

Ministério da Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM

**“Utilização de Sensores Magnéticos Para Medição de
Deslocamento Sem Contato”**

Valner João Brusamarello

Engenheiro Eletricista

Porto Alegre

1996

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

Ministério da Educação e do Desporto
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM

**“Utilização de Sensores Magnéticos para Medição de
Deslocamento Sem Contato”**

Valner João Brusamarello
Engenheiro Eletricista

**Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM.**

Porto Alegre
1996

“Utilização de Sensores Magnéticos Para Medição de Deslocamento Sem Contato”

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais - PPGEMM, como parte dos requisitos para obtenção do título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Ciência dos Materiais - Instrumentação Eletro-Eletrônica

por

Valner João Brusamarello - Engenheiro Eletricista

1996

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Ciência dos Materiais - Instrumentação Eletro-Eletrônica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca examinadora do curso de Pós Graduação.

Orientador:

Altamiro Amadeu Suzim

Dr. Engenheiro em Informática - INPG - Grenoble, Fr

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Milton Antônio Zaro - DEMEC / UFRGS

Prof. Dr. Renato Machado de Britto - DELET / PPGEMM / UFRGS

Prof. Dr. Marco Túlio de Vilhena - PPGEMM / UFRGS

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Suzim - DELET/PPGEMM / UFRGS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu Orientador Prof. Dr. Altamiro Amadeo Suzim, pelo empenho e seriedade com que tem dirigido o Depto. de Instrumentação, pelos conhecimentos que tem transmitido, e pela paciência com que tem conduzido este trabalho.

Agradeço aos professores Iedo e César do DELET pelo apoio, doando os sensores para os ensaios.

Agradeço ao Sr. Roberto de Agosto pela boa vontade e presteza em transmitir seus conhecimentos.

Agradeço também ao meu irmão Lucas Brusamarello pela boa vontade e as colaborações dadas, mostrando interesse pela ciência nos seus 12 anos.

Agradeço a toda equipe do LMM, em especial ao bolsista de iniciação científica Luciano Maciel pelas colaborações e dicas na realização do software, ao mestrando Jefferson Loss pelas suas colaborações e companhia nos fins de semana e feriados, e por fim ao prof. Dr. em Engenharia Milton Antônio Zaro, quem tornou a realização deste trabalho possível, cedendo toda a infra-estrutura necessária.

Agradeço também a meus pais, protagonistas indiretos.

Por fim, gostaria de agradecer a pessoa que considero ser e ter sido a mais importante neste período. Pela sua companhia incansável, sua paciência, seu carinho e todos os momentos de confiança e alegria que proporcionou, meus sinceros agradecimentos à minha namorada Rita de Cássia Becco.

Dedico este trabalho à Rita,
meus pais Pedro e Domingas

ao amigo

Thomas Weihmann (28/09/67 - 23/08/94)

ao meu primo Valdemar Braz Dambrós (11/06/64 - 04/05/95)

à minha avó Josefina Pasa Dambrós (30/03/14 - 27/04/95)

RESUMO:

O objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar um sistema capaz de reproduzir na tela de um microcomputador o movimento de um ponto, sem qualquer contato no mesmo.

Para construir o protótipo foram utilizados sensores magnetoresistivos, um superímã, e para calibração, uma mesa adaptada com três parafusos micrométricos, capaz de realizar um deslocamento nas coordenadas x, y e z de um sistema tridimensional.

Este estudo foi dividido em duas partes, na primeira avaliou-se o comportamento do sistema para a variação de deslocamento em um plano, caracterizando um movimento em duas dimensões (2D). Na segunda parte, foi inserido um terceiro eixo, reproduzindo assim deslocamentos em 3 dimensões (3D).

O sistema apresentou resultados coerentes e comprovou ser uma opção para medidas desta natureza. Considerando-se os limites de precisão e tolerância necessárias, aplicações nas áreas de controle e Engenharia Biomédica podem ser implementadas baseadas no estudo de medidas sem contato.

ABSTRACT

The aim of this work is to develop and evaluate a system to reproduce the movement of a point on a microcomputer screen in real time and contactless between the point and the sensor.

To build the prototype, were used magnetoresistives sensors, a magnet and a calibration table adapted with three micrometric screws to accomplish the displacement on x, y and z coordenates of a 3D system.

This study has been divided into two parts. In the first, the behaviour of the system was asseded for the displacement variation of a point on a plane (2D). In the second part, a third axis was inserted, thus reproducing 3D displacements.

The system has present consistent resulsits and prove to be an alternative for mesurements of this nature. Considering necessary accuracy and tolerance limits, aplications in Control and Biomedical Engeneering can be implemented, based on the study of contactless measurement.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 -	1
INTRODUÇÃO.....	
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos deste trabalho.....	2
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTO E APLICAÇÕES.....	4
2.1 Medidas sem contato em biomedicina.....	4
2.1.1 Mecanocardiogramas.....	4
2.1.2 Medida do movimento dos olhos.....	6
2.1.3 Medida do movimento da língua.....	8
2.1.4 Medida de movimentos mandibulares.....	12
2.1.4.1 Equipamentos comerciais.....	17
2.2 Outras Aplicações.....	19
CAPÍTULO 3 - SENSORES MAGNÉTICOS.....	21
3.1 Fluxgates.....	21
3.1.1 Introdução.....	21
3.1.2 Princípio de funcionamento e teoria de operação.....	23
3.1.3 A variação da permeabilidade do material do núcleo.....	25
3.1.4 Métodos para detecção.....	30
3.2 Sensores de Efeito Hall.....	32
3.2.1 Histórico e princípios físicos.....	32
3.2.2 Construção dos sensores de efeito Hall.....	33
3.2.3 Dependência do Efeito Hall com a Temperatura.....	35
3.2.4 Características Básicas.....	36
3.2.4.1 Sensibilidade.....	36

