$$Y = A + Bx$$

$$= \log\left(\frac{kL}{2}\right)^{\frac{1}{2}} - 0,5\log(m_T), \text{ temos}$$

$$x = \log(m_T) \text{ e } B = -0,5$$

$$A = \sqrt{\frac{kL}{2}} = 2,41$$

Observamos, portanto, que os valores experimentais nos dão uma boa aproximação dos valores calculados:

Parâmetro	Calculado	Medido	Erro(\pm)
A	2,4	2,27	0,13
B	-0,5	-0,38	0,12

Tabela 4.3: Comparação: parâmetros calculados e medidos.

4.4.1 Resposta à aplicação de sinal pulsado

A técnica de aplicação de sinal pulsado consiste em se aplicar ao sistema (haste+amostra) uma excitação com duração $\Delta\tau$ e, em seguida, permitir que o sistema relaxe por um tempo de, no mínimo, $5 \times \Delta\tau$. Esta técnica, também utilizada em Ressonância Magnética Nuclear [35], possui vantagens sobre a aplicação de sinal contínuo, como maior sensibilidade e resolução na detecção e análise do sinal.

Nos experimentos anteriores a haste de vidro utilizada era do tipo capilar, ou seja, haste oca, dificultando a troca de amostras, por ser muito frágil. Nestes novos testes

ela foi substituída por uma haste de vidro do tipo bastão, muito fina, porém de mais fácil manuseio. Assim, uma vez que medimos a frequência do sistema haste+amostra, as frequências de ressonância mudam para estes novos testes.

Os dados da Tabela 4.4, descrevem as novas medidas. O gráfico da Figura 4.14 confirma o estudo da ressonância.

Massa(mg)	Frequência de Ressonância(Hz)	Largura(Hz)
$2,5 \pm 0,01$	$52,90 \pm 0,08$	$0,87 \pm 0,2$
$11,3 \pm 0,01$	$35,00 \pm 0,10$	$0,58 \pm 0,1$
$20,95 \pm 0,07$	$27,30 \pm 0,02$	$0,98 \pm 0,05$
$32,95 \pm 0,07$	$22,30 \pm 0,015$	$0,25 \pm 0,02$

Tabela 4.4: Resumo das novas Frequências de Ressonância obtidas com a haste sólida.

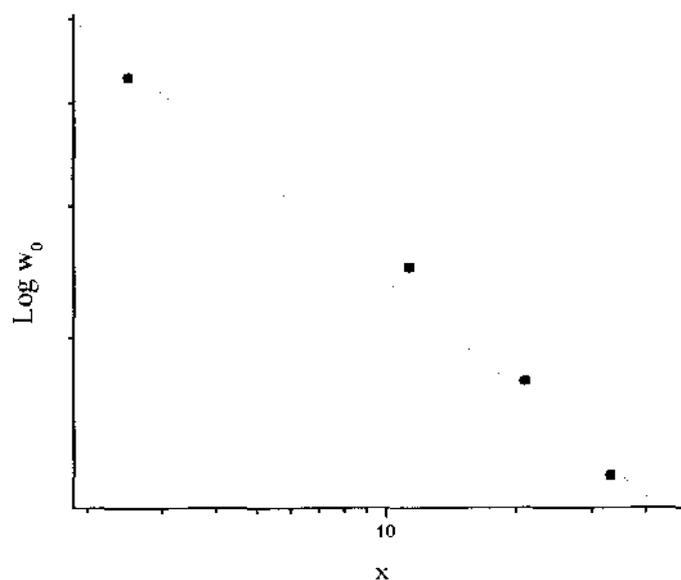


Figura 4.14: Frequência de ressonância em função da massa da amostra, em escala logarítmica (haste sólida).

O valor de Δf , em destaque no gráfico da Figura 4.15, a meia-largura à meia-altura,

é o intervalo de freqüências que faz o sistema vibrar. Um pulso de duração $\Delta\tau \approx 1/\Delta f$ (Figura 4.16), é aplicado ao sistema, a fim de obtermos a resposta do sistema a partir do espectro de Fourier do sinal detectado (Figura 4.15).

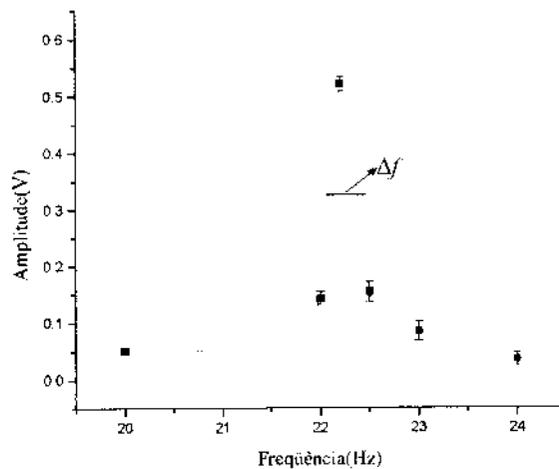


Figura 4.15: Freqüência de ressonância medida ponto-a-ponto para amostra de 33mg.

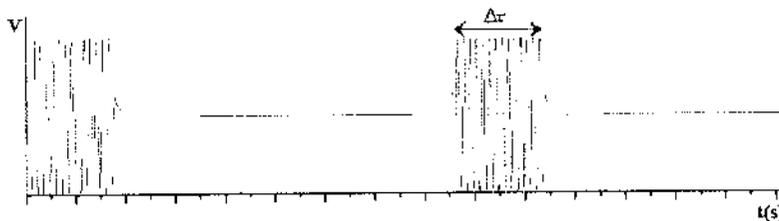


Figura 4.16: Esquema ilustrativo do pulso aplicado: $\Delta\tau \approx \frac{1}{\Delta f}$

Os pulsos aplicados contêm a freqüência de ressonância característica do sistema haste+amostra. Para a amostra de 33mg, que possui freqüência de ressonância igual a 22,3Hz e Δf de aproximadamente 0,25Hz, foram aplicados pulsos de 5,6s de duração. O gráfico 4.17 mostra o sinal obtido da amostra (componente z) e seu respectivo espectro de Fourier.

Os gráficos das Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 ilustram, respectivamente, os resultados obtidos para as amostras de 21mg, 11,3mg e 2,5mg. Nestes gráficos são mostrados a medida de ressonância ponto-a-ponto, o sinal da amostra pulsada e seu respectivo

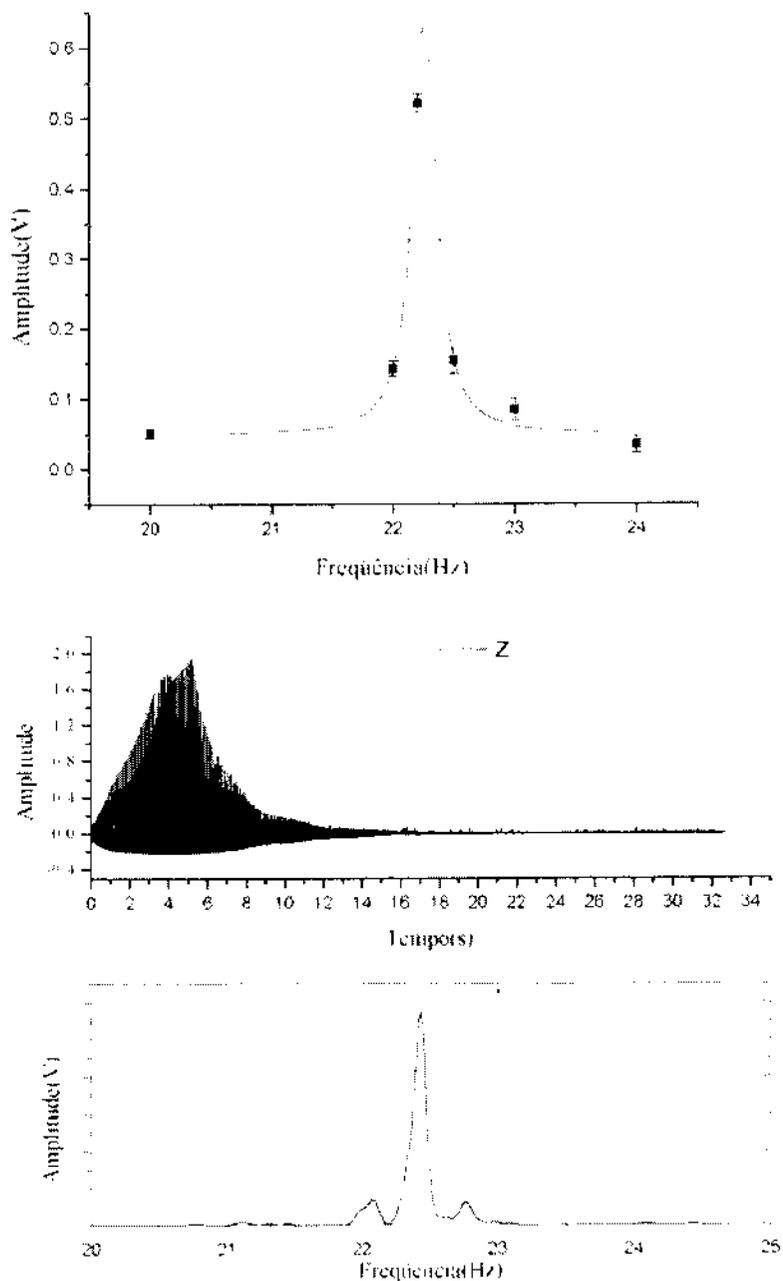


Figura 4.17: Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 33mg. $F_r = 22,25\text{Hz} \rightarrow \text{Pulso aplicado} = 5,6\text{s}$.

espectro de Fourier. Note que o espectro de Fourier reproduz o gráfico para a medida de F_r ponto-a-ponto.

