Universidade de São Paulo

Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto
Programa de Pós Graduação em Física Aplicada à Medicina e
Biologia.

Sensores Magnetoresistivos para Aplicações de Biomagnetismo.

Fabiano Miranda da Silva

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física Aplicada à Medicina e Biologia.

Ribeirão Preto, fevereiro de 2009.

Universidade de São Paulo

Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto
Programa de Pós Graduação em Física Aplicada à Medicina e
Biologia.

Sensores Magnetoresistivos para Aplicações de Biomagnetismo.

Fabiano Miranda da Silva

Orientador: Oswaldo Baffa Filho

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Física Aplicada à Medicina e Biologia.

Ribeirão Preto, fevereiro de 2009.

AGRADECIMENTOS.....	1
RESUMO.....	2
I-INTRODUÇÃO.....	6
I.1-Motivação	7
I.2-Objetivos.....	7
I.3-Prefácio.....	8
II Conceitos Básicos.....	10
II.1-Física dos sensores Magnetoresistivos	10
II.1.1-Introdução	10
II.1.2-Superparamagnetismo.....	10
II.2.3-Magnetoresistência Gigante.....	14
III.2 Concentradores de Fluxo magnético.	17
III.2.1 introdução	17
III.2.3 Modelo Paramagnético.	17
IV- MATERIAIS E MÉTODOS	21
IV.1-Sensor magnetoresistivo HMC 1001 fabricado pela Honeywell.	21
IV.2 Instrumentação do Sistema de aquisição	25
IV.2.1 Instrumentação contendo um único sensor	26
IV.2.2 Instrumentação do sistema com dezesseis sensores.....	32
V-RESULTADOS	49
V.1 Resultados das medidas do sistema de aquisição com único sensor	49
V.2 Resultados das medidas utilizando o sistema magnetorresistivo com dezesseis sensores.....	53
V.3 Resultados do concentrador de fluxo	55
V.3.1 Resultados das simulações computacional	55
V.3.2 Resultados Experimentais dos concentradores de Fluxo	60
VIII-CONCLUSÃO.....	67
APÊNDICES.....	72
1-Solução da integral do número de microestados	72
2-Solução da integral da magnetização resultante.....	73

ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 01: MOMENTO MAGNÉTICO RESULTANTE M , ONDE θ É O ÂNGULO COM O EIXO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO. SENDO O EIXO DE FÁCIL MAGNETIZAÇÃO DETERMINADO PELA ANISOTROPIA..... 11

FIGURA 02: CURVA DE MAGNETIZAÇÃO VERSUS CAMPO EXTERNO H APLICADO: A) SISTEMA DE PARTÍCULAS NO ESTADO BLOQUEADO, AS PARTÍCULAS POSSUEM UMA DIREÇÃO BEM DEFINIDA MESMO NA AUSÊNCIA DE H . B) SISTEMA SUPERPARAMAGNÉTICO, NA AUSÊNCIA DE H AS PARTÍCULAS NÃO POSSUEM UMA DIREÇÃO DEFINIDA, RESULTANDO EM UMA MAGNETIZAÇÃO NULA. À MEDIDA QUE H CRESCE A MAGNETIZAÇÃO AUMENTA ATÉ ATINGIR A SATURAÇÃO, H INDO A ZERO A MAGNETIZAÇÃO TAMBÉM VAI À ZERO. 14

FIGURA 03: REPRESENTAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA ATRAVÉS DE UMA MULTICAMADA DE FE-CR-FE. A) CONFIGURAÇÃO ANTIFERROMAGNÉTICA, MÁXIMA RESISTIVIDADE DEVIDO AO ESPALHAMENTO DOS ELÉTRONS DE CONDUÇÃO NA INTERFACE. B) O CAMPO H FORÇA OS MOMENTOS MAGNÉTICOS DOS ÁTOMOS DE FE A SE ALINHAREM NA MESMA DIREÇÃO, DIMINUINDO O ESPALHAMENTO E CONSEQÜENTEMENTE A RESISTIVIDADE..... 16

FIGURA 04: AS TRÊS PRIMEIRAS APROXIMAÇÕES PARA A FUNÇÃO DE LANGEVIN QUANDO $x \rightarrow 0$ 20

FIGURA 05: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SENSOR HMC1001 FABRICADO PELA HONEYWELL. À ESQUERDA PODEMOS VER O ARRANJO EM PONTE DE WHEATSTONE, À DIREITA VEMOS OS CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA O CONTROLE DO OFFSET E O SET/RESET DO DISPOSITIVO. FIGURA EXTRAÍDA DO “DATASHEET” DO FABRICANTE DO SENSOR HMC1001 DA HONEYWELL. 21

FIGURA 06: CAMPO MAGNÉTICO APLICADO VERSUS VOLTAGEM DE SAÍDA, TERMINAIS (5) E (8). FIGURA EXTRAÍDA DO “DATASHEET” DO FABRICANTE DO SENSOR HMC1001 DA HONEYWELL..... 22

FIGURA 07: REPRESENTAÇÃO DOS DOMÍNIOS MAGNÉTICOS DO FILME (PERMALLOY). A) OS MOMENTOS POSSUEM ORIENTAÇÃO RANDÔMICA. B) APÓS A APLICAÇÃO DO SET OS MOMENTOS SE ALINHAM EM UMA DETERMINADA DIREÇÃO. C) OS MOMENTOS INVERTEM DE DIREÇÃO APÓS A APLICAÇÃO DO RESET. FIGURA EXTRAÍDA DO “DATASHEET” DO FABRICANTE DO SENSOR HMC1001 DA HONEYWELL..... 23

FIGURA 08: TENSÃO DE SAÍDA NA PONTE VERSUS CAMPO MAGNÉTICO APLICADO. PODE-SE OBSERVAR QUE NÃO EXISTE HISTERESE PARA ESSA INTENSIDADE DE CAMPO MAGNÉTICO. FIGURA EXTRAÍDA DO “DATASHEET” DO FABRICANTE DO SENSOR HMC1001 DA HONEYWELL..... 24

FIGURA 09: DENSIDADE ESPECTRAL DE RUÍDO PARA O SENSOR. EXISTE UM RUÍDO DO TIPO $1/f^A$ PARA BAIXAS FREQUÊNCIAS. ACIMA DE 100 HZ TEMOS UMA RESPOSTA PRATICAMENTE PLANA E O LIMITE INFERIOR DE RUÍDO. 25

FIGURA 10: A PONTA DE PROVA É COMPOSTA PELO CF, O SENSOR HMC101, SUPORTE E CABO PARA AS LIGAÇÕES ELÉTRICAS. B) VISTA DA PONTA DE PROVA MONTADA.	26
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MESA XY, OBSERVAMOS QUE O SENSOR ESTÁ FIXO A MESA ATRAVÉS DE UM BRAÇO ACRÍLICO. A MESA DESLOCA A PONTA DE PROVA ATRAVÉS DA REGIÃO DE INTERESSE, A REGIÃO É DELIMITADA ATRAVÉS DA ESCOLHA DO NÚMERO APROPRIADO DE LINHAS E COLUNAS.	28
FIGURA 13: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROGRAMA DE AQUISIÇÃO.	29
FIGURA 14: VISTA DA TELA DO COMPUTADOR COM O PAINEL DE CONTROLE DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO.	30
FIGURA 15: REPRESENTAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA MAGNETORRESISTIVO, ONDE SIMBOLIZAMOS A SEQUÊNCIA DA LEITURA DOS SENSORES. ATUALMENTE O SISTEMA É CAPAZ DE FAZER A LEITURA DA MATRIZ SEIS VEZES POR SEGUNDO.	33
FIGURA 16: ESQUEMA ELÉTRICO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.	35
FIGURA 17: PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.	36
FIGURA 18: FONTE REGULADA DOS APLIFICADORES COM DOIS ESTÁGIOS DE REGULAGEM E SIMÉTRICA.	37
FIGURA 19: ESQUEMA ELÉTRICO E NUMERAÇÃO DOS CONECTORES DE ENTRADA E SAÍDA PARA OS AMPLIFICADORES DE UM A QUATRO.	38
FIGURA 20: ESQUEMA ELÉTRICO E NUMERAÇÃO DOS CONECTORES DE ENTRADA E SAÍDA PARA OS AMPLIFICADORES DE CINCO A OITO.	38
FIGURA 21: ESQUEMA ELÉTRICO E NUMERAÇÃO DOS CONECTORES DE ENTRADA E SAÍDA PARA OS AMPLIFICADORES DE NOVE A DOZE.	39
FIGURA 22: ESQUEMA ELÉTRICO E NUMERAÇÃO DOS CONECTORES DE ENTRADA E SAÍDA PARA OS AMPLIFICADORES DE TREZE A DEZESSEIS.	40
FIGURA 23: PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO COM DEZESSEIS SENSORES JUNTO COM A ETAPA REGULADORA DOS AMPLIFICADORES.	41
FIGURA 24: ESQUEMA ELÉTRICO DA MATRIZ QUE CONTEM DEZESSEIS SENSORES MR JUNTAMENTE COM OS RESPECTIVOS SET/RESET.	42
FIGURA 25: SUPERFÍCIE INFERIOR DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DA MATRIZ DOS SENSORES.	43
FIGURA 26: SUPERFÍCIE SUPERIOR DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DA MATRIZ DOS SENSORES.	43
FIGURA 27: DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES NA SUPERFÍCIE INFERIOR.	44