3.2.4.2	Offset Equivalente a Indução Magnética.....	36
3.2.4.3	Ruído Equivalente de Indução Magnética.....	37
3.2.4.4	Sensibilidade a fatores Externos (<i>Cross Sensitivity</i>).....	37
3.2.4.5	Não Linearidade.....	37
3.2.4.6	Estabilidade.....	39
3.2.5	Aplicações.....	40
3.2.5.1	Transdutores de Deslocamento Mecânico.....	40
3.2.5.2	Medidas de Corrente Elétrica, Potência e Energia.....	42
3.3	Sensores Baseados em Material Amorfo.....	45
3.3.1	Características de Materiais Amorfos Magnéticos para uso como Sensores.....	45
3.3.2	Aplicações.....	46
3.4	Sensores Magnetoresistivos.....	54
3.4.1	Introdução.....	54
3.4.2	Fundamentos do Sensor.....	54
3.4.3	Magnetoresistores comerciais.....	59
3.4.4	Resistência num campo magnético.....	60
3.4.5	Aproximação Matemática das Características do Magnetoresistor..	61
3.4.6	Aplicações.....	62
3.4.6.1	Sensor para detectar velocidade de uma roda.....	63
3.4.6.2	Sensor de deslocamento.....	63
3.4.6.3	Sensor de posição.....	64
3.4.6.4	Sensor de posição angular.....	65
3.4.6.5	Medidor de corrente.....	66
3.5	SQUIDS.....	67
3.5.1	Supercondutividade.....	67
3.5.2	O Efeito <i>Meissner</i>	68
3.5.3	O Efeito <i>Josephson</i>	70
3.5.4	O SQUID - Uma Junção de <i>Josephson</i> num Anel Supercondutor...	72
3.5.4.1	SQUID DC.....	74
3.5.5	Medindo Campos Magnéticos com SQUIDS.....	74
3.5.6	Aplicações de SQUIDS.....	75

3.5.6.1 Magnetômetro Absoluto e Transdutor de Deslocamento.....	75
3.5.6.2 Medidas Elétricas Utilizando SQUIDS e o efeito <i>Josephson</i>	76

CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO, SEM CONTATO, EM UM PLANO..... 78

4.1 Sistema <i>Rast_2D</i>	78
4.1.1 Sensores.....	79
4.1.2 Amplificadores.....	79
4.1.3 Interface A/D.....	79
4.1.4 <i>Software</i>	80
4.2 Simulações.....	82
4.2.1 Calibração do Sistema.....	82
4.2.2 Simulando um Deslocamento Retilíneo.....	82
4.2.3 Simulando uma Trajetória Senoidal.....	85
4.2.4 Simulando uma Trajetória Espiral.....	86
4.2.5 Simulando Ruídos nos Sensores.....	88

CAPÍTULO 5 - IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO SEM CONTATO NO ESPAÇO..... 96

5.1	Sistema	96
<i>Rast_3D</i>		
5.1.1 Sensores.....		97
5.1.2		97
Amplificadores.....		
5.1.3	Interface	97
A/D.....		
5.2		99
Simulações.....		
5.2.1 Calibração do Sistema.....		100
5.2.2 Simulando um Deslocamento Retilíneo.....		100

5.2.3 Simulando um Deslocamento Senoidal - Retilíneo.....	102
5.2.4 Simulando Ruídos nos Sensores.....	105
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS PRÁTICOS.....	114
6.1 Introdução.....	114
6.2 Resposta do Sensor.....	114
6.3 Sistema.....	127
6.3.1 Funcionamento.....	127
6.3.2 Disposição dos Sensores MR.....	127
6.3.3 Circuito de Condicionamento.....	129
6.3.4 Conversor Analógico Digital A/D.....	130
6.3.5 Microcomputador.....	131
6.4 Medidas de Deslocamento no Plano.....	132
6.5 Medidas de Deslocamento no Espaço.....	136
6.6 Análise.....	138
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO.....	140
7.1 Análise dos Resultados.....	140
7.2 Sugestões para Melhoramentos do Sistema.....	141
BIBLIOGRAFIA.....	143
ANEXO.....	146

Lista de figuras

2.1	Configuração do sensor que compõe o mecanocardiograma, núcleo com simetria radial (n=12).....	5
2.2	a) Arranjo de um mecanocardiograma. b) Comparação do sinal de um Eletrocardiograma (ECG) , Mecanocardiograma (ACG) , e um fonocardiograma (PCG).....	6
2.3	Configuração de um sensor de núcleo com geometria radial (n=4) e arranjo experimental para medida do movimento dos olhos.....	7
2.4	Padrão de movimento dos olhos seguindo um sinal luminoso de 0.4 Hz.....	8
2.5	Configuração geométrica de um dipólo magnético (x,y,z) e um sensor magnético (a,b,c).....	9
2.6	Comparação entre curva teórica (contínua) e experimental (pontilhada) para o sinal de saída do sensor (volts) x distância (mm).....	11
2.7	Padrões de movimentos da língua (em dois pontos, uma a 10 e outra a 38mm da ponta da língua) durante a pronúncia de etete.....	12
2.8	Projeção de um movimento em 3 dimensões (de B para A e depois de A para C) em três planos distintos (frontal, lateral e superior).....	13
2.9	Exemplo da fixação do magneto no interior da boca do paciente.....	14
2.10	a)A rotação sobre o eixo z, causa uma variação que será percebida pelos sensores do eixo y. b)A rotação sobre o eixo y causa uma perturbação nos sensores que estão no eixo z. c)Rotações do eixo x passando pelo centro do magneto não causam alteração em nenhum dos transdutores, já rotações do eixo x (Xr) fora do centro do magneto causarão variações em todos os transdutores.....	15
2.11	Sistema de coordenadas determinando os três planos desejados (frontal, lateral e superior).....	16
2.12	a)Representação dos três deslocamentos (3 eixos) durante um movimento de deslocamento lateral e anterior de mandíbula (excursão lateral direita e esquerda da mandíbula com os dentes deslizando - superiores com inferiores-). Em (b) a representação tridimensional do	