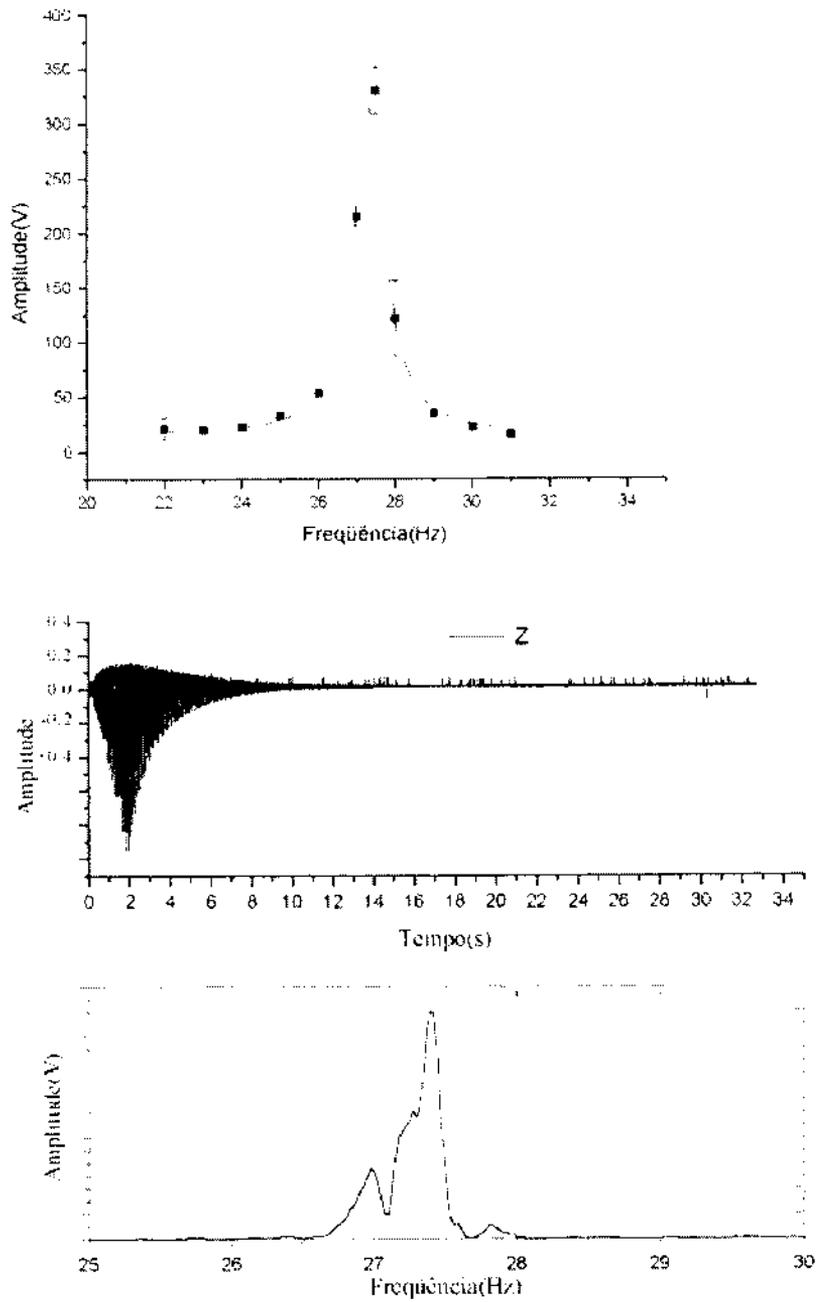


Figura 4.18: Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 21mg. $F_r = 27,316Hz \rightarrow Pulso\ aplicado = 2s$.

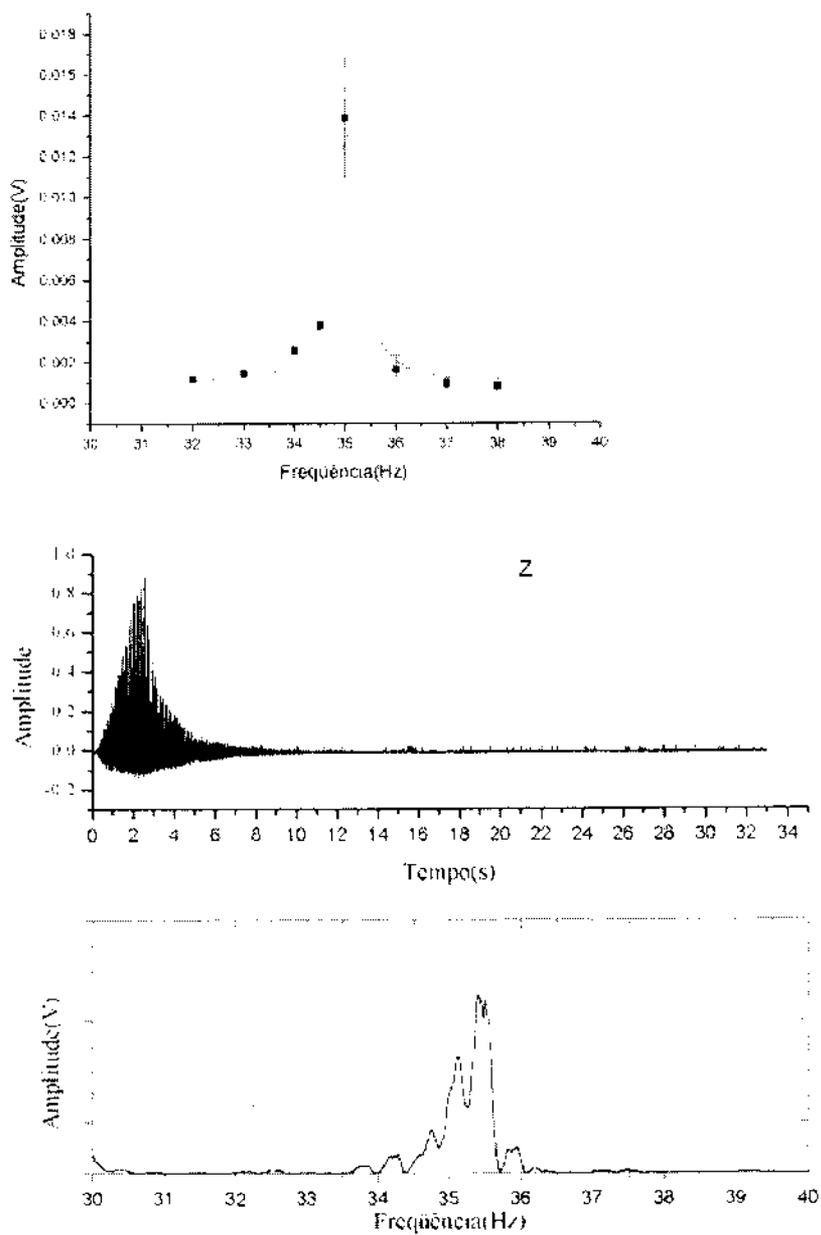


Figura 4.19: Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 11.3mg. $F_r = 35.03\text{Hz} \rightarrow \text{Pulso aplicado} = 2,4\text{s}$.