FIGURA 28: DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES NA SUPERFÍCIE SUPERIOR.	44
FIGURA 29: TELA DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS SINAIS ADQUIRIDOS PELOS SENSORES.	46
FIGURA 30: TELA DO SOFTWARE DE ANÁLISE DAS IMAGENS.	48
FIGURA 31: IMAGEM OBTIDA COM A PONTA DE PROVA QUASE ENCOSTADA NO SIMULADOR FÍSICO E SEM O USO DO FILTRO PASSA BAIXA	49
FIGURA 32: IMAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO PRODUZIDO POR UM PREGO IMANTADO, OS DOIS PÓLOS MAGNÉTICOS SÃO CLARAMENTE VISÍVEIS.	50
FIGURA 38: INTENSIDADE DE CAMPO MEDIDO PELO SENSOR COM E SEM CF.	56
FIGURA 39: A LINHA PONTILHADA INDICA MAGNETIZAÇÃO INDUZIDA NO CF DEVIDO AO CAMPO DE INDUÇÃO, H É VARIADO PELO MOVIMENTO DE UM PEQUENO IMÃ NA DIREÇÃO DO SENSOR, INDICADO PELA CURVA VERDE. PODEMOS OBSERVAR QUE A MAGNETIZAÇÃO CRESCE QUASE LINEARMENTE COM O CAMPO H, A NÃO LINEARIDADE SE ACENTUA ENTRE 4CM E 8CM.	57
FIGURA 41: CAMPO MAGNÉTICO MEDIDO PELO SENSOR COM E SEM CONCENTRADOR DE FLUXO CAUSADO PELA APROXIMAÇÃO DE TRÊS IMÃS DE DIFERENTES INTENSIDADES RESPECTIVAMENTE.	60
FIGURA 42: GANHO PARA O CF PEQUENO VERSUS DISTÂNCIA PARA TRÊS IMÃS DIFERENTES.	62
FIGURA 43: GANHO PARA O CF GRANDE VERSUS DISTÂNCIA PARA TRÊS IMÃS DIFERENTES.	63
FIGURA 44: A) MOSTRA A REPRODUTIBILIDADE ENTRE DUAS CURVAS QUAISQUER PARA O CF PEQUENO. B) PARA O CF GRANDE.	64
FIGURA 46: O DIPOLO FOI POSICIONADO A 4 CM ABAIXO DO SENSOR. A) MEDIDA FOI REALIZADA COM O CF GRANDE E EM B) SEM O CF.	66

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, diretamente ou indiretamente, agradeço cordialmente às seguintes pessoas e às agências governamentais CAPES, CNPq e FAPESP pelo apoio financeiro necessário à realização deste trabalho.

- A toda minha família que acreditou em minha competência e responsabilidade, principalmente minha mãe, que foi a primeira a compartilhar dessa minha busca de conhecimento.
- Ao Prof. Dr Oswaldo Baffa Filho, pela orientação, por toda a confiança e paciência que depositou em minha pessoa.
- As secretárias Nilza, Sônia, Rosângela e Gisele, pela amizade e dedicação.
- Ao técnico Lourenço Rocha que com muita dedicação e cuidado fez as montagens do sistema magnetorresistivo com dezesseis canais.
- A todos os outros amigos que, pelo espírito de companheirismo, apoiaram-me e me incentivaram no dia a dia.

Resumo

O laboratório de biomagnetismo tem realizado com sucesso estudos da motilidade gastrointestinal medindo tempos de trânsito e de esvaziamento de diferentes segmentos do trato gastrointestinal. Nesse estudo tanto a magnetização remanente como a susceptibilidade magnética de diferentes regiões do trato gastrointestinal são medidas. Os sensores magnetoresistivos serão utilizados para estudo de marcadores ferromagnéticos ou pequenos ímãs (aproximados por dipolos magnéticos) *in vitro*, que possibilitará em trabalhos futuros serem utilizados no estudo de marcadores magnéticos no trato gastrintestinal.

Neste trabalho testaremos a idéia de um concentrador de fluxo magnético, que seja capaz de aumentar a densidade de linhas de campo magnético na região próxima ao sensor.

Desenvolvemos a instrumentação de uma ponte de prova que contivesse um único sensor magnetorresistivo ligado a uma placa de condicionamento dos sinais. A ponta de prova foi utilizada para teste da eficiência dos concentradores de fluxo magnético e para fazermos varredura de regiões com o auxílio de uma mesa xy, com a finalidade de construir mapas densidade de campo magnético de dipolos estáticos no tempo.

Terminaremos o trabalho mostrando a possibilidade construir imagens de dipolos que se movem, desenvolvendo um sistema de aquisição dos sinais dos sensores em tempo real, será utilizando uma matriz com dezesseis sensores magnetorresistivos os sinais serão tratados e a imagem construída pelo método de interpolação matemática, este sistema abre a possibilidade para aplicação em trabalhos futuros no estudo da motilidade gastrointestinal medindo tempos de transito usando a técnica de

susceptibilidade magnética marcadores ferromagnéticos e também de dipolos permanentes sem a necessidade de campo externo aplicado.

Abstract

The biomagnetismo laboratory has carried through successfully studies of the gastrointestinal motilidade measuring times of transit and esvaziamento of different segments of the gastrointestinal treatment. In this study in such a way the residuary magnetization as the magnetic susceptibilidade of different regions of the gastrointestinal treatment is measured. The magnetoresistivos sensors will be used for study of ferromagnéticos markers or small magnets (approached for magnetic doublets) in vitro, that it will make possible in future works to be used in the study of magnetic markers in the gastrintestinal treatment. In this work we will test the idea of a concentrator of magnetic flow, that is capable to increase the density of lines of magnetic field in the next region to the sensor. We develop the instrumentation of a test bridge that contained an only on magnetorresistivo sensor to a plate of conditioning of the signals. The test tip was used for test of the efficiency of the concentrators of magnetic flow and to make sweepings of regions with it I assist of a table xy, with the purpose to construct to maps density of magnetic field of static doublets in the time. We will finish the work having shown the possibility to construct images of doublets that if move, developing a system of acquisition of the signals of the sensors in real time, will be

using a matrix with sixteen magnetorresistivos sensors the signals will be treated and the image constructed for the method of mathematical interpolation, this system opens the possibility for application in future works in the study of the gastrointestinal motilidade measuring times of also transits using the technique of magnetic susceptibilidade marking ferromagnéticos and of permanent doublets without the necessity of applied external field.

I-Introdução

Os sensores magnéticos são usados há pelo menos cinquenta anos, em sistemas de navegação e leitura de discos rígidos entre outras aplicações. Devido a grandes investimentos no estudo de Sistemas Nanoscópicos principalmente pela possibilidade de aplicação em Sistemas Computacionais, em 1986 Peter Grünberg na Alemanha constrói um dispositivo com duas camadas de ferro separadas por uma fina camada de cromo [Alexander Hellemans, 1996], foi observado que mantida constante a ddp entre as camadas de ferro mostrou ser possível variar a corrente com a aplicação de um campo Magnético externo, esse fenômeno foi chamado de Magnetoresistência Gigante (do inglês Giant MagnetoResistance ou GMR). Esta variação da resistividade com o campo magnético abriu novas possibilidades de aplicação na indústria eletrônica, principalmente na fabricação de sensores magnéticos, a partir do efeito GMR, e suas aplicações foram estendidas para a biologia, diagnósticos médicos, navegação e outros campos ainda por descobrir e investigar.

O primeiro objetivo de nosso trabalho está ligado aos aspectos técnicos da otimização da instrumentação bem como a busca de novos arranjos para o sistema de medida, iniciaremos construindo um sistema com um sensor magnetorresistivo e posteriormente exploraremos a possibilidade de formar imagens de dipolos magnéticos a partir de um conjunto de sensores magnetorresistivos que incluirá a construção de softwares para aquisição e reconstrução de imagens e softwares que sejam capazes de reproduzir as imagens adquiridas pelo software de aquisição.

Com o sistema usando um sensor magnetorresistivo trabalharemos a possibilidade de uso de um concentrador de fluxo magnético funcionando juntamente

com os sensores magnetorresistivos. De forma bem geral um concentrador de fluxo tem a propriedade de aumentar densidade das linhas de campo magnético em uma determinada região do espaço e conseqüentemente diminuir em outras. Nossa idéia é concentrarmos as linhas de campo magnético de uma região próxima aos sensores, para uma região menor, denominada região sensível do sensor. Para nosso modelo teórico supomos que na presença do CF uma parcela da medida indicada pelo sensor é referente à magnetização M_{CF} do CF, ou seja, para uma fonte que produz um campo H na direção sensível do sensor, este indicará $H + M_{CF}$.