deslocamento do magneto para o mesmo movimento. (c) A velocidade de abertura e fechamento da mandíbula (velocidade de deslocamento do ponto magnético).....	17
2.13 Kinesiógrafo mandibular.....	18
2.14 Sirognatógrafo (Siemens).....	19
2.15 Dispositivo para calibração do Sirognatógrafo nos eixos x,y e z , uma matriz padrão possui encaixes para uma haste que possui em sua extremidade um magneto. Dessa forma tem-se uma matriz de pontos de referência.....	19
3.1 O fluxgate básico consiste de um núcleo ferromagnético e de uma bobina. Mudanças na permeabilidade deste núcleo causam uma mudança no campo B , induzindo uma tensão na bobina (Vsec).....	23
3.2 Detalhe na curva de magnetização B contra $\mu_0 H$ para um tubo de Permax 51 ferrite	25
3.3 Sensores que possuem o campo de magnetização paralelo ao campo externo H_j . (a) Núcleo simples, (b) VACQUIER, (c) FÖRSTER, (d) ASCHENBRENNER e GOUBAU.....	26
3.4 Sensores em que o campo de magnetização é ortogonal ao campo externo H_j	27
3.5 Sensor com núcleo tipo anel com duas bobinas sensoras (ACUÑA e PELERIN, 1969).....	28
3.6 Bobina esférica compacta para detectar vetores triaxiais do campo magnético terrestre [PRI82].....	29
3.7 Detalhes de construção de uma bobina Triaxial [EVE66].....	29
3.8 Permeabilidade aparente $\mu_a(t)$ e campo magnético de excitação $H(t)$ como função do tempo para um sensor de núcleo tipo tubular de ferrite.....	30
3.9 Diagrama em blocos do circuito eletrônico de um detector de segunda harmônica para um magnetômetro do tipo fluxgate, com detecção por desbalance de campo.....	31
3.10 Principais características construtivas do sensor tipo Hall.....	34
3.11 Dependência do coeficiente Hall R_H com a temperatura para vários materiais, e a localização aproximada de InSb, InAsP e InAs	35

3.12 Um circuito para compensação do efeito de campo da junção, o quadrado tracejado representa a área do sensor Hall.....	39
3.13 Um sensor Hall usado como sensor de deslocamento. (a) A configuração básica. (b) A tensão Hall como função de deslocamento relativo ao longo do eixo x . (c) O mesmo de (b) mas para o eixo y	41
3.14 Um transdutor de deslocamento baseado num sensor Hall, aplicado como sensor de pressão. O ímã permanente é fixado na diafragma. Quando o diafragma deflete devido a uma pressão P , o sensor Hall Detecta esta perturbação.....	42
3.15 Arranjo básico para medidas de grandezas elétricas. A tensão Hall é proporcional a B (que é proporcional a i).....	43
3.16 Diagrama esquemático de um medidor de potência baseado num sensor Hall. L é o condutor, B é o campo produzido pela corrente I que será medida pelo sensor HD. V_H é a tensão de saída	44
3.17 Sensores magnéticos implementados com materiais magnéticos amorfos.....	48
.	
3.18 Esquema de uma mesa digitalizadora implementada com uma matriz de fios amorfos e baseado no efeito Matteucci.....	49
3.19 Sensor de deslocamento multivibracional utilizando um núcleo amorfo tipo estrela.....	50
3.20 Frequência de ressonância do sensor como função de intensidade de campo magnético.....	51
3.21 Saída do sensor de vibração como resposta de um campo magnético externo.....	52
3.22 Características da saída do sensor resistivo para duas frequências diferentes.....	53
3.23 Geometria de um sensor magneto resistivo. Valores típicos são $l=100 \mu\text{m}$ $W=10 \mu\text{m}$, $t=100 \text{ nm}$	55
3.24 Caminhos de corrente num semiconductor retangular (a) Com campo magnético zero, (b) com campo magnético B	59
3.25 Resistência do magneto resistor \times Indução magnética.....	60

3.26 Razão de R_B/R_o como função da indução magnética B.....	61
3.27 Dependência da relação R_B/R_o com a indução magnética.....	62
3.28 Utilização de um magneto resistor (do tipo diferencial) para medir velocidade.....	63
3.29 Utilização do sensor magneto resistivo (KMZ10) como sensor de deslocamento.....	64
3.30 Detetor de posição utilizando um sensor MR.....	65
3.31 Medição de deslocamento angular com um sensor MR.....	66
3.32 Medição de corrente utilizando um sensor MR. No arranjo pode-se ver um condutor que transporta uma corrente I , gerando o campo que é medido.....	66
3.33 Pedacos de supercondutor (um inteiro e outro com uma cavidade central) com contornos de integração.....	70
3.34 Diagrama esquemático de um SQUID mostrando os elementos básicos (Anel supercondutor mais uma junção de Josephson).....	73
3.35 Diagrama esquemático de um SQUID com um circuito ressonante LC.....	73
3.36 Diagrama esquemático de um SQUID DC.....	74
3.37 Configuração básica do transformador de fluxo com as bobinas primária e secundária.....	75
3.38 Detalhes internos da construção de um transdutor de deslocamento baseado num SQUID.....	76
4.1 Disposição dos sensores juntamente com área onde o magneto pode mover-se.....	78
4.2 Fluxograma simplificado do software do sistema.....	80
4.3 Uma matriz de pontos definidos por uma calibração prévia onde a distância entre dois pontos corresponde a uma unidade de distância e os pontos p_1, p_2, p_3, p_4 podem ser definidos como função dos sensores $P_n = F(s_1, s_2, s_3, s_4)$	81
4.4 Curvas 3D baseadas numa simulação de 4 sensores que têm	