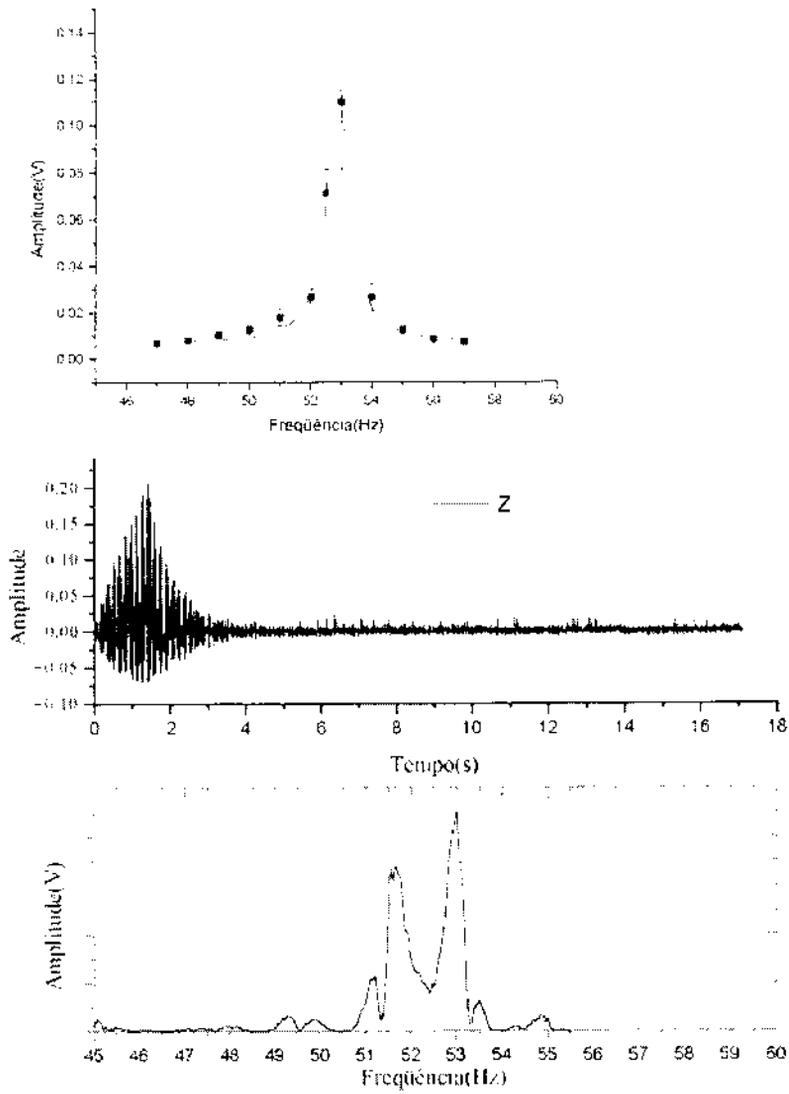


Figura 4.20: Técnica de aplicação de sinal pulsado em amostra de 2.5mg. $F_r = 52.89\text{Hz} \rightarrow \text{Pulso aplicado} = 1.8\text{s}$.

4.4.2 Efeitos da redução da largura do pulso

Seja $x(t)$ um sinal dado por

$$x(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \tau/2 \\ 0, & |t| > \tau/2 \end{cases}$$

Este é um sinal de pulso retangular, ilustrado na Figura 4.21(a). Sua transformada de Fourier será

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$X(f) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} Ae^{-j2\pi ft} dt$$

$$X(f) = A\tau \frac{\text{sen}\pi f\tau}{\pi f\tau}$$

Desta maneira, $X(f)$ tem a forma de $(\text{sen}\phi)/\phi$, função mostrada na Figura 4.21(b).

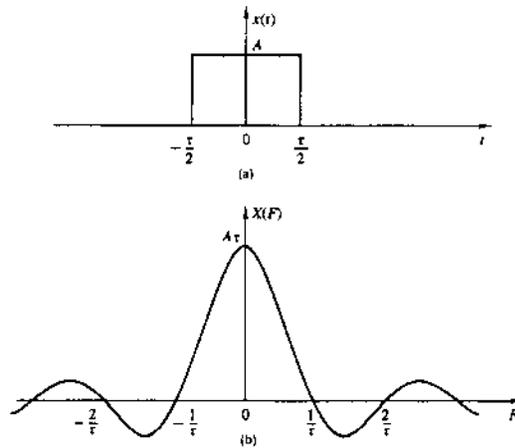


Figura 4.21: (a) Pulso retangular e (b) sua transformada de Fourier.

Da equação anterior e da Figura 4.21(b), notamos que o cruzamento em zero de $X(f)$ ocorre em múltiplos de $1/\tau$. Além disso, a largura do lóbulo principal, que contém a maior parte de energia do sinal, é igual a $2/\tau$. Portanto, à medida que a duração do pulso τ diminui, o lóbulo principal torna-se maior e mais energia é movida para as

freqüências mais elevadas, como ilustrado na Figura 4.22. Em outras palavras, quanto menor a largura do pulso aplicado à amostra, maior será a informação no espectro de Fourier. As Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26 demonstram o efeito da redução da largura do pulso para as amostras de 33mg, 21mg, 11,3mg e 2,5mg respectivamente.

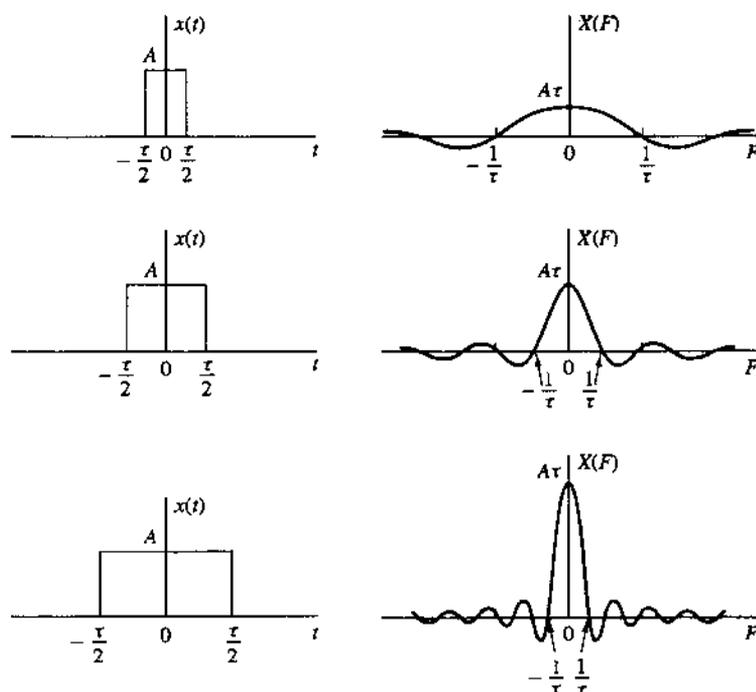


Figura 4.22: Transformada de Fourier de um pulso retangular para vários valores de largura.

Uma vez que a diminuição da largura do pulso resulta em um acréscimo de informação no espectro de Fourier, esta técnica nos permite observar não apenas a freqüência fundamental do sinal, mas também as freqüências referentes a outras oscilações do sistema. Por exemplo, nos gráficos da Figura 4.23, um pulso de duração igual a 5,6s é aplicado, obtendo-se um sinal limpo, isto é, a amostra vibra e, em seguida, relaxa completamente. Na aplicação de um pulso menor igual a 1,28s, é possível observar os “batimentos” da haste, possivelmente resultantes de seus diferentes modos de vibração. O espectro de Fourier é expandido, fornecendo informações não presentes na técnica de medida ponto-a-ponto, como a detecção de diferentes freqüências contidas no sinal.

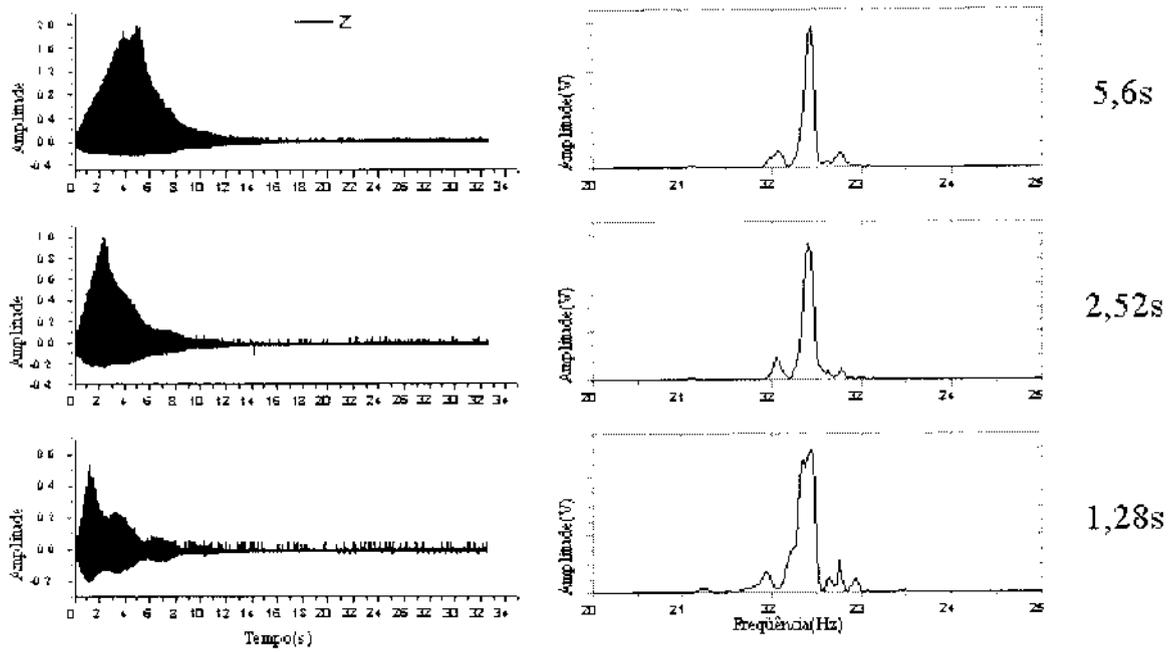


Figura 4.23: Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 33mg.