1.1-Motivação

Estudos biológicos que apresentam interesses clínicos são: O estudo da motilidade gastrointestinal através da medida susceptométrica de alimentos de prova (substância marcada com um traçador ferromagnético), no interior da região de estudo (Miranda, 1995); a localização de objetos metálicos, como agulhas, balas, etc, no interior do corpo humano (Costa Monteiro *et al*, 2000), entre outros. O estudo da susceptometria gástrica pode ser feita com sensores magnéticos não supercondutores (bobinas de indução e sensores magnetorresistivos), desde que o marcador ferromagnético possua alta susceptibilidade magnética em concentração expressiva.

1.2-Objetivos

São nossos objetivos:

- Testar a idéia de um concentrador de fluxo magnético com a finalidade de aumentar a sensibilidade nos sensores magnetorresistivos.

- Instrumentar um sistema de medida contendo um único sensor magnetorresistivo HMC1001 em conjunto com uma mesa XY para teste de um concentrador de fluxo magnético e varredura de regiões contendo dipolos para que possamos observar as diferenças entre as medidas com e sem concentrador de fluxo magnético.
- Instrumentar um sistema de medida com um arranjo 4x4 formado por dezesseis sensores com o intuito de formar imagens de dipolos em tempo real.

1.3-Prefácio

A presente dissertação descreve alguns sistemas de medidas magnetorresistivos bem como a simulação computacional e construção dos concentradores de fluxo magnético.

No capítulo II descrevemos a física dos sensores magnetorresistivo

No capítulo III modelamos o funcionamento físico dos concentradores de fluxo magnéticos.

No capítulo IV em materiais e métodos descrevemos algumas características particulares dos sensores magnetorresistivos particular fabricado pela empresa Honeywell HMC1001.

No capítulo V descrevemos a instrumentação para um único sensor magnetorresistivo onde usaremos uma mesa XY para teste dos concentradores de fluxo magnético.

No capítulo VI delineamos a instrumentação do segundo sistema de aquisição com dezesseis sensores formando uma matriz 4x4.

Finalmente no capítulo VII comentaremos os resultados, primeiramente utilizando o sistema com um único sensor em conjunto com os testes dos concentradores de fluxo magnético.

No capítulo VIII comentaremos as conclusões gerais sobre o trabalho.

II Conceitos Básicos

II.1-Física dos sensores Magnetoresistivos

II.1.1-Introdução

Os Sensores Magnetoresistivos são formados por sistemas magnéticos nanoscópicos, estes são compostos por sólidos granulares que podem conter mais de uma fase magnética de diferentes tipos de materiais, os grãos estão no limite superparamagnético, que diz respeito ao tempo de relaxação do *momento magnético* resultante, estas partículas podem ser produzidas por diversos métodos, tais como: deposição por vapor, “sputtering” ou bombardeamento e “melt-spinning” (Cullity, Addison-Wesley, 1972) e (M.N. Baibich, 1988). A natureza das interações magnéticas entre os grãos determina o comportamento macroscópico do sistema, sendo este estudado através da função magnetização $\vec{M}$ e da Susceptibilidade Magnética χ a um campo de indução $\vec{H}$.

II.1.2-Superparamagnetismo

Vamos considerar as propriedades magnéticas de um sistema de partículas não interagentes com uma larga distribuição de tamanhos e formas, e com eixos de fácil magnetização distribuídos aleatoriamente. É suposto no superparamagnetismo que o momento magnético atômico no interior das partículas se mova coerentemente, o momento magnético total é representado por um vetor clássico de magnitude $\vec{\mu} = \vec{\mu}_{At}N$, onde $\vec{\mu}_{At}$ é o momento magnético atômico e N é o número de átomos magnéticos na partícula. De maneira simples, a direção do momento magnético é determinada por uma anisotropia uniaxial de origem magnetocristalina, ou

magnetoelástica. O tempo de relaxação, τ , é essencialmente o tempo para reverter o momento magnético de um estado de equilíbrio a outro.

Figura 01: Momento magnético resultante μ , onde θ é o ângulo com o eixo de fácil magnetização. Sendo o eixo de fácil magnetização determinado pela anisotropia.

Considerando agora uma única partícula com anisotropia uniaxial, a energia potencial E terá dois mínimos, na direção do eixo de fácil magnetização. Assim o momento magnético tem duas posições equivalentes do ponto de vista energético, mas para passar de uma região a outra é preciso ultrapassar uma barreira de energia potencial de altura KV . A energia potencial pode ser escrita como, (Cullity, Addison-Wesley, 1072).

$$E = KV \sin^2 \theta \quad (1)$$

K é a densidade de energia de anisotropia, V é o volume da partícula e Θ é o ângulo entre o vetor momento magnético e o eixo de fácil magnetização.

Os saltos de um mínimo a outro, em altas temperaturas são termicamente ativados, com frequência de saltos dada por , (Cullity, Addison-Wesley, 1972).

$$\nu = \tau_0^{-1} \exp\left(-\frac{KV}{K_B T}\right) \quad (2)$$

O tempo entre dois saltos é dado por:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{KV}{K_B T}\right) \quad (3)$$

O fator τ_0 pode ser determinado experimentalmente ou calculado através de modelos teóricos. O valor numérico de τ_0 está compreendido entre 10^{-9} e 10^{-10} segundos.

Então se diz que uma partícula é superparamagnética se, em uma dada temperatura, seu tempo de relaxação, for menor que o tempo necessário para realizar a medida. Se o tempo necessário para realizar a medida for maior que o tempo de relaxação, o momento magnético parece estar completamente livre, pois sofre diversas reversões durante a medida.

Matematicamente se $K_B T \gg E$, equivale a altas temperaturas ou pequenos volumes, τ tende a ser muito menor que o tempo característico de uma medida, e a partícula se encontra no estado superparamagnético. Por outro lado, se $K_B T \ll E$, τ pode ser maior que o tempo de observação, e a magnetização resultante aponta para uma única direção, então se diz que a partícula está no estado bloqueado.

É possível encontrar o volume crítico V_{crit} de uma partícula a uma temperatura T (ambiente T_0), por exemplo, se $\tau=100s$, é aproximadamente o tempo de realizar uma

medida de magnetização. Aproximando a equação (3) por uma série de Taylor obtemos quando $K_B T \gg E$.

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{KV_{crit}}{K_B T_0} + \dots \quad (4)$$

Então o volume crítico é:

$$V_{crit} = \frac{25K_B T_0}{K} \quad (5)$$

O volume crítico para que as partículas estejam no estado superparamagnético é diretamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto maior for a temperatura maior será o volume crítico para que a partícula seja superparamagnética.

É possível definir uma temperatura que separa ambos os regimes, chamada de temperatura de bloqueio (T_b). Fixando o volume $V=V_0$ e $\tau=100s$, deste modo obtemos.

$$\ln \tau = \ln \tau_0 + \frac{KV_0}{K_B T_b} + \dots \quad (6)$$

Que implica em:

$$T_b = \frac{KV_0}{25K_B} \quad (7)$$

A temperatura de bloqueio é diretamente proporcional ao volume da partícula e a constante de anisotropia. Partículas maiores serão superparamagnéticas em temperaturas mais elevadas.

Figura 02: Curva de magnetização versus campo externo H aplicado: a) Sistema de partículas no estado bloqueado, as partículas possuem uma direção bem definida mesmo na ausência de H . b) Sistema Superparamagnético, na ausência de H as partículas não possuem uma direção definida, resultando em uma magnetização nula. À medida que H cresce a magnetização aumenta até atingir a saturação, H indo a zero a magnetização também vai à zero.

II.2.3-Magnetoresistência Gigante

Desde o descobrimento da Magnetoresistência Gigante GMR em multicamadas, o fenômeno do magnetotransporte gigante é amplamente investigado, e inúmeros progressos foram conseguidos. No trabalho pioneiro de Peter Grünberg em 1986 na Alemanha foi conseguida uma pequena Magnetoresistência. Dois anos mais tarde, Albert Fert e seu grupo, no qual participava o brasileiro M.N. Baibich, da universidade de Paris-Süd, conseguiu uma variação de resistividade em torno de 50%, para um sistema de 40 camadas de ferro alternadas com finas camadas de cromo. Em 1996 Yvan Bryunseraede e seu grupo, na Universidade de Leuven na Bélgica, alcançaram um recorde de 220% do valor da resistividade em 50 camadas finas alternadas de ferro e cromo.

Considerando que os momentos magnéticos de cada átomo dentro de cada partícula estão ferromagneticamente acoplados, que as partículas se encontram a uma temperatura T , que o conjunto já atingiu o equilíbrio térmico, nessa temperatura todas as partículas estão no estado superparamagnético.