resposta do tipo $\frac{1}{x}$ em função da distância até o magneto, com um ganho de 100 já associado. Em (a) a resposta do sensor 3 e em (b) a resposta do sensor 4, as respostas dos sensores 1 e 2 são simétricas.....	83
4.5 Resposta do sensor 1 para um deslocamento retilínea diagonal ($y=x$).....	84
4.6 Resposta do sistema para um deslocamento do tipo $x=y$ (diagonal)....	85
4.7 Resposta de uma trajetória senoidal para o sensor 1.....	86
4.8 Resposta do sistema para um ponto com trajetória senoidal.....	87
4.9 Resposta de uma trajetória espiral para o sensor 1.....	87
4.10 Resposta do sistema para um ponto com trajetória espiral.....	88
4.11 Simulações do sistema introduzido <i>offset</i> . (a) Resposta da trajetória tipo reta com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (b) Resposta da trajetória tipo seno com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (c) Resposta da trajetória tipo espiral com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (d) Resposta da trajetória tipo reta com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (e) Resposta da trajetória tipo seno com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor.(f) Resposta da trajetória tipo espiral com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor.....	90
4.12 Simulação das respostas ($V_o = -123.735 + 20.09672x - 0.277378x^2$) dos sensores 1 e 2 ((a) e (b)), visto que farão parte da nova matriz de pontos. As respostas dos sensores 3 e 4 são simétricas.....	91
4.13 Simulações do sistema introduzido <i>offset</i> . (a) Resposta da trajetória tipo reta com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (b) Resposta da trajetória tipo seno com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor.(c) Resposta da trajetória tipo espiral com 1% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (d) Resposta da trajetória tipo reta com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor. (e) Resposta da trajetória tipo seno com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor.(f) Resposta da trajetória tipo espiral com 10% de <i>offset</i> no fundo escala num sensor.....	92
4.14 Em (a) vê-se a resposta do sistema para um ruído de 60 Hertz de amplitude de 1% do fundo de escala para dois sensores (s_1 e s_2). À	

direita a resposta para um ruído de 60 Hertz para os quatro sensores, com amplitude de 0.25% do fundo de escala.....	94
4.15 Resposta do sistema para um <i>offset</i> de 0.25% de fundo de escala para os quatro sensores, em uma trajetória senoidal (a) e espiral (b).....	94
4.16 Resposta do sistema para uma situação de ruído nos 4 sensores, de 1% , 0.75% , 0.50% e 0.25% do fundo de escala.....	95
5.1 Disposição dos 8 sensores e o volume útil apresentado.....	96
5.2 Fluxograma do sistema Rast_3D.....	98
5.3 Resposta do sistema para um deslocamento diagonal $x=y=z$	101
5.4 Resposta do sistema para uma trajetória senoidal-retilínea.....	102
5.5 Simulação de uma trajetória senoidal-retilínea $y=x$ $z=\sin(x)$	103
5.6 Simulação de uma trajetória espiral em x e y e reta em z	104
5.7 Trajetória espiral em y e z ($y=a \sin(x)$ $z=a \cos(x)$), variação de a ($n=0,1,2..$) e $a=cte$	105
5.8 Resposta do sistema para um deslocamento em diagonal com um erro de <i>offset</i> de 1% em todos os sensores (o erro é para menos).....	106
5.9 Resposta do sistema para um deslocamento em diagonal com um erro de <i>offset</i> de 1% em todos os sensores (o erro é para mais).....	106
5.10 Resposta do sistema para erros aleatórios (de 0 a 1%) em 4 sensores.....	107
5.11 Resposta do sistema para uma trajetória senoidal com erros aleatórios (de 0 a 1%) em 4 sensores.....	107
5.12 Resposta do sistema para um erro de 1% em 4 sensores.....	108
5.13 Resposta do sistema para um erro aleatório (de 0 a 1%) em todos os sensores.....	108
5.14 Sistema implementado com um sensor com 5% de <i>offset</i> (em relação ao fundo de escala).....	109
5.15 Sistema implementado com dois sensores com 5% de <i>offset</i> (em relação ao fundo de escala).....	110
5.16 Sistema implementado com três sensores com 5% de <i>offset</i> (em relação ao fundo de escala).....	110
5.17 Resposta do sistema com quatro sensores com 1% de erro de	

<i>offset</i>	111
5.18 Resposta do sistema com oito sensores com 1% de fundo de escala de erro de <i>offset</i>	111
5.19 Resposta do sistema para ruídos de 60 Hz em todos os sensores e amplitude de 1% do fundo de escala.....	112
5.20 Resposta do sistema para um ruído de 60 Hertz e amplitude de 5% do fundo de escala em três sensores.....	112
6.1 Esquema do sistema utilizado nos ensaios referentes aos sensores (S1,S2,S3,S4). A e B são as direções de deslocamento do magneto.....	114
6.2 Característica da tensão de saída do sensor 1.....	116
6.3 Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 1.....	116
6.4 Característica da média dos ensaios com o sensor 1.....	117
6.5 Desvio padrão da amostra para o sensor1.....	117
6.6 Característica da tensão de saída do sensor 4.....	119
6.7 Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 4.....	119
6.8 Característica da média dos ensaios com o sensor 4.....	120
6.9 Desvio padrão da amostra para o sensor 4.....	120
6.10 Característica da tensão de saída do sensor 2.....	122
6.11 Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 2.....	122
6.12 Característica da média dos ensaios com o sensor 2.....	123
6.13 Desvio padrão da amostra para o sensor 2.....	123
6.14 Característica da tensão de saída do sensor 3.....	125
6.15 Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 3.....	125
6.16 Característica da média dos ensaios com o sensor 3.....	126
6.17 Desvio padrão da amostra para o sensor 3.....	126
6.18 - Diagrama em blocos do sistema.....	127
6.19 Arranjo utilizado para calibrar o sistema para medição de deslocamento no plano.....	129
6.20 Circuito utilizado no condicionamento do sinal dos sensores.....	130
6.21 - Resposta de um ensaio de deslocamento no plano; os pontos em amarelo representam 1mm (primeira aproximação), e os pontos em vermelho representam a posição do magneto na superfície (no total esta	

superfície mede 22 x 22 mm).....	133
6.22 - Resposta de uma trajetória aleatória, sendo que a posição real (no parafuso micrométrico que não varia) é sempre no centro do elemento de área (0.5 mm).....	134
6.23 - Resposta de uma trajetória aleatória, sendo que a posição real (no parafuso micrométrico que não varia) é sempre no centro do elemento de área (0.5 mm).....	135
6.24 Resposta do sistema para um movimento primeiramente na direção A e depois para B.....	136
6.25 Deslocamento em 3 direções A, B e C.....	137
6.26 Deslocamento em duas direções A e B	138