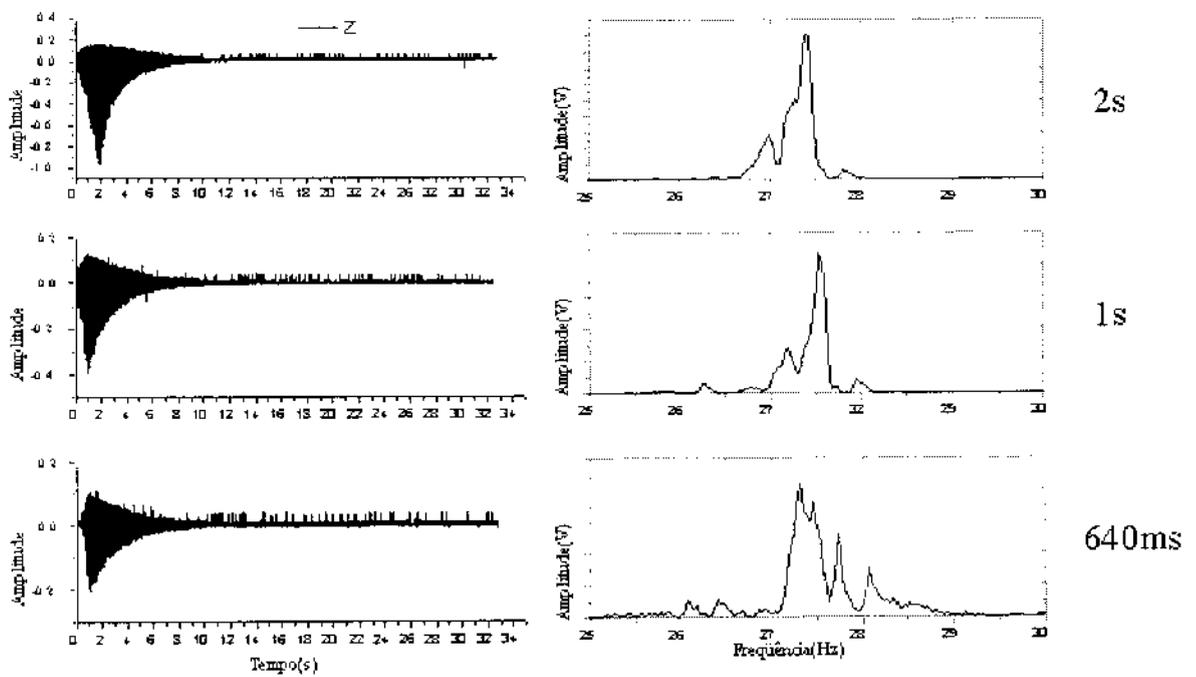


Figura 4.24: Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 21mg.

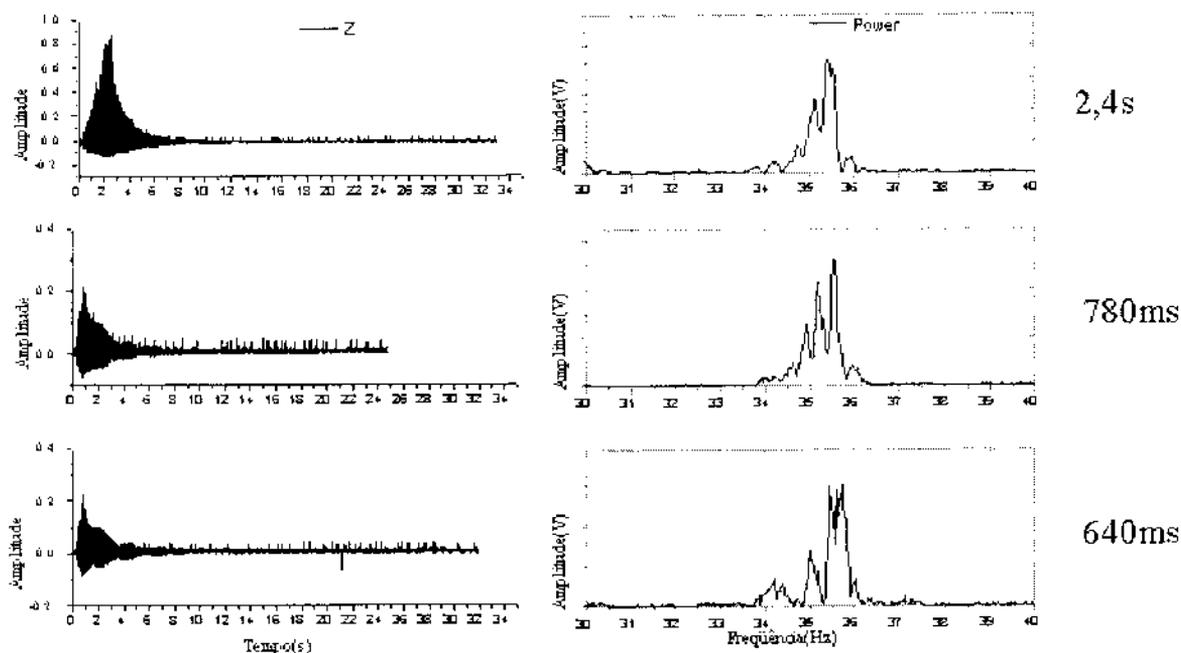


Figura 4.25: Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 11,3mg.

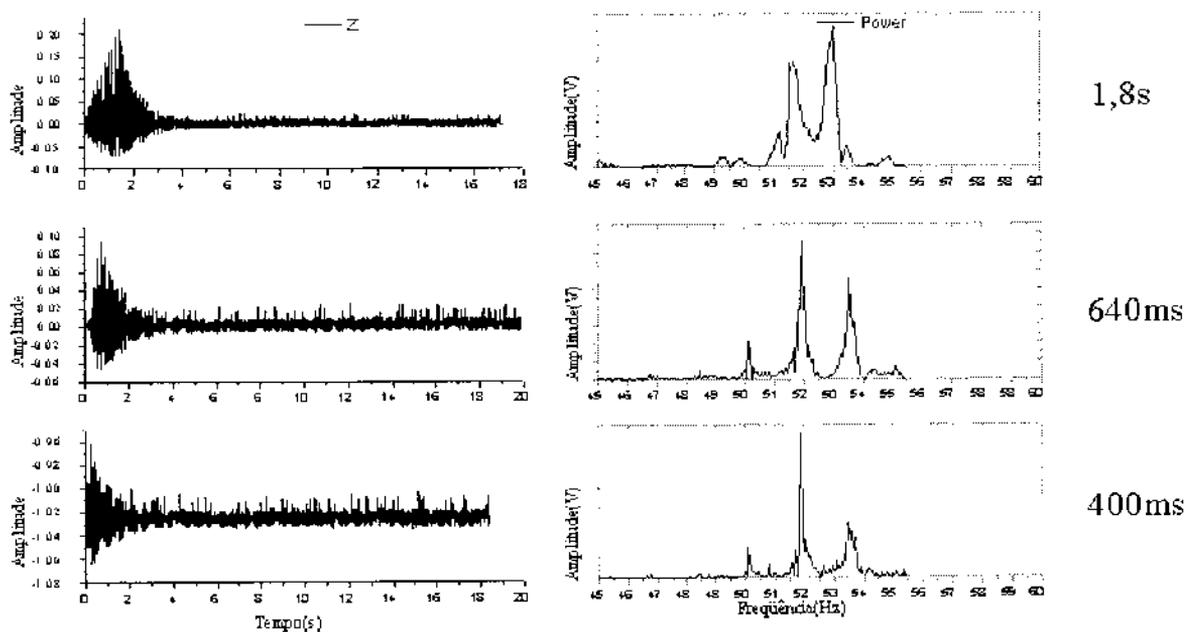


Figura 4.26: Efeito da diminuição da largura do pulso para amostra de 2,5mg.

4.5 Propostas

4.5.1 Detecção de ruído

Uma proposta de aplicação interessante para esta montagem experimental seria um protótipo detector de ruído ao redor do sensor. Se uma amostra magnetizada, presa a uma haste, oscila, continuamente, acima do sensor, como descrito anteriormente, ele detecta o campo gerado por esta amostra. Ao se provocar um tremor sobre a bancada de medidas temos uma oscilação não característica do sinal aplicado, esta oscilação “estranha” pode ser caracterizada como ruído externo. Em outras palavras, este exemplo de aplicação faz do sensor magnético um aparelho de detecção de movimentos sísmicos, ou sismógrafo. A Figura 4.27 mostra um exemplo de tal sinal, onde um pequeno tremor sobre a bancada, como uma leve pancada, causa um ruído perceptível.