O fenômeno da GMR se baseia na natureza magnética dos metais utilizados nas multicamadas. Os átomos de ferro possuem momento magnético intrínseco, sendo estes acoplados, todos se alinham na mesma direção, efeito conhecido como ordenamento ferromagnético. Quando aproximamos duas camadas de ferro separadas por um espaçador não magnético (cromo), os momentos magnéticos de cada camada de ferro tendem a se alinhar na direção contrária para minimizar a energia do sistema, acoplamento conhecido como antiferromagnético. O conjunto possui resistividade *elétrica muito alta* à passagem da corrente elétrica. É sabido que os elétrons de condução possuem momento magnético, este se acopla aos momentos dos grãos de ferro, há grande probabilidade de espalhamento dos elétrons de condução na interface devido aos momentos magnéticos se alinharem em direções opostas, configuração antiferromagnética, Fig.03 a). Quando aplicamos o campo magnético externo H fornecemos energia ao sistema forçando os momentos de dipolo magnéticos das camadas de ferro vizinhas a alinharem-se na mesma direção: configuração ferromagnética, a probabilidade de espalhamento na interface diminui e a resistividade decresce, conforme ilustrado na Fig. 03 b).

Figura 03: Representação da corrente elétrica através de uma multicamada de Fe-Cr-Fe. a) configuração antiferromagnética, máxima resistividade devido ao espalhamento dos elétrons de condução na interface. b) O campo H força os momentos magnéticos dos átomos de Fe a se alinharem na mesma direção, diminuindo o espalhamento e conseqüentemente a resistividade.

Atualmente é aceito que o mecanismo básico do fenômeno GMR tem origem no espalhamento dependente do spin dos elétrons de condução. Existem outros sistemas além de multicamadas que exibem o GMR, no entanto o requerimento básico é que o momento magnético das entidades magnéticas que formam o sistema possa ser alterado com a aplicação de um campo magnético externo, fitas de NiFe por exemplo.

III.2 Concentradores de Fluxo magnético.

III.2.1 introdução

Para o entendimento do funcionamento dos CF devemos analisar os materiais sob o ponto de vista da origem microscópica das interações internas, através magnetização resultante M . As principais interações são Diamagnetismo, Paramagnetismo, Ferromagnetismo e Antiferromagnetismo. No estudo de sistemas artificiais Superparamagnéticos tais como sólidos granulares e sistemas nanocristalinos são encontrados materiais extremamente “doces” do ponto de vista magnético tais como ligas de FeCuNbSiB.

Vamos fazer uso da teoria estatística do Paramagnetismo como base teórica das descrições das interações magnéticas dos materiais utilizados na construção dos CF, e de posse de alguns resultados experimentais em Materiais e Métodos poderemos comparar as aproximações do modelo teórico. Na próxima seção deixaremos os principais conceitos e fórmulas sobre o ensemble canônico e na seção seguinte chegaremos à fórmula de Langevin que descreve o comportamento da magnetização em um sistema Paramagnético em contato com um reservatório térmico.

III.2.3 Modelo Paramagnético.

Consideraremos um sistema formado por partículas, os átomos que formam as partículas interagem de forma ferromagnética, seus momentos magnéticos estão acoplados, o momento magnético total da partícula é μ . Mas não ocorrem interações de origem magnética entre partículas, na ausência de campo magnético externo a magnetização total será nula, se as partículas estiverem no estado

Superparamagnético. Macroscopicamente o sistema reage de forma Paramagnética, mas com intensidades maiores devido ao acoplamento ferromagnético no interior das partículas.

O tratamento estatístico desse sistema segue a formulação clássica do Paramagnetismo, onde temos uma distribuição de Boltzmann dos momentos μ com relação ao campo de indução H .

O conjunto se encontra em equilíbrio térmico numa certa temperatura T , na presença de um campo homogêneo H . Para um sistema formado por n partículas a energia potencial da i -ésima partícula será dada por: (A. Hernando e T.Kulik, 1994)

$$E_p = -\sum_i^N \vec{\mu}_i \vec{H} = -\sum_i^N \mu_{iz} H \cos \theta \quad (13)$$

A função partição da energia é expressa como:

$$Z(T, H, N) = \int d\Omega_1 \int d\Omega_2 \dots \int d\Omega_N \exp\left(\frac{\mu H}{KT}\right) \sum_1^N \cos \theta_i \quad (14)$$

Como não há interações entre partículas da teoria do ensemble canônico temos que:

$$Z(T, H, N) = [Z(T, H, 1)]^N \quad (15)$$

Resolvendo a integral, cuja solução é exposta no apêndice 1, temos:

$$Z(T, H, 1) = \frac{4\pi \cdot \sinh\left(\frac{\mu H}{KT}\right)}{\left(\frac{\mu H}{KT}\right)} \quad (16)$$

A densidade de probabilidade de o dipolo assumir orientações entre, Θ e $\Theta + \Delta\Theta$.

$$\rho(\theta, \Phi) d\Omega = \frac{\exp\left(\frac{\mu H}{KT}\right)}{Z(T, H, 1)} \sin \theta d\theta d\phi \quad (17)$$

Se o momento magnético for dado por:

$$\mu = \mu_0 \hat{e}_r \quad (18)$$

Escrito em coordenadas esféricas como:

$$\hat{e}_r = \begin{pmatrix} \text{Sen } \theta \cdot \cos \phi \\ \text{sen } \theta \cdot \text{sen } \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad (19)$$

O número de momentos magnéticos médios $\langle \mu \rangle$ que apontam para Θ e $\Theta + \Delta\Theta$ é:

$$\langle \mu \rangle = \frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int \begin{pmatrix} \text{Sen } \theta \cdot \cos \phi \\ \text{sen } \theta \cdot \text{sen } \phi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \left(\exp\left(\frac{\mu H}{KT}\right) \cos \theta \right) \text{sen } \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (20)$$

Supondo que o campo H aponta na direção $\hat{z}$, a equação acima se reduz a:

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int \cos \theta \left(\exp\left(\frac{\mu H}{KT}\right) \cos \theta \right) \text{sen } \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (21)$$

$$a = \frac{\mu H}{KT} \quad (22)$$

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int \cos \theta (\exp(a) \cos \theta) \text{sen } \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (23)$$

Resolvendo a integral e substituindo $Z(T, H, 1)$ na equação acima, leva à função de Langevin, a solução é exposta no apêndice 2:

$$\langle \mu_z \rangle = \mu_0 \left[\coth(a) - \frac{1}{a} \right] \quad (24)$$

Que pode ser expandida para altas energias térmicas numa série de Taylor quando $a \ll 1$.

$$\mu = \mu_0 \left[\frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} + \frac{2x^5}{945} + \dots \right] \quad (25)$$

$$\frac{M}{M_0} = \frac{x}{3} - \frac{x^3}{45} + \frac{2x^5}{945} + \dots \quad (26)$$

Quando $x \rightarrow 0$ a função de Langevin se aproxima de uma reta com inclinação $x/3$. Na figura abaixo apresentamos as três primeiras aproximações, relativas ao corte da série.

Figura 04: As três primeiras aproximações para a função de Langevin quando $x \rightarrow 0$.

IV- Materiais e Métodos

IV.1-Sensor magnetoresistivo HMC 1001 fabricado pela Honeywell.

A base do filme fino magnetoresistivo é ferro evaporado em substrato não magnético, níquel-ferro (Permalloy). No processo de fabricação é possível orientar o eixo de fácil magnetização das partículas no sentido em que a corrente flui. Um campo magnético normal ao filme é capaz de girar o vetor magnetização, produzindo variação na resistividade, que está diretamente relacionada com o ângulo entre o vetor magnetização do filme e o sentido que flui a corrente no mesmo, espalhamento dos elétrons de condução, efeito GMR.

O sensor é composto por quatro elementos magnetoresistivos configurados numa ponte de Wheatstone, na ausência de campos magnéticos sobre os quatro elementos, eles possuem aproximadamente a mesma resistência, então a tensão entre os pontos (5) e (8) será nula, a menos de um “off-set” DC. (Fig. 05) A ponte é disposta em dois pares diagonais para que os filmes reajam de forma semelhante ao ruído do ambiente, eliminando o sinal de modo comum.

Figura 05: Representação esquemática do sensor HMC1001 fabricado pela Honeywell. À esquerda podemos ver o arranjo em ponte de Wheatstone, à direita vemos os circuitos equivalentes para o controle do offset e o set/reset do dispositivo. Figura extraída do “datasheet” do fabricante do sensor HMC1001 da HONEYWELL.

O dispositivo é fabricado através da técnica de fotolitografia, método comum na indústria de dispositivos semicondutores. Devido às dimensões reduzidas, a variação da temperatura em um elemento é igual à variação sobre os outros elementos, sendo canceladas mutuamente pela ponte de Wheatstone. Cada elemento magnetoresistivo possui resistência que varia entre 600 e 1.200 ohm, o erro associado a cada elemento pela técnica de fabricação está em torno de fração de ohm e causa pequena instabilidade na ponte, provocando o *off-set dc* na saída do sensor, que pode ser removida através de diversos métodos [6]. Fig.06

Figura 06: Campo magnético aplicado versus tensão de saída, terminais (5) e (8). Figura extraída do “datasheet” do fabricante do sensor HMC1001 da HONEYWELL.

No dispositivo é possível eliminar campos magnéticos externos, através do *off-set* de campos externos internamente, que consiste numa bobina próxima ao filme capaz de girar o vetor magnetização.