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Campo Magnético
μ	Permeabilidade Magnética
B	Densidade de Fluxo Magnético
χ	Susceptibilidade Magnética
M	Magnetização
D	Fator de Desmagnetização
V	Tensão
V_{sec}	Tensão Induzida no enrolamento secundário
B_{ex}	Densidade de Fluxo Magnético externo
H_{ex}	Campo Magnético externo
μ_0	Permeabilidade Magnética no vácuo
μ_r	Permeabilidade Magnética relativa
V_H	Tensão Hall
R_H	Coeficiente Hall
μ_H	Mobilidade dos portadores (No sensor de efeito Hall)
ρ	Resistividade
i	Corrente
B_{\perp}	Componente normal de Indução magnética
V_{off}	Tensão de <i>offset</i>
α	Coeficiente de dependência do semiconductor com a Temperatura
β	Coeficiente de variação de R_H
ℓ_0	distância de <i>gap</i>
V_{ac}	Tensão alternada
ρ_{\parallel}	Resistividade paralela à Magnetização
ρ_{\perp}	Resistividade perpendicular à Magnetização
R	Resistência elétrica
H_d	Campo Magnético de desmagnetização

M_s	Saturação magnética
V_0	Tensão de saída
H_K	Campo Anisotrópico
H_y	Componente do Campo Magnético na direção y
H_x	Componente do Campo Magnético na direção x
P	Momento para uma partícula num Campo Magnético
h	Constante de Planck

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações gerais

Medidas sem contato utilizando sensores magnéticos atualmente vêm sendo largamente empregadas. Será visto no decorrer deste trabalho que é grande a gama de tipos de sensores disponíveis, o que permite escolher um sensor para cada aplicação específica.

O assunto "*desenvolvimento de dispositivos de medida sem contato*" é muito amplo devido às suas extensas possibilidades de aplicações, que serão responsáveis pela escolha dos sensores que vão monitorar o processo.

Uma das áreas que vem tendo grandes investimentos neste tipo de instrumentação é a Engenharia Biomédica, onde são necessárias medidas precisas e sem contato. Outra área que também tem crescido está associada à Automação e Controle de Processos, onde cada vez mais se busca controles precisos, rápidos e confiáveis.

As aplicações citadas neste trabalho serão associadas a sensores magnéticos, também conhecidos como magnetômetros, onde através de ímãs permanentes estes sensores são excitados; medidas de intensidade e direção do campo são realizadas e então processadas, a fim de caracterizar a grandeza que se pretende monitorar.

1.2 - Objetivos deste trabalho

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar um sistema de medida sem contato, flexível o bastante para permitir medidas de deslocamento com mais de um tipo de sensor (desde que tenham uma resposta semelhante), bastando para isso apenas uma nova calibração (que consiste numa aquisição de dados de referência padrão).

Essas medidas tem dois enfoques :

- 1) Medida de deslocamento em um plano (2D).
- 2) Medida de deslocamento em um volume (3D).

No capítulo 2 serão apresentadas aplicações de sistemas que utilizam medidas semelhantes às propostas deste trabalho; estas aplicações englobam sensores de naturezas diferentes e estão voltadas para a área Biomédica.

No capítulo 3 será descrito de forma mais detalhada o funcionamento e aplicações (genéricas) de 5 tipos diferentes de sensores magnéticos: *fluxgates*, sensores de efeito Hall, sensores baseados em material magnético amorfo, sensores magnetoresistivos e SQUIDS.

Os capítulos 4 e 5 foram reservados para simulações. Admite-se que os sensores tenham uma resposta caracterizada por uma expressão matemática e com a implementação de uma rotina gerou-se uma tabela de dados que representa os pontos de calibração (simulando uma aquisição de dados). Com estes pontos tem-se subsídios suficientes para implementar o *software* de tratamento de dados.

Este *software* é então implementado e introduzindo-se erros (comuns em situações reais) é avaliado o comportamento do sistema (no capítulo 4 para um plano -2D- e no capítulo 5 para o volume -3D-).

O capítulo 6 mostra o *hardware* desenvolvido, e juntamente com o *software* construído nos capítulos 4 e 5 é feita uma avaliação do sistema com

sensores do tipo magnetoresistivos excitados por um superímã (acoplado a uma mesa de deslocamento 3D) que servirá de ponto de deslocamento.

São apresentados os resultados no capítulo 6 e as conclusões no capítulo 7, bem como novas sugestões para implementar melhoramentos no sistema.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO E APLICAÇÕES

2.1 - Medidas sem contato na Engenharia Biomédica

2.1.1 - Mecanocardiogramas [SON92]

Mecanocardiograma é o nome que se dá às medidas feitas no tórax para o acompanhamento das vibrações causadas pelo batimento cardíaco; assim como o mecanocardiograma, medidas de pulsações causadas por fluxo sanguíneo nas artérias também podem ser realizadas.

O sensor utilizado neste caso é um sensor de material amorfo com simetria radial para eliminar influência de campos magnéticos terrestres, como pode ser visto na fig. 2.1.

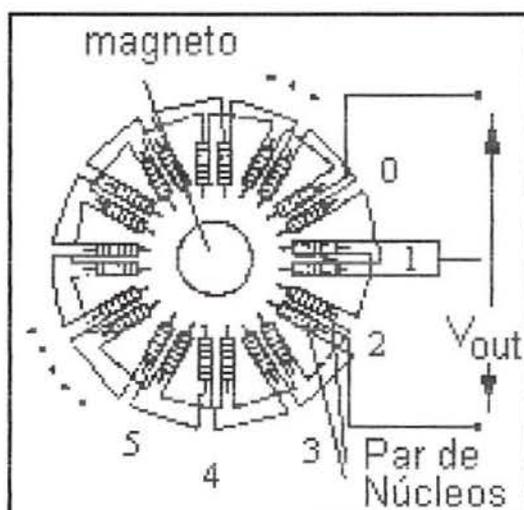


Fig. 2.1 - Configuração do sensor que compõe o mecanocardiograma, núcleo com simetria radial ($n=12$ - número de pares de núcleos) [SON92].