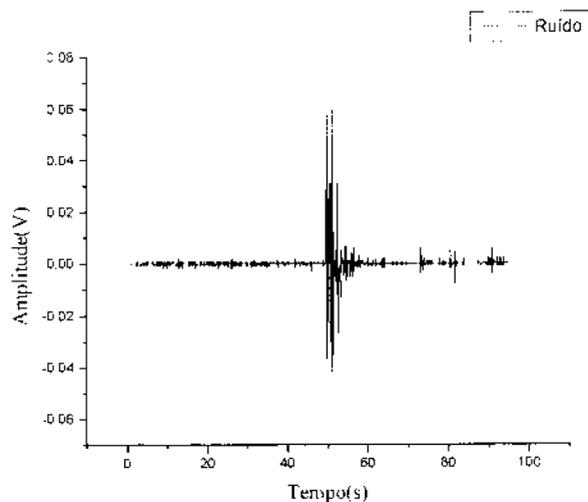


Figura 4.27: Detecção de ruído provocado sobre a bancada.

Para obtermos este sinal foram realizadas as seguintes etapas:

- Um sinal senoidal de 1Hz, por exemplo, é aplicado à amostra que obteve os melhores resultados na seção anterior, neste caso, a amostra de massa igual a 33mg;

- O sinal obtido é filtrado pelo programa, permitindo somente a passagem de frequências de, no máximo, 1 Hz;
- Um pequeno tremor é provocado na bancada de medidas;
- O sinal filtrado é subtraído do sinal da amostra;
- Obtém-se o ruído sobre a bancada.

4.5.2 Mapeamento magnético

Um outro exemplo de possível evolução para este equipamento seria o seu uso no mapeamento magnético de grandes áreas. Para isto uma interface do circuito que controla o sensor com um GPS deverá ser construída, assim seria obtido a posição geográfica e o campo magnético associado à mesma.

Uma sugestão seria o mapeamento magnético em terrenos de rotas de migrações da formiga *Pachycondyla marginata*³ [36], cujos movimentos da colônia são orientados pelo campo geomagnético.

4.5.3 Sensores de movimento e detecção de partículas magnéticas

Sensor de movimento e/ou presença constitui uma aplicação importante para este protótipo. A montagem experimental, descrita anteriormente, pode ser simplificada prendendo-se a haste com a amostra a um suporte no solo, de forma que a amostra esteja posicionada acima do sensor magnético. O sensor irá medir o campo magnético da amostra produzindo um sinal constante no tempo. Se o equipamento estiver localizado próximo a uma porta, a presença de uma pessoa poderá ser detectada pelo sensor seja devido ao movimento de ar produzido pela porta, ou pela detecção de ondas no solo provocadas pelos passos da pessoa. Desta maneira, um alarme pode ser implementado ao programa de controle.

³A formiga *Pachycondyla marginata*, estudada neste Centro, tem a presença de óxidos magnéticos de ferro na cabeça e no abdômen.

Esta idéia pode ser expandida posicionando o sensor numa ponte, podendo-se assim, medir sua freqüência de oscilação bem como que tipo de oscilação um determinado veículo pode provocar sobre ela.

Uma outra aplicação seria a detecção de partículas magnéticas em fluidos ou mesmo em alimentos e medicamentos, constituindo um equipamento de suma importância no controle de qualidade nas indústrias destes itens.

Conclusão

Neste trabalho foi implementado o sensor magnético da Honeywell HMC2003, com capacidade de leitura tridimensional simultânea, e mecanismo de medidas de campo baseado no fenômeno de magnetoresistência gigante. Através deste sensor, campos inferiores a 2Gauss foram detectados com uma resolução de $40\mu\text{Gauss}$.

Foram realizados testes de calibração e sensibilidade ao longo dos eixos x , y e z , sendo construídos, para o primeiro teste, solenóides de diferentes tamanhos e, utilizado no segundo, um conjunto de bobinas de *Helmholtz*. Os gráficos resultantes comprovaram as características do sensor. O aumento linear da corrente no solenóide, resultou em uma resposta também linear, até o limite de saturação do sensor. No teste de sensibilidade dos eixos, os resultados também comprovaram esta característica importante, onde, por exemplo, no teste do eixo z , a curva resultante foi linear, enquanto que as medidas para x e y foram aleatórias.

Um vez obtidos resultados positivos nos primeiros testes, foi possível mapear o campo magnético ao redor de um solenóide, demonstrando a possibilidade do uso do sensor em mapeamentos de campos estáticos. É importante ressaltar a importância da característica de tridimensionalidade nas medidas do sensor em tal aplicação.

Fazendo-se necessário o interfaceamento entre sensor e computador, foi desenvolvido um programa de controle e aquisição de dados, em linguagem *LabView*, utilizando uma porta paralela. Este programa controla a aplicação de pulsos *set/reset* no sensor antes de serem feitas as conversões. Também controla o conversor AD974, adquirindo os dados, convertidos na forma digital, e armazenando-os para o ajuste e verificação de sinal do campo medido. Desta forma, o programa de controle obteve gráficos de

resposta do sensor à aplicação de um sinal contínuo ou pulsado.

Uma montagem experimental foi construída para testar a sensibilidade do sensor a campos AC. Nesta montagem, um sinal aplicado a um alto-falante faz vibrar um haste de vidro que tem, em sua extremidade, uma amostra magnetizada posicionada acima do sensor. Os dados foram lidos pelo sensor, coletados e armazenados pelo programa, podendo, em seguida, serem analisados. Este sinal pôde ser modulado (senoidal, quadrado, etc.), ou não, em amplitude.

Respeitando o teorema de *Nyquist*, - em que a frequência de amostragem de um sinal deve ser, no mínimo, duas vezes maior que a máxima frequência que compõe este sinal - a aplicação de frequências muito baixas, como 1Hz, por exemplo, requereram frequências de amostragem também baixa. Nestas frequências, a possibilidade de ruído do sinal foi maior, e a leitura do sinal requereu uma “média” para cada ponto medido. Em outras palavras, a cada 100ms, por exemplo, foram feitas 100 medidas de campo e, destas, feita a média, marcando um ponto no gráfico. Esta técnica permitiu a redução de ruídos externos, resultando em gráficos mais nítidos. A leitura de sinais de frequências altas requereu médias proporcionalmente menores.

O sistema, *haste + amostra* possui frequência característica e, portanto, frequência de ressonância própria. Foram utilizadas amostras de diferentes massas e, a cada sistema, aplicado um intervalo de frequências, obtendo-se gráficos de resposta do sensor na ressonância de cada um deles, medidas ponto-a-ponto e utilizando a técnica de sinal pulsado. Os gráficos $F_r \times m_{amostra}$ mostraram curvas de ressonância para estes sistemas, e revelaram a dependência linear $massa \leftrightarrow frequência$. Na técnica de sinal pulsado foi aplicada ao sistema um pulso de duração $\Delta\tau \approx 1/\Delta f$ (Δf é o intervalo de frequências que faz o sistema vibrar), permitindo que o sistema relaxasse em seguida por, no mínimo, $5 \times \delta\tau$. Obteve-se, então, a resposta do sistema a partir do espectro de Fourier. Ao se reduzir a largura do pulso aplicado à amostra, foi obtido o efeito esperado, a informação no espectro de Fourier foi ampliada.

Existe um problema de *offset* no sensor utilizado, ainda não resolvido. Este problema altera a amplitude do campo e compromete as aplicações referentes à mapeamento,

mas não as aplicações propostas que requerem apenas a variação do campo. Para resolver este problema seria necessário aplicar uma fonte de corrente aos pinos de *offset* do sensor e ajustar o valor da corrente fornecida de modo a zerar o campo ambiente.

Como perspectivas futuras, esta tese deixa a proposta de aplicação do sensor na detecção de ruído, fazendo deste um detector de movimentos sísmicos, ou sismógrafo, onde é utilizada a montagem descrita anteriormente. Um tremor provocado sobre a bancada de medidas resulta uma oscilação não característica do sinal aplicado. esta oscilação é detectada como o ruído.

Ainda propondo uma interessante aplicação, este sensor constitui ferramenta de suma importância no mapeamento magnético de grandes áreas, utilizando um GPS a fim de obter a posição geográfica e o campo magnético associado, não podendo esquecer que é possível o mapeamento de ordem tridimensional desta área.

Apêndice A

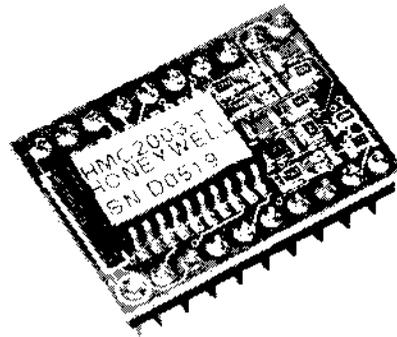
O Sensor HMC2003

APPLICATIONS

- Compassing
- Navigation Systems
- Attitude Reference
- Traffic Detection
- Proximity Detection
- Medical Devices

Three-Axis Magnetic Sensor Hybrid

HMC2003



A complete 3-axis magnetometer with analog output in a 20-pin hybrid DIP package. Uses Honeywell's sensitive HMC1001 and HMC1002 MR sensors and precision instrumentation amplifiers to measure x, y and z axes. Patented integral field straps are accessible for applying offset fields or closed loop operation.