Um problema aparece quando o sensor é exposto a campos randômicos, ou muito intensos, os domínios magnéticos ficam orientados de maneira aleatória, presos em poços de potencial, degradando a sensibilidade. Para reduzir esse efeito e maximizar o sinal de saída o fabricante adicionou uma chave (set/reset) que gera um pulso de alta corrente e produz um campo magnético intenso capaz de reorientar os momentos magnéticos, removendo a história magnética do filme (Fig. 07). Set ou Reset refere-se

apenas ao sentido que a corrente fluirá, fazendo com que a polarização do momento magnético aponte ora num sentido (set) ora em outro (reset).

Figura 07: Representação dos domínios magnéticos do filme (Permalloy). a) Os momentos possuem orientação randômica. b) Após a aplicação do *set* os momentos se alinham em uma determinada direção. c) Os momentos invertem de direção após a aplicação do *reset*. Figura extraída do “datasheet” do fabricante do sensor HMC1001 da HONEYWELL.

O dispositivo possui sensibilidade para medidas de campos em torno de 30μ Gauss ou 3nT .

Figura 08: Tensão de saída na ponte versus campo magnético aplicado. Pode-se observar que não existe histerese para essa intensidade de campo magnético. Figura extraída do “datasheet” do fabricante do sensor HMC1001 da HONEYWELL.

Figura 09: Densidade espectral de ruído para o sensor. Existe um ruído do tipo $1/f^a$ para baixas frequências. Acima de 100 Hz temos uma resposta praticamente plana e o limite inferior de ruído.

IV.2 Instrumentação do Sistema de aquisição

Para os testes experimentais do desempenho dos concentradores de fluxo (CF) desenvolvemos um sistema que fosse capaz de fazer medidas de Magnetização e realizando o mapeamento regiões com o objetivo de construir imagens de distribuição de dipolos magnéticos, na primeira instrumentação com o auxílio de uma mesa XY mapeamos dipolos estáticos no tempo e na segunda instrumentação medimos dipolos que variavam no tempo, a medida foi feita através de uma matriz de sensores num arranjo 4x4.

IV.2.1 Instrumentação contendo um único sensor

A ponta de prova

Para realizarmos as medidas montamos uma “ponta de prova”, que contivesse um sensor HMC1001. A ponta de prova é mostrada na figura 10.

Figura 10: A ponta de prova é composta pelo CF, o sensor HMC101, suporte e cabo para as ligações elétricas. b) Vista da ponta de prova montada.

A instrumentação eletrônica

A instrumentação eletrônica do sensor é mostrada na figura 12. Na alimentação elétrica da instrumentação é usado uma fonte de tensão de três estágios 12V, -12V, 10V, -10V e 6V. A etapa de alimentação. Nos terminais de saída do sensor foi adicionada uma etapa amplificadora, construída com amplificadores de baixo ruído LT1028 fabricado pela empresa Linear Technology, ajustado para ganho 1000. Para remoção do offset do sensor inserimos um resistor de 1 MOhm entre os terminais 2 e 8 do sensor HMC1001, método proposto na referência (Manual técnico Honeywell, 2007). Para set/reset foi usado um circuito RC com uma chave manual proposto pelo fabricante, o

sentido da corrente é quem define a ação set ou reset, e pode ser invertido através de uma segunda chave inversora, não simbolizada na Figura 11.

Figura 11: A instrumentação eletrônica é formada pela fonte de tensão de três estágios, pela fonte de corrente, o amplificador e finalmente pelo circuito RC responsável pelo set/reset. Os periféricos são compostos pela ponta de prova, a mesa XY e o computador que trabalha em conjunto com a placa de aquisição de sinais de National Instruments NI6014.

Varredura de regiões

Para varredura de regiões fixamos a ponta de prova em um braço preso a uma mesa XY, como mostra a figura 12. A resolução mecânica do passo é de 0,5mm, e o menor tempo entre dois passos consecutivos foi de 60ms, para varreremos uma matriz de 250x250 cerca de 62500 pontos é gasto cerca de 70 minutos.

Figura 12: Representação esquemática da mesa XY, observamos que o sensor está fixo a mesa através de um braço acrílico. A mesa desloca a ponta de prova através da região de interesse, a região é delimitada através da escolha do número apropriado de linhas e colunas.

O funcionamento do sistema na presença do CF:

O campo magnético B medido pelo sensor na presença do CF é a soma

$\vec{H} + \vec{M}_{CF}$, $\vec{M}_{CF}$ é a magnetização resultante do CF na direção sensível do sensor.

Medida de magnetização:

Para realizarmos medidas de fontes magnéticas que possuem magnetização espontânea, ou materiais que são previamente magnetizados o campo resultante indicado pelo sensor é $H_{fonte} + M_{CF}$.

O Software de Controle

Para controle do sistema de aquisição desenvolvemos um software que fosse capaz de fazer a aquisição e a filtragem do sinal adquirido pelo sensor através da placa de aquisição da National Instruments NI6014, fazendo uso de um canal AD. Fazemos o controle da mesa XY através de um driver de potência comandado pela porta paralela do PC. A figura 13 ilustra o diagrama esquemático do programa de aquisição.

Figura 13: Diagrama esquemático do programa de aquisição.

O sensor indicará a medida dos campos provenientes de fontes com magnetização espontânea ou previamente magnetizadas.

Figura 14: Vista da tela do computador com o painel de controle do sistema de aquisição.

1	Indicativo de <i>scan</i> aceso(executando) e apagado (parado)
2	Desloca a ponta de prova na fronteira da região da medida. (delimita a região da medida)
3	Habilita o início do scan/ (executa scan)
4	Número de linhas do scan
5	Número de colunas do scan
6	Passo em (mm) entre dois pontos consecutivos, os passos crescem em múltiplos de 0,5(mm)
7	Tempo de espera entre dois pontos consecutivos

8	Executando coluna i
9	Executando linha j
10	Frequência de corte do filtro passa baixas
11	Intensidade do pixel (i,j) executado
12	Direção de deslocamento da mesa XY, X ou Y
13	Sentido do deslocamento Positivo ou Negativo
14	Dados a serem salvos como Relativo (proporcional ao sinal filtrado, sem normalização) ou Absoluto (normalizado, máximo contraste)
15	Data do início do scan
16	Data do termino do scan
17	Indicativo da evolução do processo de <i>scan</i>
18	Visualização da matriz intensidade (i,j)

Tabela 01: Funções e indicações de controle do Sistema de aquisição.

IV.2.2 Instrumentação do sistema com dezesseis sensores

A partir da experiência obtida com a instrumentação de um único sensor desenvolvemos uma placa contendo dezesseis sensores. No projeto dessa placa vários cuidados foram tomados no sentido de se evitar interferência entre os sensores (cross-talking), realizar uma amplificação de sinal o mais próximo possível dos sensores, utilizar, na medida do possível, componentes para montagem em superfície (SMD).

O funcionamento do Sistema magnetorresistivo com 16 canais.

Os sensores foram dispostos numa placa de circuito impresso na forma de uma matriz 4x4 com dimensões 7x7cm e separação entre os sensores de 1cm, conforme mostra a figura 16, a aquisição do sinal dos sensores é feita através de uma placa AD da National Instruments modelo PCI6014 com dezesseis canais. O software que controla o sistema faz a varredura de leitura da esquerda para direita e de cima para baixo. E através do método de interpolação matemática construímos as imagens de intensidade de campo magnético.

A eletrônica está dividida em duas partes, dezesseis amplificadores numa placa de circuito impresso e o conjunto de sensores junto com os circuitos de set/reset em outra. Uma fonte de tensão simétrica com dois estágios de regulação sendo o primeiro de 18V e o segundo com 15V foi desenvolvida para alimentação dos circuitos. A matriz dos sensores e o estágio de amplificação possuem etapas reguladoras de tensão independentes, afim de se evitar ruídos provenientes da própria rede alimentação e dos cabos, entre outros.

Figura 15: Representação física do sistema magnetorresistivo, onde simbolizamos a seqüência da leitura dos sensores. Atualmente o sistema é capaz de fazer a leitura da matriz seis vezes por segundo.

A eletrônica do sistema de aquisição.

Fonte de alimentação.

Para alimentarmos os circuitos projetamos uma fonte simétrica com dois estágios de regulação sendo seu esquema elétrico mostrado na figura 17. A fonte é composta por um transformador de 3A, uma ponte retificadora de 5A, além de reguladores positivos 7818(IC1), 7815(IC3), 7812(IC4) e reguladores negativos 7918(IC2), 7915(IC5) e capacitores eletrolíticos sendo dois de 1000uf(C8 e C9) e oito de 470uf(C1 a C7), e outros componentes

O primeiro estágio simétrico é formado por IC1 e IC4, este tem a finalidade de pré-regular a tensão retificada pela ponte B1, o segundo estágio é responsável pela segunda regulação e estabilização do estágio anterior, e a saída desta etapa alimenta o conjunto de amplificadores. Para alimentarmos a matriz dos sensores utilizamos uma saída de 12V representada pelo regulador IC4.

Figura 16: Esquema elétrico da fonte de alimentação.