Para a detecção do movimento, é fixado um ímã permanente no peito do paciente, que ficará próximo ao sensor, percebendo assim a perturbação causada pela variação de intensidade devida a variação de distância entre o ímã e o sensor.

Na fig. 2.2 pode-se ver um arranjo para a medida de um mecanocardiograma (ACG), e ainda uma comparação com um eletrocardiograma (ECG) e um fonocardiograma (PCG).

Geralmente, em ACG e PCG, são usados outros tipos de sensores. Quando um sensor magnético é utilizado, suas características de banda larga permitem medir ambos os sinais, isto é, com este tipo de sensor é possível registrar uma faixa maior de frequências de sinais.

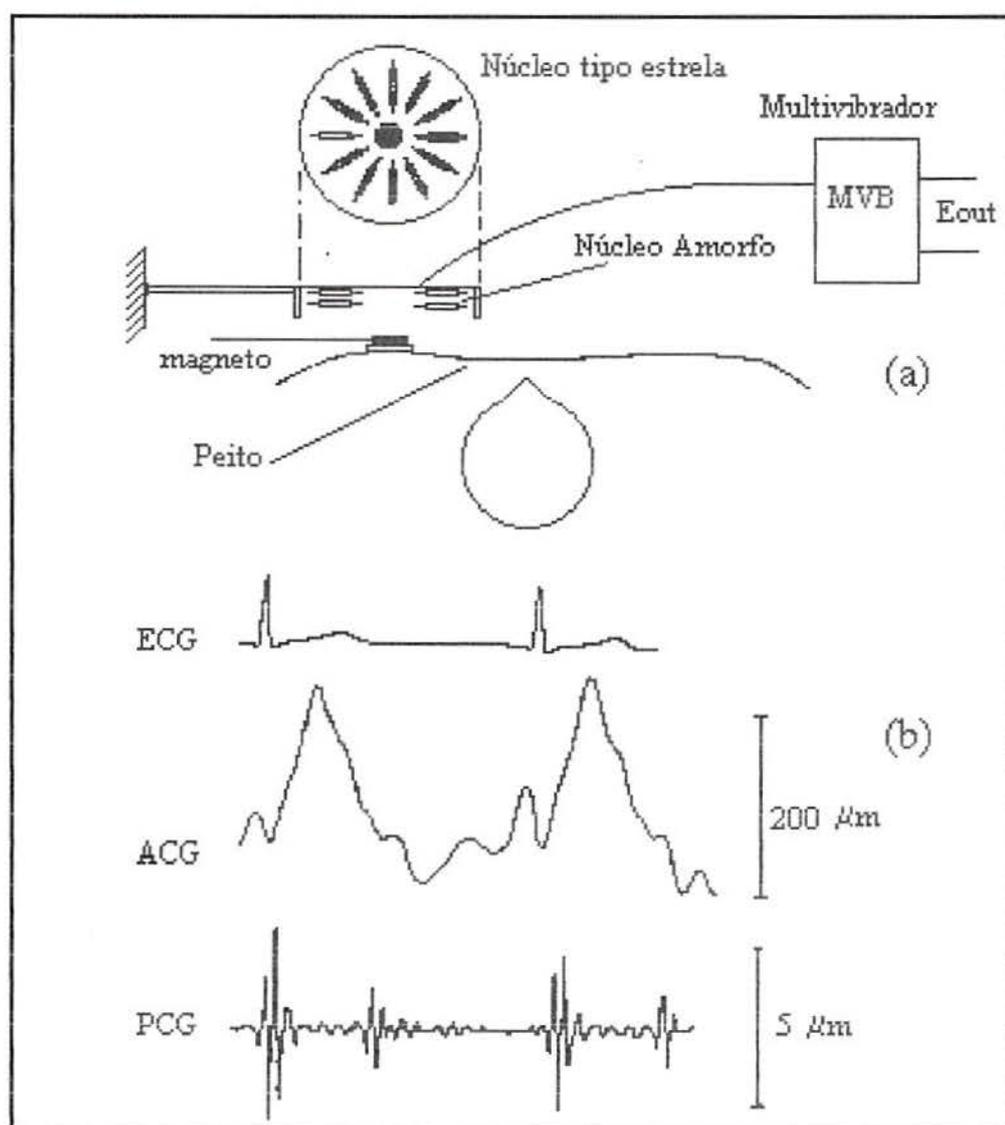


Fig. 2.2 - (a) Arranjo de um mecanocardiograma. (b) Comparação do sinal de um eletrocardiograma (ECG), Mecanocardiograma (ACG) e um Fonocardiograma (PCG) [SON92].

2.1.2 - Medida do movimento dos olhos [SON92]

Pela detecção do movimento dos olhos de um motorista de automóvel ou um operador de alguma máquina é possível determinar o estado de sonolência,

porque o movimento dos olhos não refletem apenas o movimento do globo ocular, mas também emoções e condições do corpo (fadiga, stress). Nesse caso, detecta-se os movimentos mecânicos das pálpebras através de pequenos ímãs fixados nas mesmas.

O funcionamento tem os mesmos princípios utilizados no mecanocardiograma visto no item anterior, onde um sensor com bobinas radiais simétricas (a fim de anular campos externos) detecta a variação da intensidade de um campo gerado pelo ímã. Neste caso o sensor é fixo na armação de um óculos, como se observa na fig. 2.3 .