FEATURES AND BENEFITS

Small Cost Effective Package	DIP-20 footprint (1 in. x .75 in.) allows easy insertion into system-level boards, reducing development costs.
Solid State	All components are solid state, improving reliability and ruggedness compared to mechanical fluxgates.
Wide Dynamic Range	Accurately measures fields from 40 micro-gauss to ± 2 gauss at 1V/gauss. Low noise instrumentation amplifiers with 1kHz low pass filters, reject unwanted noise. There are no flux concentrators used in this design that can lead to hysteresis and non-repeatability.
Internal Reference	An externally accessible +2.5V reference improves measurement accuracy and stability. An on-board excitation current source reduces temperature errors and regulates the power supply input.
Offset and Set/Reset Straps	Magnetic field offsets or closed loop circuits can be applied using the built-in straps. Output signal accuracy may be enhanced by using the integral set/reset straps.
Non-Magnetic Material	All components are especially selected and packaged in nonmagnetic material to reduce magnetic distortion and offsets.

HMC2003

GENERAL DESCRIPTION

Honeywell's three-axis magnetic sensor hybrid uses three permalloy magnetoresistive transducers and custom interface electronics to measure the strength and direction of a magnetic field. These transducers are sensitive to magnetic fields along the length, width, and height (x, y, z axis) of the 20-pin dual-in-line hybrid. Fields can be detected less than 40 microgauss and up to ± 2 gauss. Analog outputs are available for each x, y, z, axis from the hybrid. With the sensitivity and linearity of this hybrid, changes can be detected in the earth's magnetic field to provide compass headings or attitude sensing. The high bandwidth of this hybrid allows anomaly detection of vehicles, planes and other ferrous objects at high speeds.

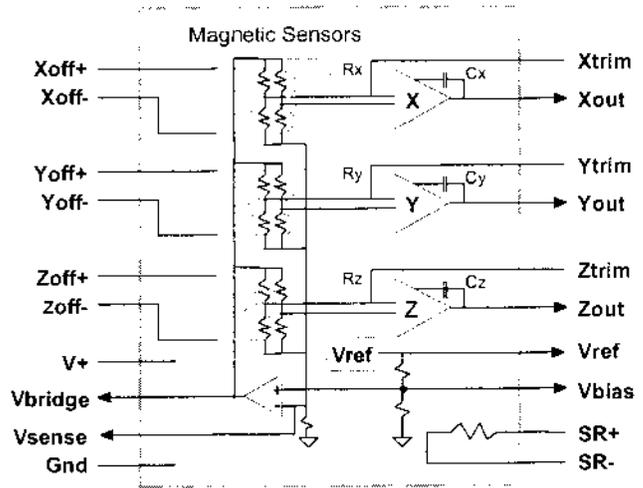
The hybrid is packaged on a small board (1 in. x 0.75 in.) and has an on-chip voltage reference that operates from a single 6 to 15 V supply. The hybrid is ideal for applications that require two- or three-axis magnetic sensing and have a very tight size constraint and/or have their own electronics and only need a magnetic transducer front-end.

Integrated with the transducer bridge circuit is a magnetically coupled strap that replaces the need for external coils and provides various modes of operation. The Honeywell patented field offset straps (Xoff+ and Xoff-, etc.) can be used to electrically apply a magnetic field to the bridge to buck, or offset an applied field. This technique can be used to cancel unwanted ambient magnetic fields or in a closed loop field nulling measurement circuit. The offset straps

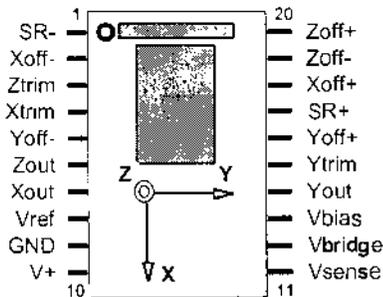
nominally provide a 1 gauss field along the sensitive axis per 48 mA of offset current through it.

Magnetic transducers can be affected by high momentary magnetic fields that may lead to output signal degradation. In order to eliminate this effect, and maximize the signal output, a magnetic switching technique can be applied to the bridge using the SR+ and SR- pins that eliminates the effect of past magnetic history. Refer to AN-201 for applications information on Set/Reset operation.

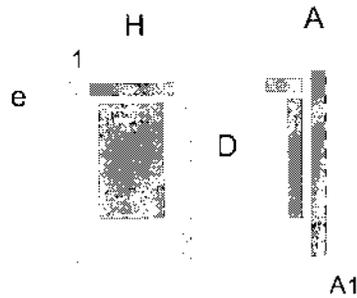
CIRCUIT DIAGRAM



PINOUT DIAGRAM

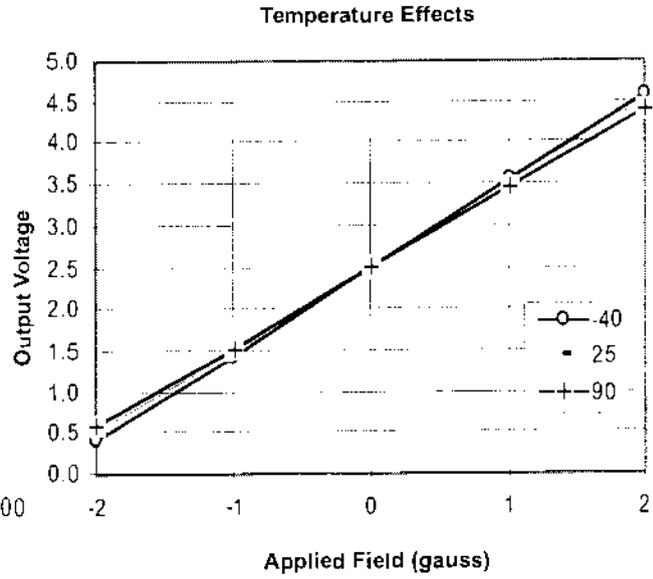
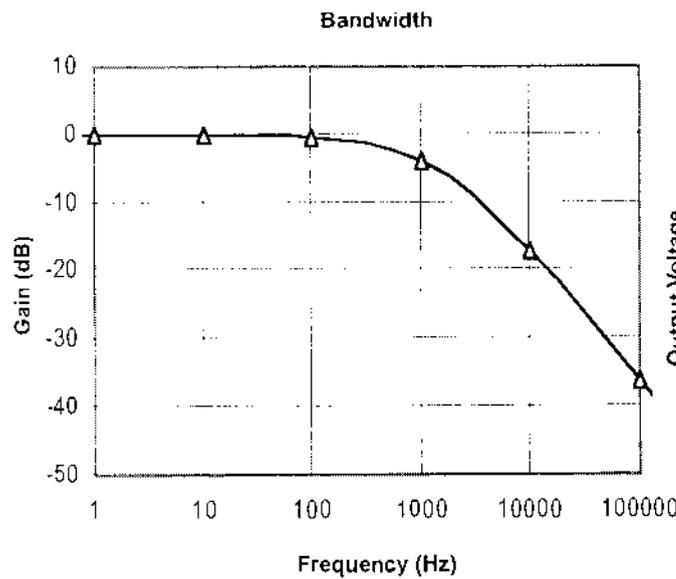
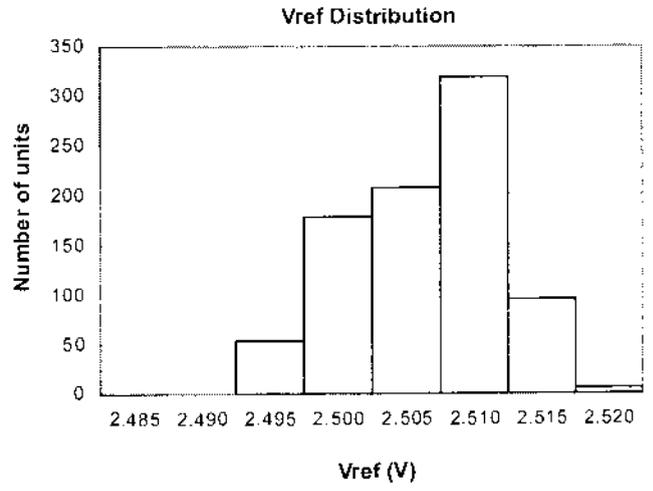
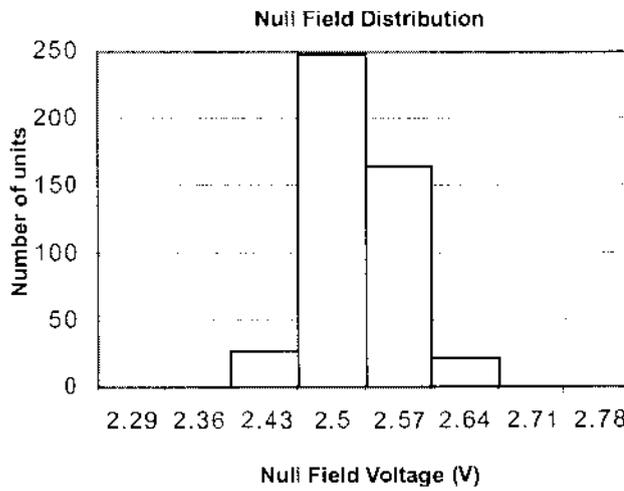
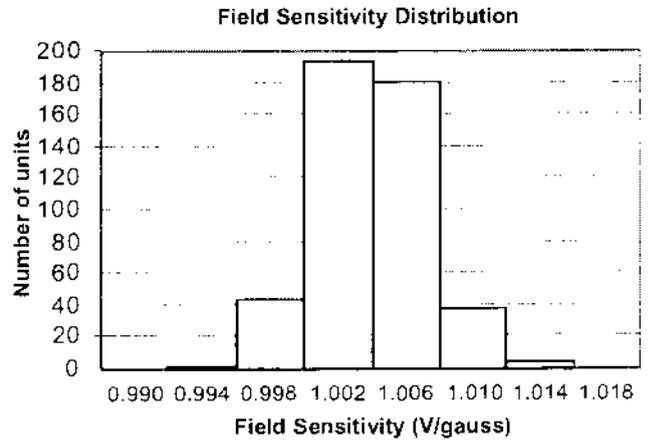
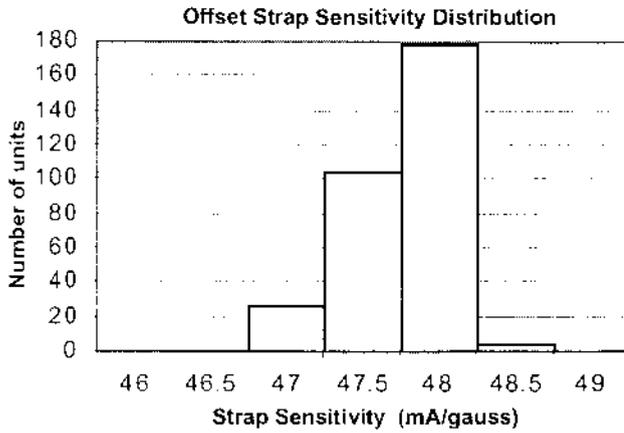