O diagrama elétrico e o design da placa de circuito impresso foram desenvolvidos com software EAGLE, o roteamento das trilhas foi feito através do recurso de auto-rooteamento do software. Os componentes foram posicionados manualmente levando-se em conta vários aspectos, entre eles a dissipação do calor gerado pelos reguladores, e a minimização do tamanho. O layout do CI da fonte pode ser visto na figura 18.

Figura 17: Placa de circuito impresso da fonte de alimentação.

Amplificador com 16 canais.

Os amplificadores foram dispostos numa placa de circuito impresso e nela foi adicionada uma etapa reguladora com dois estágios e saídas simétricas de 10V, esta foi adicionada afim de cancelar ruídos externos, entre eles os provenientes dos cabos de alimentação vindos da fonte de alimentação. A etapa é composta pelos reguladores positivos 7815 e 7810 e pelos reguladores negativos 7915 e 7910 e oito capacitores eletrolíticos de 470uf. O diagrama elétrico pode ser observado na figura 18.

Figura 18: Fonte regulada dos amplificadores com dois estágios de regulação e simétrica.

Etapa amplificadora

Cada módulo é composto por um amplificador diferencial LTC1280 dois resistores um de 170 K Ω e o outro de 250 K Ω . Quatro capacitores cerâmicos, dois de 1.000 pF e os outros dois de 0.1 μ F e finalmente dois capacitores eletrolíticos de 10 μ F. Um dos cuidados que tomamos foi em garantir que todos os amplificadores apresentassem o mesmo ganho para um dado sinal de entrada, então escolhemos resistores com 1% de precisão. Escolhemos a configuração proposta pelo “datasheet” do amplificador LTC1280 para sinais vindos de uma ponte de Wheatstone, que coincide com o arranjo do sensor HMC1001. O diagrama elétrico mostrado nas figuras de 10 a 22 mostram os dezesseis amplificadores junto com a nomenclatura de seus terminais de entrada e saída.

Figura 19: Esquema elétrico e numeração dos conectores de entrada e saída para os amplificadores de um a quatro.

Figura 20: Esquema elétrico e numeração dos conectores de entrada e saída para os amplificadores de cinco a oito.

Figura 21: Esquema elétrico e numeração dos conectores de entrada e saída para os amplificadores de nove a doze.

Figura 22:Esquema elétrico e numeração dos conectores de entrada e saída para os amplificadores de treze a dezesseis.

Figura 23: Placa de circuito impresso com dezesseis sensores junto com a etapa reguladora dos amplificadores.

A matriz com dezesseis sensores.

Figura 24: Esquema elétrico da matriz que contém dezesseis sensores MR juntamente com os respectivos set/reset.

Figura 25: Superfície inferior da placa de circuito impresso da matriz dos sensores.

Figura 26: Superfície superior da placa de circuito impresso da matriz dos sensores.

Figura 27: Disposição dos componentes na superfície inferior.

Figura 28: Disposição dos componetes na superfície superior.

Software de aquisição do sinal

A figura 30 mostra a tela do software de aquisição dos sinais que foi desenvolvido no ambiente LabView da National Instruments. Através do software é possível visualizar a distribuição do campo magnético medido pelos 16 sensores depois de ser interpolada por um algoritmo do tipo spline cúbica. É possível mudar o grau interpolação através do número de iterações, porém sobrecarregando o processador do PC que pode levar a uma diminuição do número de fotos por segundo.

A rotina básica do software.

1. Aquisição das tensões referentes aos sinais dos dezesseis sensores
2. Salva os dados das tensões e o tempo referente ao tempo da aquisição no arquivo com extensão .dat
3. Aplicação do método de interpolação matemática
4. Mostra a imagem da interpolação na tela do programa
5. Retorna ao item 1 até o programa ser finalizado.

Figura 29: Tela do software de aquisição e tratamento dos sinais adquiridos pelos sensores.

O software de análise da medida.

Após a aquisição dos sinais é possível visualizá-los e realizar alguns processamentos através do software de análise que também foi desenvolvido no ambiente LabView da National Instruments. A figura 30 mostra a tela deste software onde se podem ver os comandos implementados. Em particular pode-se reproduzir a sequência de imagens adquiridas com diferentes velocidades em uma espécie de modo cine.

A rotina básica do software.

1. Aquisição das tensões referentes aos sinais lidos pelo programa de aquisição dos dezesseis sensores gravados no arquivo .dat
2. Aplicação do método de interpolação matemática
3. Mostra a imagem da interpolação na tela do programa
4. Retorna ao item 1 até o arquivo ser esgotado

Figura 30: Tela do software de análise das imagens.

V- Resultados

V.1 Resultados das medidas do sistema de aquisição com único sensor

Para medirmos a eficiência do sistema de aquisição trabalhamos inicialmente sem os concentradores de fluxo. Preparamos um fantoma com a forma do número cinco, com largura e altura aproximadas de 1 cm, inicialmente trituramos ferrita e misturamos com vaselina até obtermos uma pasta homogênea que utilizamos para preencher o fantoma. Colocamos o fantoma no interior de um solenóide cilíndrico e pulsamos uma corrente elétrica com auxílio de uma fonte de tensão que gerou no solenóide um campo magnético de aproximadamente 10 Gauss que magnetizou a ferrita presente na vaselina. Posicionamos o fantoma sobre a mesa XY, fizemos uma varredura com a ponta de prova numa altura próxima ao fantoma, numa área equivalente a uma matriz de 200x200 com passo de 0,5 mm, sem o auxílio do filtro passa baixa, o resultado pode ser observado abaixo.

Figura 31: Imagem obtida com a ponta de prova quase encostada no simulador físico e sem o uso do filtro passa baixa

Como segundo teste, imantamos um prego com um imã, a ponta de prova foi posicionada próximo ao prego a área varrida foi de 50x180 com passo de 0,5 mm, deixamos sombreado a posição do prego. O resultado da figura abaixo evidencia o aparecimento de dois pólos magnéticos indicados pelas cores amarela e azul.

Figura 32: Imagem do campo magnético produzido por um prego imantado, os dois pólos magnéticos são claramente visíveis.

Para verificarmos a eficiência do sistema para fontes distantes do sensor. Usamos um pequeno imã e o posicionamos a uma distância de 8cm. Na figura 33 a) é apresentado o resultado sem o filtro passa baixas, em b) é apresentado os resultados com a ação do filtro passa baixa.

Figura 33: a) Imagem de um dipolo a 8cm do sensor com CF sem o filtro passa baixa .
b) Foi repetida a medida anterior com a ação do filtro passa baixa com frequência de corte igual a 5Hz.

Diante dos resultados acima se mostrou eficiente o uso do filtro passa baixa para medidas de fontes distantes ou com pequenas intensidades.

Com o objetivo de observarmos o espalhamento das linhas de campo magnético com a distância, fizemos quatro imagens fazendo o uso do filtro passa baixas frequências com frequência de corte em 5Hz, em quatro diferentes distancias axial do fantoma representado pelo número cinco. Da teoria do eletromagnetismo sabemos que $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, então para uma dada superfície fechada que envolve a fonte de campo magnético, toda linha de campo que sai da superfície retorna, isso faz com que as linhas sejam curvas. É esperado que ao nos afastarmos da fonte as linhas de campo se fechem

e a imagem perca a nitidez, os resultados das imagens são mostrada em sequência da distância axial na figura abaixo.

Figura 34: Imagens de campos magnéticos a) varremos a figura com a ponta de prova a 1cm do fantoma. b) Ponta de prova a 2cm do fantoma. c) 3cm. d) Em 4cm o fantoma já é visto pelo sensor como um dipolo.

V.2 Resultados das medidas utilizando o sistema magnetorresistivo com dezesseis sensores.

Fazendo uso do sistema construído e preparando um tubo de ensaio com vaselina soltamos em pequeno ímã na região interna do tubo de ensaio e acionamos o programa de aquisição com o objetivo de visualizar a passagem do ímã através do conjunto de sensores.

Figura 35: Foto do sistema de medida da passagem do ímã pelo conjunto de sensores.

Expomos um conjunto de fotos com os respectivos tempo associados a passagem do ímã através do conjunto de sensores associados com os respectivos tempos, a tempo total para cobrir os conjuntos dos sensores foi de 3,72 segundos.

$$t_f - t_i = 3,72 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad V = s_f - s_i / t_f - t_i \quad \Rightarrow \quad V = 6 \text{ cm} / 3,720 \text{ s} \quad \Rightarrow \quad 1,61 \text{ cm/s}$$

Figura 36: Conjunto de fotos que indicam a passagem do imã próximo do conjunto de sensores com os respectivos tempos associados.

V.3 Resultados do concentrador de fluxo

V.3.1 Resultados das simulações computacionais

Admitindo que o comportamento dos CF na presença de um campo de indução H na direção $\hat{z}$, é completamente determinada pela magnetização resultante M , também na direção $\hat{z}$ que coincide com a direção sensível do sensor. Simulamos o comportamento das linhas de campo magnético na presença de um material de alta permeabilidade magnética. O resultado é mostrado na figura abaixo.