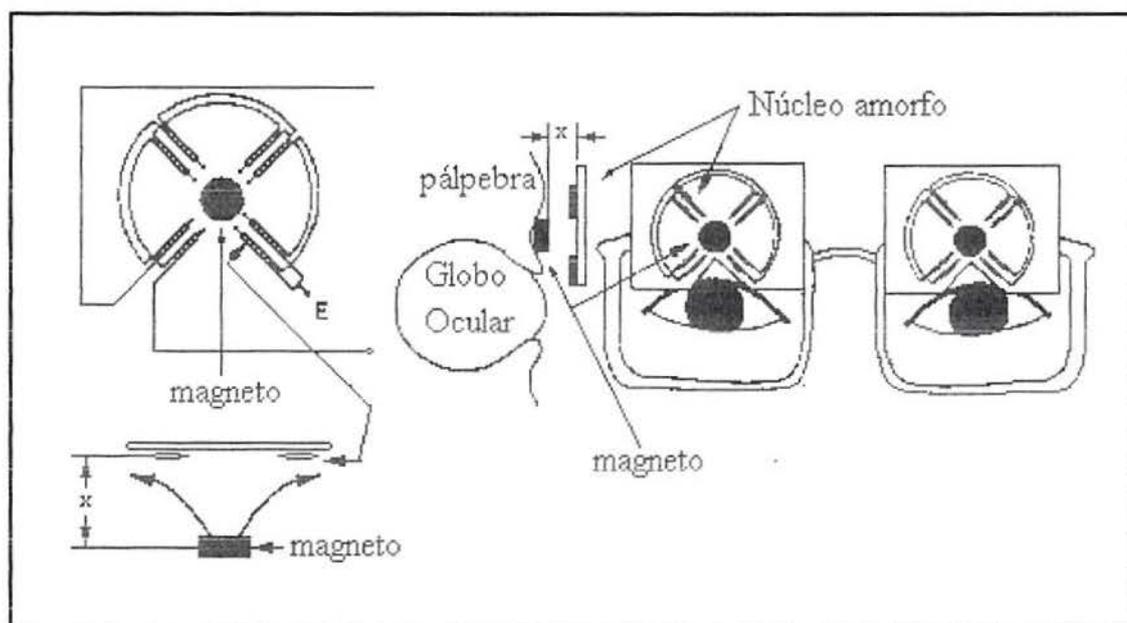


Fig. 2.3- Configuração de um sensor de núcleo com geometria radial ($n=4$) e arranjo experimental para medida do movimento dos olhos [SON92].

Geralmente este tipo de medida era feito com eletrodos, causando então um grande problema na fixação dos mesmos. A fig. 2.4 mostra exemplos de movimentos padrão dos olhos, enquanto um sujeito acompanhava o movimento de uma luz que variava senoidalmente na horizontal (da direita para

a esquerda) com uma frequência de 0.4 Hz. Analisando esta experiência, algumas conclusões foram tiradas; por exemplo, com o aumento da sonolência, a capacidade de perseguição desta luz vai se perdendo. Para sujeitos em estado de tensão, uma frequência mais alta (modulada no sinal) pode ser observada em comparação a um sujeito em estado normal.

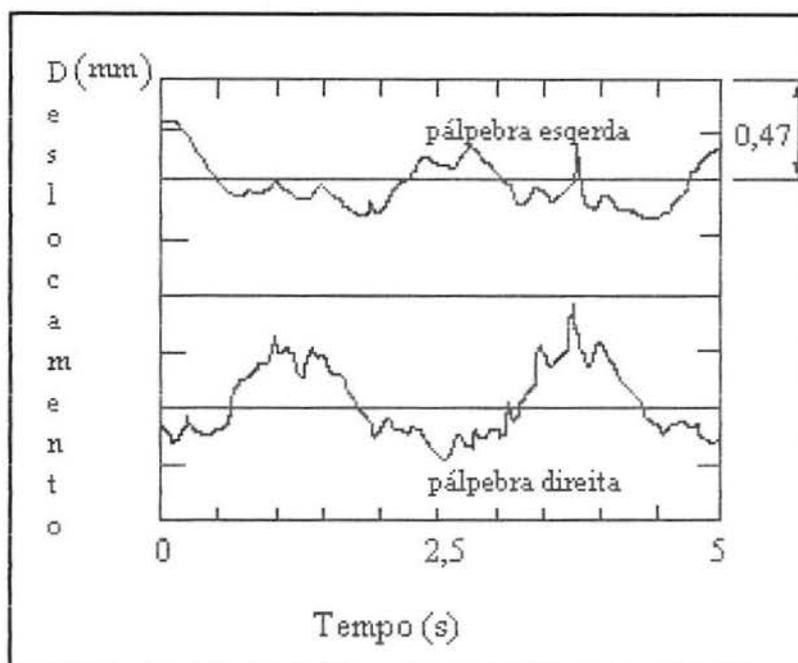


Fig. 2.4- Padrão de movimento dos olhos seguindo um sinal luminoso de 0.4 Hz [SON92].

2.1.3 - Medida do movimento da língua [SON92]

Vários métodos já foram propostos para medir o movimento articular da língua e outros órgãos [IMA91]; aqui é descrito um método para detecção da posição num sistema de coordenadas usando os mesmos princípios vistos nas seções anteriores.

O movimento articular de um ponto na língua pode ser entendido como um movimento em duas dimensões (num único plano por uma vista lateral). Representando vários pontos tem-se um mapeamento ao longo da língua, para

isso é necessário desenvolver uma equação empírica apropriada, que forneça um sinal de tensão como função da distância entre um sensor e um ímã permanente.