PACKAGE DRAWING



Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	11.43	12.45	0.45	0.49
A1	4.06	5.08	0.16	0.20
D	25.91	26.92	1.02	1.06
e	2.41	2.67	0.095	0.105
H	18.03	19.05	0.71	0.75

KEY PERFORMANCE DATA



SPECIFICATIONS

Characteristic	Conditions ⁽¹⁾	Min	Typ	Max	Units ⁽²⁾
Supply Voltage ⁽³⁾		6		15	VDC
Supply Current				20	mA
Field Range		-2		2	gauss
Output Voltage		0.5		4.5	V
Resolution			40		µgauss
Bandwidth			1		KHz
Field Sensitivity		0.98	1	1.02	V/gauss
Null Field Output		2.3	2.5	2.7	V
Linearity Error	±1 gauss Applied Field Sweep		0.5	2	%FS
Linearity Error	±2 gauss Applied Field Sweep		1	2	%FS
Hysteresis Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.05	.1	%FS
Repeatability Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.05	.1	%FS
Offset Strap Resistance				10.5	Ω
Offset Strap Sensitivity		46.5	47.5	48.5	mA/gauss
Offset Strap Current				200	mA
Set/Reset Strap Resistance				6	Ω
Field Sensitivity Tempco			-600		ppm/° C
Null Field Tempco	Set/Reset not used		±400		ppm/° C
Null Field Tempco	Set/Reset used		±100		ppm/° C
Storage Temperature		-55		125	° C
Operating Temperature		-40		85	° C
Shock			100		g
Vibration			2.2		g rms
Power Supply Effect (shifts in Null Field Offset or Sensitivity)	Power Supply varied from 6 to 15VDC with ±1 gauss Applied Field sweep			0.1	%FS

(1). Unless otherwise stated, test conditions are as follows: power supply = +12VDC, ambient temp = 25°C, Set/Reset switching is active.

(2). Units: 1 gauss (G) = 1 Oersted (in air), 1G = 79.58 A/m, 1G = 10E-4 Tesla, 1G = 10E5 gamma.

(3). Transient protection circuitry should be added across V+ and Gnd if an unregulated power supply is used.

Honeywell reserves the right to make changes to any products or technology herein to improve reliability, function or design. Honeywell does not assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit described herein; neither does it convey any license under its patent rights nor the rights of others.

Honeywell

Solid State Electronics Center
12001 State Highway 55
Plymouth, MN 55441
1-800-323-8295

E-Mail: clr@mn14.ssec.honeywell.com • <http://www.ssec.honeywell.com>
900151 Rev C 10-97

Helping You Control Your World

Apêndice B

Unidades no Magnetismo

São aqui descritas as conversões de unidades CGS e SI no magnetismo [37]. O Sistema Internacional (SI), foi estabelecido por convenção internacional em 1960, na 11ª Conferência Internacional de Pesos e Medidas (CGPM).

As unidades SI estão divididas em três classes:

- Unidades de base
- Unidades derivadas
- Unidades suplementares

As unidades de base são: metro (m), quilograma (kg), segundo (s), ampère (A), kelvin (K), mol (mol) e candela (cd).

O ampère é a unidade básica de corrente elétrica. É a corrente que percorrendo dois condutores paralelos de comprimento infinito e seção reta desprezível, separados por uma distância de 1m no vácuo, produz entre eles uma força de $2 \times 10^{-7} N$ por metro de comprimento.

Entre as unidades derivadas de interesse para o magnetismo, e que têm um nome especial, temos:

- weber (Wb): unidade de fluxo magnético
- henry (H): unidade de indutância (equivalente a $Wb A^{-1}$)

- tesla (T): unidade de densidade de fluxo magnético (equivalente a Wb m^{-2})

Note que o campo \mathbf{H} (intensidade de campo magnético) não tem uma unidade com nome específico; é medido em ampères por metro (A m^{-1}).

A indução magnética ou densidade de fluxo magnético \mathbf{B} é medida em tesla (T) e se relaciona com a intensidade de campo magnético \mathbf{H} (unidade: ampère por metro) através da permeabilidade magnética do vácuo μ_0 , constante que vale $4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ no SI. A relação correspondente no CGS envolve explicitamente a constante 4π .

As relações em \mathbf{B} e \mathbf{H} nos dois sistemas são:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \text{ (SI)}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \text{ (CGS)}$$

Esta última com \mathbf{B} em Gauss (G) e \mathbf{H} em Oersted (Oe) no CGS.

A magnetização \mathbf{M} de um material, que é definida como o momento magnético total por unidade de volume, é medida em A m^{-1} . A mesma idéia física é expressa pela polarização $\mathbf{J} = \mu_0\mathbf{M}$, medida em teslas (T). Nos textos de engenharia, a polarização é usada de preferência à magnetização.

Na literatura de magnetismo encontram-se freqüentemente resultados em unidades CGS.

As relações mais úteis para a conversão de unidades CGS para o SI são:

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$1 \text{ Oe} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A m}^{-1} \approx 80 \text{ A m}^{-1}$$

$$1 \text{ emu g}^{-1} = 1 \text{ J T}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$

Note que 'emu', não é propriamente um nome de unidade; designa 1 erg Gauss^{-1} .

A permeabilidade magnética relativa μ_r de um meio é adimensional, e é definida como a razão entre a permeabilidade μ do meio e a permeabilidade do vácuo μ_0 :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

A permeabilidade relativa do meio μ_r é medida pelo mesmo número no SI e no CGS. Sua relação com a suscetibilidade $\chi = M/H$, no entanto, é diferente nos dois sistemas:

$$\mu_r = 1 + \chi \text{ (SI)}$$

$$\mu_r = 1 + 4\pi\chi \text{ (CGS)}$$

As expressões diferem porque os valores das suscetibilidades são diferentes nos dois sistemas:

$$\chi_{SI} = 4\pi\chi_{CGS}$$

Os fenômenos magnéticos são observados na natureza tanto no mundo microscópico das partículas elementares como entre objetos na escala astronômica. A tabela *B.1* descreve valores do campo B em tesla, associados a diferentes fontes [37].

Origem/Local	\mathbf{B} (em T)
Cérebro	10^{-12}
Disco galáctico	10^{-10}
Coração	10^{-10}
Terra	10^{-4}
Manchas solares	10^{-1}
Ímãs permanentes	10^{-1}
Estrelas tipo Ap	1
Eletroímãs	1
Bobina supercondutora	1 – 10
Núcleo de Fe metálico	30
Estrelas anãs brancas	$\leq 10^1$
Estrelas de nêutrons	10^8

Tabela B.1: Valores do campo B associados a diferentes fontes.

A tabela B.2 descreve as grandezas magnéticas e suas unidades. Para obter os valores das grandezas no SI, os valores correspondentes do CGS devem ser multiplicados pelos fatores de conversão.