Figura 37: Representação da distribuição das linhas de campo magnético gerado por uma distribuição de corrente em forma de “u”, sendo a direção da corrente é perpendicular ao plano dessa página. Na figura a) Observamos a distribuição das linhas de campo sem o material. Já na figura b) vemos a distorção das linhas de campo para um material com simetria cilíndrica. Na figura c) temos a distorção das linhas para um material com simetria cônica.

Para analisarmos o comportamento da magnetização M devido ao campo de indução H versus distância, deslocamos um pequeno ímã de 3 cm até 12cm. Para cada valor de distância foi registrado um valor de intensidade de campo magnético medido pelo sensor em UA (unidades arbitrárias). Foram feitas duas medidas, uma com o concentrador de fluxo e outra sem ele. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 37.

Figura 38: Intensidade de campo medido pelo sensor com e sem CF.

Em *Materiais e Métodos* discutimos que na presença do CF uma parcela da medida indicada pelo sensor é referente à magnetização M do CF, sabemos da teoria do eletromagnetismo que $B=H+M$. A curva da magnetização versus distância do dipolo ao concentrador de fluxo pode ser obtida experimentalmente através:

$$M = H_cCF - H_sCF$$

H_cCF = campo medido pelo sensor na presença do concentrador de fluxo

H_sCF = campo medido pelo sensor sem do concentrador de fluxo

Ao normalizamos M e H podemos comparar a resposta M da magnetização ao campo de indução H , veja Figura 02.

Figura 39: A linha pontilhada indica magnetização induzida no CF devido ao campo de indução, H é variado pelo movimento de um pequeno ímã na direção do sensor, indicado pela curva verde. Podemos observar que a magnetização cresce quase linearmente com o campo H, a não linearidade se acentua entre 4cm e 8cm.

Usando a descrição estatística clássica do paramagnetismo contido na teoria do ensemble canônico temos uma distribuição de Boltzmann dos momentos μ com relação ao campo H. A magnetização resultante é dada pela equação.

$$\frac{M}{M_0} = [\coth(x) - \frac{1}{x}]$$

O parâmetro x exprime uma competição entre a energia térmica e a magnética.

$$x = \left(\frac{\mu H}{KT} \right).$$

Para altas energias térmicas $\frac{\mu H}{KT} \ll 1$ a equação pode ser aproximada por

uma série de potências. Os três primeiros termos da expansão está indicado abaixo.

$$\frac{M}{M_0} = \frac{x^1}{3} - \frac{x^3}{45} + \frac{2x^5}{945} + \dots$$

Para análise, desenhamos as aproximações do modelo fazendo o campo de indução H igual a H_{sCF} , junto com a curva da magnetização versus distância do dipolo ao CF, ambas normalizadas. O resultado está na figura abaixo.

Figura 40: Comparação entre as três aproximações do modelo teórico quando $x \ll 1$, com a curva experimental da magnetização M_z do CF, na aproximação de um pequeno ímã na direção sensível do sensor.

O modelo que melhor se ajustou aos resultados experimentais foi o modelo para altas energias térmicas, com corte no primeiro termo da série de Taylor da função de Langevin. Os desvios entre o modelo teórico e a curva experimental podem ser atribuídos às interações entre as partículas ou partículas no estado de bloqueio dos momentos magnéticos, e anisotropias da rede e relativamente altas do material que compõem CF, para melhor compreensão da estrutura física do CF é recomendável realizar medidas de Susceptibilidade AC e Magnetização versus Temperatura, tais medidas possibilitam determinarmos a temperatura de bloqueio das partículas entre outras informações das propriedades magnéticas do material.

V.3.2 Resultados Experimentais dos concentradores de Fluxo

Para compararmos a influência dos CF realizamos novamente medidas com e sem concentrador de fluxo e posteriormente comparamos os resultados, usamos dois CFs um denominado “grande” e outro “pequeno” com dimensões de 10x2x5 mm e 10x2x3mm, e três ímãs com diferentes intensidades na superfície dos ímãs as intensidades são respectivamente x, y, z. A designação ímã pequeno, médio e grande refere-se às intensidades magnéticas dos ímãs. Um ajuste polinomial das curvas para cada tipo de concentrador e ímã foi realizado, totalizando nove curvas. O resultado é mostrado abaixo.

Figura 41: Campo magnético medido pelo sensor com e sem concentrador de fluxo causado pela aproximação de três ímãs de diferentes intensidades respectivamente.

A presença do concentrador de fluxo causa um aumento da intensidade magnética indicada pelo sensor, surge então de maneira natural questões de como varia o ganho de intensidade devida a magnetização do CF com a aproximação ou afastamento do dipolo, qual a reprodutibilidade das medidas, e a questão da distribuição de linhas ou PSF?

O ganho

Definimos o ganho ao aproximarmos um dipolo do sensor como sendo:

$$ganho = 20 \log \left(\frac{H_c CF}{H_s CF} \right)$$

$H_c CF$ = campo medido pelo sensor na presença do concentrador de fluxo

$H_s CF$ = campo medido pelo sensor sem o concentrador de fluxo

Os resultados do ganho são mostrados separadamente para os CF pequeno e grande respectivamente, figuras 42 e 43. Evidencia-se pela análise das duas figuras que o tamanho do CF influencia na resposta da magnetização ao campo de indução que foi variado pelo deslocamento do dipolo e conseqüentemente pela variação do campo magnético.

Figura 42: Ganho para o CF pequeno versus distância para três ímãs diferentes.

Figura 43: Ganho para o CF grande versus distância para três ímãs diferentes.

Sobre a reprodutibilidade das curvas de ganho

Em sistemas de aquisição é sempre desejável que a medida seja reprodutível, ao longo do tempo. Caso contrário não seria possível construir um sistema de medida calibrado. Para análise da reprodutibilidade juntamos duas medidas quaisquer por tipo de concentrador, grande e pequeno, os resultados podem ser vistos na figura 44.

Figura 44: a) Mostra a reprodutibilidade entre duas curvas quaisquer para o CF pequeno. b) Para o CF grande.

Observamos que as curvas se aproximam com o aumento da intensidade do campo magnético ao aproximarmos os ímãs. Isso possivelmente é resultado de partículas bloqueadas, ao aumentarmos a energia magnética aproximando o dipolo fornecemos energia para as partículas fazendo que seu momento magnético saia então do estado bloqueado.

As imagens com concentrador de fluxo

Como o auxílio da mesa XY deslocou-se a ponta de prova na área equivalente a uma matriz de 250 linhas e 250 colunas, com passo de 0,5mm. Analisamos a influência do CF nas medidas de imagens de fontes magnéticas, fizemos novamente medidas com e sem o CF. Realizamos as medidas em três alturas diferentes para observação da distribuição das linhas de campo, ou PSF. Para cada distância axial apresentamos as imagens de um dipolo magnético com e sem concentrador de fluxo magnético. Os resultados são apresentados nas três figuras abaixo.

Figura 45: Imagem do campo magnético produzido por um dipolo foi posicionado a 6 cm abaixo do sensor. A) Medida foi realizada com o CF grande e em B) sem o CF.

Figura 46: O dipolo foi posicionado a 4 cm abaixo do sensor. A) Medida foi realizada com o CF grande e em B) sem o CF.

Observando as três figuras concluímos observando que o concentrador de fluxo provoca um alargamento das gaussianas indicando uma perda da resolução espacial, porém aumentando a intensidade do campo magnético. O uso dos concentradores de fluxo magnético é indicado para aplicações em que a intensidade seja mais importante que a resolução espacial.

VIII- Conclusão

Apesar das inúmeras dificuldades encontradas para o desenvolvimento e montagem dos módulos que compõem os sistemas magnetorresistivos conforme foi discutido parcialmente em *materiais e métodos* chegou-se a uma versão que fosse capaz de fornecer resultados satisfatórios tanto em dipolos magnéticos estáticos quanto em medias nas quais os dipolos se movimentavam simulando uma situação do sistema gástrico *in vitro*.

No mapeamento de regiões contendo dipolos magnéticos com o sistema discutido em IV.2.1, com um único sensor, fizemos os testes com e sem concentrador de fluxo magnético onde observamos, através dos resultados expostos no capítulo V.1, que uma parcela da medida indicada pelo sensor provem da magnetização do concentrador de fluxo magnético embora exista um aumento de intensidade há uma perda da resolução espacial. Já o grau de reprodutibilidade não se mostrou eficiente, sendo uma das prováveis causas o aprisionamento dos momentos magnéticos na estrutura interna do concentrador de fluxo visto que em sua construção foi utilizada disco de serra para corte do mesmo, outro fator que poderia induzir os aprisionamentos dos momentos foi usarmos núcleos de ferrita comercial construída sem os cuidados necessários para nossa aplicação. Para prosseguir o estudo da eficiência dos concentradores de fluxo no futuro seria desejável trabalhar em conjunto com outros grupos que trabalhem com deposição de filmes formando materiais de alta permeabilidade magnética além de momentos magnéticos livres, formando sistemas que se comportem como um conjunto de partículas no estado superparamagnético, para que nas medidas as quais queiramos medir a susceptibilidade, é conveniente que os

momentos magnéticos do concentrador de fluxo se orientem em fase com o campo magnético aplicado.