Grandeza	Símbolo	CGS	SI	Fator de convers
Indução magnética	B	G	T	10^{-4}
Intensidade de campo magnético	H	Oe	A/m	$10^3/4\pi$
Magnetização	M	$ergG^{-1}cm^{-3}$ ou emu/cm^3	A/m	10^3
Polarização magnética	J	—	T	—
Momento magnético	m	$ergC^{-1}(\equiv emu)$	$J/T(\equiv Am^2)$	10^{-3}
Magnetização específica	σ	$emug^{-1}$	Am^2kg^{-1} $(\equiv JT^{-1}kg^{-1})$	1
Fluxo magnético	ϕ	Mx (maxwell)	Wb(weber)	10^{-8}
Densidade de energia magnética	E	$ergcm^{-3}$	Jm^{-3}	10^{-1}
Fator de desmagnetização	N_d	—	—	$1/4\pi$
Suscetibilidade (volume)	χ	—	—	4π
Suscetibilidade por massa	χ_g	$ergB^{-1}g^{-1}Oe^{-1}$ ou $emug^{-1}Or^{-1}$	m^3kg^{-1}	$4\pi \times 10^{-3}$
Suscetibilidade molar	χ_m	$emumol^{-1}Oe^{-1}$	m^3mol^{-1}	$4\pi \times 10^{-6}m^3mu$
Permeabilidade magnética	μ	GOe^{-1}	Hm^{-1}	$4\pi \times 10^{-7}$
Permeabilidade relativa	μ_r	—	—	1
Permeabilidade do vácuo	μ_0	GOe^{-1}	Hm^{-1}	$4\pi \times 10^{-7}$
Constante de anisotropia	K	$ergcm^{-3}$	Jm^{-3}	10^{-1}
Razão giromagnética	γ	$s^{-1}Oe^{-1}$	$mA^{-1}s^{-1}$	$4\pi \times 10^{-3}$

Tabela B.2: Grandezas Magnéticas e unidades.

Referências Bibliográficas

- [1] P. Tipler. *Física - Eletricidade e Magnetismo*. LTC, (1995).
- [2] O'Handley. *Magnetic Materials--Magnetism*. John Wiley & Sons, Inc., (2000).
- [3] S.M. Rezende. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. **22**(no. 3), setembro (2000).
- [4] William gilbert (1544-1603). [http : //es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/People/gilbert.html](http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/People/gilbert.html).
- [5] Física Net. História da física. [http : //fisicanet.terra.com.br/historia/historia-cronologia.asp](http://fisicanet.terra.com.br/historia/historia-cronologia.asp).
- [6] J.L. Simonds. *Phys. Today*, vol.**48**:p. 29-32, (1995).
- [7] Philip Ball. *Nature*, vol. **404**:p. 918-920, (2000).
- [8] L.M. Falicov. *Phys. Today*, pages p. 46-51, (1992).
- [9] M.N. Baibich; J.M. Broto; A. Fert; F.N. Van Dau; F. Petroff; P. Eitenne; G. Creuzet; A. Friederich and J. Chazelas. *Phys. Rev. Lett.* vol.**61**:2472-2475, (1988).
- [10] Honeywell SSEC. Three-axis magnetic sensor hybrid. [http : //www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmc2003.pdf](http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/hmc2003.pdf).
- [11] L. Seligman. *Eletrodeposição de Multicamadas Metálicas em Silício*. (Tese de Doutorado, UFSC, 2002).
- [12] A. Hellemans. *Science*, vol. **273**(no. 5277):p. 880-881, (1996).

- [13] S.S.P. Parkin; N. More and K.P. Roche. *Phys. Rev. Lett*, vol. **64**:p. 2304-2307, (1990).
- [14] F. Petroff; A. Barthelemy; D.H. Mosca; D.K. Lottis; A. Fert; P.A. Schroeder; W.P. Prati; R. Loloce and S. Lequien. *Phys. Rev. B*, vol. **44**:p. 5355, (1991).
- [15] E.P. Harrison; G.L. Turney and H. Rowe. *Nature*, vol. **135**:961, June 8 (1935).
- [16] M. Knobel and K.R. Pirota. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. **242**:p. 33.
- [17] J.G.S. Duque; A.E.P. Araujo; M. Knobel; A. Yelon and P. Ciureanu. *Applied Physics Letters*, vol. **83**(1):p. 99-101.
- [18] K.R. Pirota. *Magnetoimpedância Gigante em Fios e Filas Amorfos*. (Tese de Doutorado, Unicamp, 2001).
- [19] IBM. The giant magnetoresistive head: A giant leap for ibm research. [http : //www.research.ibm.com/research/gmr.html](http://www.research.ibm.com/research/gmr.html).
- [20] Brubeki Serviço e Ass. Técnica. [http : //www.brubeki.com.br](http://www.brubeki.com.br).
- [21] Industrial Instruments. [http : //www.turotest.com.br](http://www.turotest.com.br).
- [22] IFM Electronic Ltda. [http : //www.ifm - electronic.com](http://www.ifm-electronic.com).
- [23] Festo. [http : //www.festo.com](http://www.festo.com).
- [24] M.J. Caruso; T. Bratland; C.H. Smith and R. Schneider. *Honeywell Inc. Technical Articles*, Dez (1998).
- [25] J.E. Lenz. *Proceedings of the IEEE*, vol. **78**(no. 6):p. 973-989, June (1990).
- [26] J. Crangle. *Solid State Magnetism*. Edward Arnold. (1991).
- [27] P. Ripka. *Sensors and Actuators A*, vol. **33**:p. 129-141. (1996).
- [28] M.F. Lopes. *Gaussímetro Digital Tridimensional*. (Monografia de Iniciação Científica. UERJ. 2002).

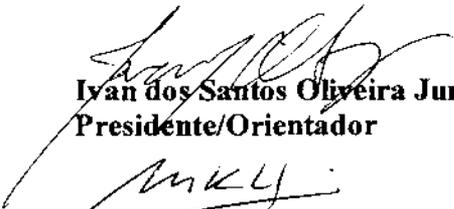
- [29] Gary W. Johnson. *LabView Graphical Programming: Practical Applications in Instrumentation and Control*. McGraw-Hill, Inc., (1994).
- [30] Robótica. <http://www.mrshp.hpg.ig.com.br/rob/paralela.htm>.
- [31] Analog Devices Inc. Data acquisition system ad974. http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/693498521.AD974_a.pdf. (1999).
- [32] J.G. Proakis and D.G. Manolakis. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall.
- [33] M.S. Reis Jr.; A.Y. Takeuchi; S.F. da Cunha e L.C. Sampaio. *Magnetômetro de haste ressonante - REED*. CBPF.
- [34] H. Zijlstra. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **41(8)**:p. 1241, (1970).
- [35] R.S. Sarthour; J.D. Bulnes; S.B. Belmonte; A.P. Guimarães e I.S. Oliveira. *Computação Quântica via Ressonância Magnética Nuclear*. (2002).
- [36] D.A. Avalos; D.M.S. Esquivel; E. Wajnberg; H.G.P.L. de Barros; P.S. Oliveira and I. Leal. *Naturwissenschaften*, vol. **88**(no. 10):p. 343-346.
- [37] A.P. Guimarães. *Magnetism and Magnetic Resonance in Solids*. John Wiley & Sons, Inc., (1998).
- [38] M. Knobel. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.s/n:p. 29-30, (2000).
- [39] Sick. http://www.sick.com.br/mg_sensores.htm.
- [40] E.F. Ferrari; F.C.S. da Silva and M. Knobel. *Phys. Rev. B*, 59(13):p. 29-30. April (1999).
- [41] E.F. Ferrari. *Magnetização e Magnetorresistência em Ligas Granulares*. (Tese de Doutorado. UEC, 1999).
- [42] M. Angelakeris; P. Pouloupoulos; O. Valassiades; N.K. Flevaris; D. Niarchos and A. Nassiopoulou. *Sensors and Actuators A*, vol. **91**:p. 180-183, (2001).

- [43] K. Ludwing; J. Hauch; R. Mattheis; K.U. Barholz and G. Rieger. *Sensors and Actuators A*, vol. **106**:p. 15-18, (2003).
- [44] J.C. Rife; M.M. Miller; P.E. Sheehan; C.R. Tamanaha; M. Tondra and L.J. Whitman. *Sensors and Actuators A*, vol. **107**:p. 209-218, (2003).
- [45] Metaltex. [http : //www.metaltex.com.br](http://www.metaltex.com.br).
- [46] C. Christides; I. Panagiotopoulos; D. Niarchos and G. Jones. *Sensors and Actuators A*, vol. **106**:p. 243-245, (2003).

“Implementação de um sensor de campo magnético baseado no fenômeno de Magnetoresistência Gigante”

Sarah dos Santos Rabelo

Tese de Mestrado Profissionalizante Instrumentação Científica apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas do Ministério da Ciência e Tecnologia fazendo parte da banca examinadora os seguintes professores:



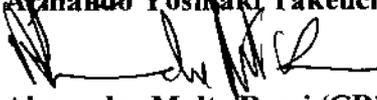
**Ivan dos Santos Oliveira Junior (CBPF)
Presidente/Orientador**



Marcelo Knobel (UNICAMP)



Armando Yoshitaki Takeuchi (CBPF)



Alexandre Malta Rossi (CBPF) - Suplente

Rio de Janeiro, 29 de março de 2004.