O sistema discutido em IV.2.2, com dezesseis sensores numa matriz 4X4, mostrou-se capaz de adquirir imagens de dipolos magnéticos em tempo dito “quase” real devido a limitação imposta pela velocidade placa de aquisição dos sinais que foi capaz de adquirir entre quinze e vinte fotos por segundo. Fizemos testes utilizando imãs em movimento em um tubo de ensaio com glicerina em seu interior para que fosse possível simular o transito de alimentos de prova no esôfago para que em futuras aplicações o sistema possa ser aplicado em medidas da motilidade gastro intestinal. Ao aplicarmos um campo alternado numa região próxima ao arranjo dos sensores e aproximando um toroíde observamos a medida da susceptibilidade do mesmo. Para medidas *in vivo* é conveniente medirmos a susceptibilidade em alimentos de prova, pois esta medida força a direção da magnetização do alimento teste independente do mesmo se mover e girar em torno de si forçando a resposta da magnetização sempre ser orientada na direção sensível do sensor. Um dos pontos fracos desse sistema foi o baixo ganho conseguido pelos amplificadores devido à instabilidade do mesmo trabalhando com ganhos superiores a duzentos e cinquenta do sinal de entrada. Nos trabalhos posteriores será aconselhável a substituição do estágio amplificador, uma suposta melhoria seria utilizar amplificadores de instrumentação como AD620 da ANALOG DEVICES, já que a UNESP de Botucatu obteve ótimos resultados para amplificação de sistemas magnetorresistivos com ganhos em torno de mil vezes o sinal de entrada.

Referências bibliográficas

[1] A. Hernando e T. Kulik, *Phys. Rev. B* 49, 7064 (1994). [32] A. Slawska-Waniewska, P. Nowicki, H.K. Lachowicz, P. Gorria, J.M. Barandiaran e A. Hernando (1997). *Physical Review. B* 50, 6465 (1994); A. Slawska-Waniewska e J.M. Greneche, *Physical Review. B* 56, R8491.

[2] Addison-Wesley Publishing Co (1972). *Introduction to Magnetic Material*, B.D. Cullity., Reading, Massachusetts.

[3] A. Hernando e T.Kulik (1994), *Structural properties of amorphous and nanocrystallized FCuNbSiB and FeGdCuNbSiB*. *Physical Review. B* 49, 7064.

[4] Alexander Hellemans (1996), *Science* 273, 880

[5] B. Dieny et al . (1991). *Physical Review B* 43, 1297 (1991), B. Dienyet al., *J. Magn.Magn. Mater.* 93, 10.

[6]. Costa Monteiro, E, Barbosa CH, Lima EA, Ribeiro PC, and Boechat P (2000). *Locating Stell Needles in the Human Body Using a SQUID Magnetometer Physics in Medicine and Biology*, volume 45, Issue 8, pages 2389-2402.

[7] E.F. Ferrari, F.C.S. Silva e M. Knobel . (1997). *Physical Review . B* 56, 6086.

- [8] Greiner W (1935). *Paramagnetism. Classical Theoretical Physics*, vol. IV, 214-223
- [9] J.L.Dormann e D.Fiorani (1992), North-Holland, Amsterdam.
- [10] J.L. Dormann, D. Fiorani e E. Tronc (1997), *Adv. Chemistry .Physical* 98, 283.
- [11] M.N. Baibich et al. (1998), *Phys.Rev.Lett.*61, 2742.
- [12] Miranda, JRA (1995). *Estudos Biomagnéticos em Fisiologia Gástrica*, Tese de doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo..
- [13] Manual técnico dos sensores magnetorresistivos hmc 1001 fabricado pela Honeywell . On line disponível em:
www.alldatasheet.com/datasheet-df/pdf/167567/HONEYWELL/HMC1001.html
Consultado no dia 13/04/2006.
- [14]Manual tecnico de aplicações dos sensores magnéticos hmc1001 fabricado pela Honeywell. On line disponível em
www.magneticsensors.com/application/note/AN2. Consultado no 25/06/2007.
- [15] M.G.M. Miranda, G.J. Bracho Rodriguez, A.B. Antunes, M.N. Baibich, E.F. Ferrari, F.C.S. da Silva, M.Knobel, J (1998). *Magn. Magn. Mater.* 185, 33.

[16] M. Knobel, E.F. Ferrari e F.C.S. da Silva, *Mater* (1999). *Science.Forum* 302-303, 169.

[17] P. Allia, M. Knobel, P. Tiberto e F. Vinai (1995), *Physical Review. B* 52, 15398.

[18] R. Iglesias, H. Rubio e S. Suarez (1999). *Application. Physics. Lett.* 73,2503

[19] S. Morup e E. Tronc (1994), *Physical Review, Lett.* 72, 3278.

[33] R.W. McCallum, A.M. Kadin, G.B. Clemente e J.E.Keem, *J. Appl. Phys.* 61, 3577 (1987); E.F. Kneller e R.Hawing, *IEEE Trans. Magn.* 27, 3588 (1981).

Apêndices

1-Solução da integral do número de microestados

$$Z(T, H, 1) = \int d\Omega \exp\left(\frac{\mu H}{KT}\right) \cos \theta$$

$$a = \frac{\mu H}{KT}$$

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\Phi$$

Substituindo na equação temos:

$$Z(T, H, 1) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 (\exp(a) \cos \theta) \sin \theta d\theta d\Phi$$

$$x = \cos \theta$$

$$dx = -\sin \theta d\theta$$

$$Z(T, H, 1) = -2\pi \int_{-1}^1 (\exp(a)x) dx$$

$$Z(T, H, 1) = -\frac{2\pi}{a} [(\exp(ax))]_{-1}^{+1}$$

$$Z(T, H, 1) = -\frac{2\pi}{a} [(\exp(ax))]_{-1}^{+1}$$

$$Z(T, H, 1) = -\frac{2\pi}{a} [(\exp(a)) - (\exp(-a))]$$

Sendo:

$$\sinh(a) = \frac{[(\exp(a)) - (\exp(-a))]}{2}$$

$$Z(T, H, 1) = -\frac{2\pi}{a} [2\sinh(a)]$$

$$Z(T, H, 1) = -\frac{4\pi}{a} \sinh(a)$$

2-Solução da integral da magnetização resultante

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int \cos \theta \left(\exp \left(\frac{\mu H}{KT} \right) \cos \theta \right) \sin \theta d\theta d\Phi$$

$$a = \frac{\mu H}{KT}$$

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \cos \theta (\exp(a) \cos \theta) \sin \theta d\theta d\Phi$$

$$\langle \mu_z \rangle = \frac{2\pi\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int_{-1}^1 \cos \theta (\exp(a) \cos \theta) \sin \theta d\theta$$

$$x = \cos \theta$$

$$dx = -\sin \theta d\theta$$

$$\langle \mu_z \rangle = -\frac{2\pi\mu_0}{Z(T, H, 1)} \int_{-1}^{+1} x (\exp(ax)) dx$$

Basta resolver a equação:

$$-\int_{-1}^{+1} x (\exp(ax)) dx$$

$$y=ax$$

$$dy=adx$$

$$-\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y (\exp(y)) dy$$

Integrando por partes:

$$\int U dV = UV - \int V dU$$

$$U=y$$

$$dV=\exp(y)$$

Substituindo

$$-\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y (\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} \left[y \exp(y) - \int \exp(y) dy \right]_{-a}^{+a}$$

$$-\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y(\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} [y \exp(y) - \exp(y)]_{-a}^{+a}$$

$$-\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y(\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} [y \exp(y) - \exp(y)]_{-a}^{+a}$$

$$\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y(\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} [a \exp(a) - \exp(a) + a \exp(-a) + \exp(-a)]$$

$$\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y(\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} [a(\exp(a) + \exp(-a)) - (\exp(a) - \exp(-a))]$$

Sendo:

$$\sinh(a) = \frac{[(\exp(a)) - (\exp(-a))]}{2}$$

$$\cosh(a) = \frac{[(\exp(a)) + (\exp(-a))]}{2}$$

$$\frac{1}{a^2} \int_{-1}^{+1} y(\exp(y)) dy = -\frac{1}{a^2} [2a \cosh(a) - 2\sinh(a)]$$

Substituindo na equação xx

$$\langle \mu_z \rangle = -\frac{\mu_0}{Z(T, H, 1)} \frac{1}{a^2} [2a \cosh(a) - 2\sinh(a)]$$

$$\text{Substituindo } Z(T, H, 1) = -\frac{4\pi}{a} \sinh(a)$$

$$\langle \mu_z \rangle = -\frac{\mu_0}{-\frac{4\pi}{a} \sinh(a)} \frac{1}{a^2} [2a \cosh(a) - 2\sinh(a)]$$

O momento magnético médio é dado.

$$\langle \mu_z \rangle = \mu_0 \left[\cosh(a) - \frac{1}{a} \right]$$

3 Fotos das montagens do sistema magnetorresistivos com dezesseis canais.