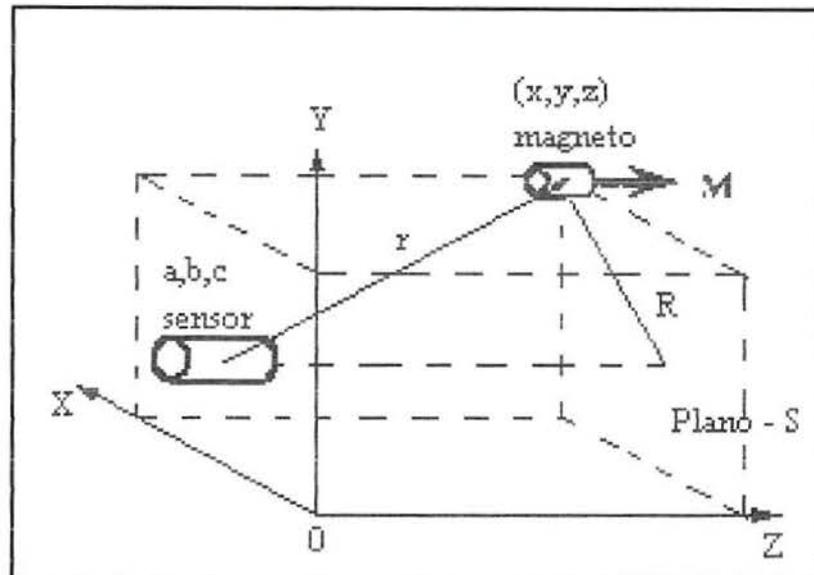


Fig. 2.5 - Configuração geométrica de um dipolo magnético (x,y,z) e um sensor magnético (a,b,c) [SON92].

A fig. 2.5 mostra um pequeno magneto na superfície da língua e um sensor que é colocado perto da mandíbula. Se o eixo do magneto é paralelo ao eixo z, então a componente z do campo magnético H detectada pelo sensor é dada pela equação 2.1:

$$H_z = -\frac{M}{4\pi\mu r^5} \cdot (r_x^2 + r_y^2 - 2r_z^2) = -K \frac{(R^2 - 2r_z^2)}{(R^2 + r_z^2)^{5/2}} \quad (2.1)$$

$$\text{Aqui } (r_x, r_y, r_z) = (x-a, y-b, z-c), K = \frac{M}{4\pi\mu}, R = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad [\text{SON92}]$$

Caso o magneto se mova no plano S paralelamente ao plano XY então na equação 2.1 r_z será constante, e a distância R pode ser determinada pelo campo correspondente H_z detectado pelo sensor. Em outras palavras, se a saída do sensor é constante, então o sensor estará num círculo equipotencial de raio R no plano S, centrado no ponto a,b. Para determinar a coordenada da posição do magneto no círculo equipotencial, são necessários 2 sensores. A posição do magneto é então determinada pelo ponto de intercessão de duas linhas equipotenciais.

Durante a fala, diferentes pontos da língua fazem diferentes movimentos, sendo interessante, então, que se monitore vários pontos simultaneamente. Para determinar a posição do magneto j (j=1 a n) através da tensão induzida V_i no sensor (i=1 a m), um sistema de equações não lineares precisa ser resolvido. Aqui as coordenadas do sensor i são (a_i, b_i, c_0) e as coordenadas do magneto j são (x_j, y_j, z_0) ; G_{ij} e B_i são constantes.

$$F_i = (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_n) = (V_i - B_i) + \sum_{j=1}^n \left\{ G_{ij} \frac{(x_j - a_i)^2 + (y_j - b_i)^2 - 2(z_0 - c_0)^2}{r_{ij}^5} \right\} \quad (2.2)$$

A fig. 2.6 mostra o sinal de saída do sensor utilizado quando o magneto é movimentado em uma direção com o auxílio de um mecanismo de calibração. Os valores calculados foram obtidos pela conversão dos valores teóricos da equação 2.1 em tensão.

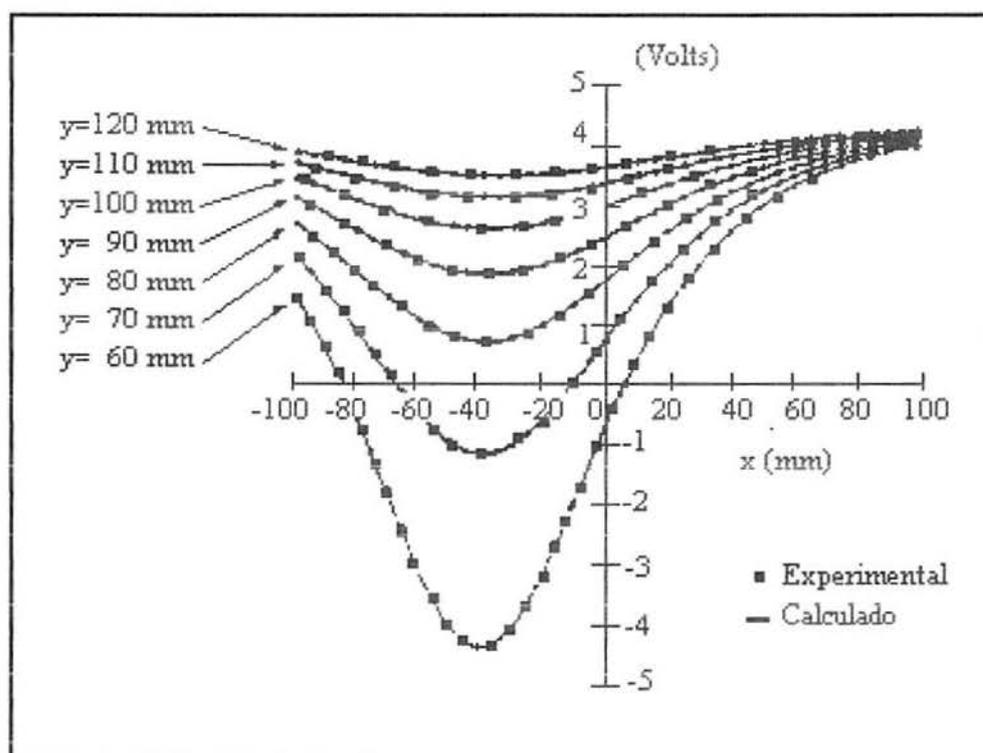


Fig. 2.6- Comparação entre curva teórica (contínua) e experimental (pontilhada) para o sinal de saída do sensor (volts) versus distância (mm) [SON92].

Na fig. 2.7 pode-se ver o sinal (V) para 2 magnetos fixados aproximadamente a 10mm (na frente) e 38mm (no meio) da ponta da língua durante a pronúncia da palavra etete; na figura são mostradas variações no tempo de componentes horizontais (H) e verticais (V), velocidade (VEL) e a forma de onda (áudio).

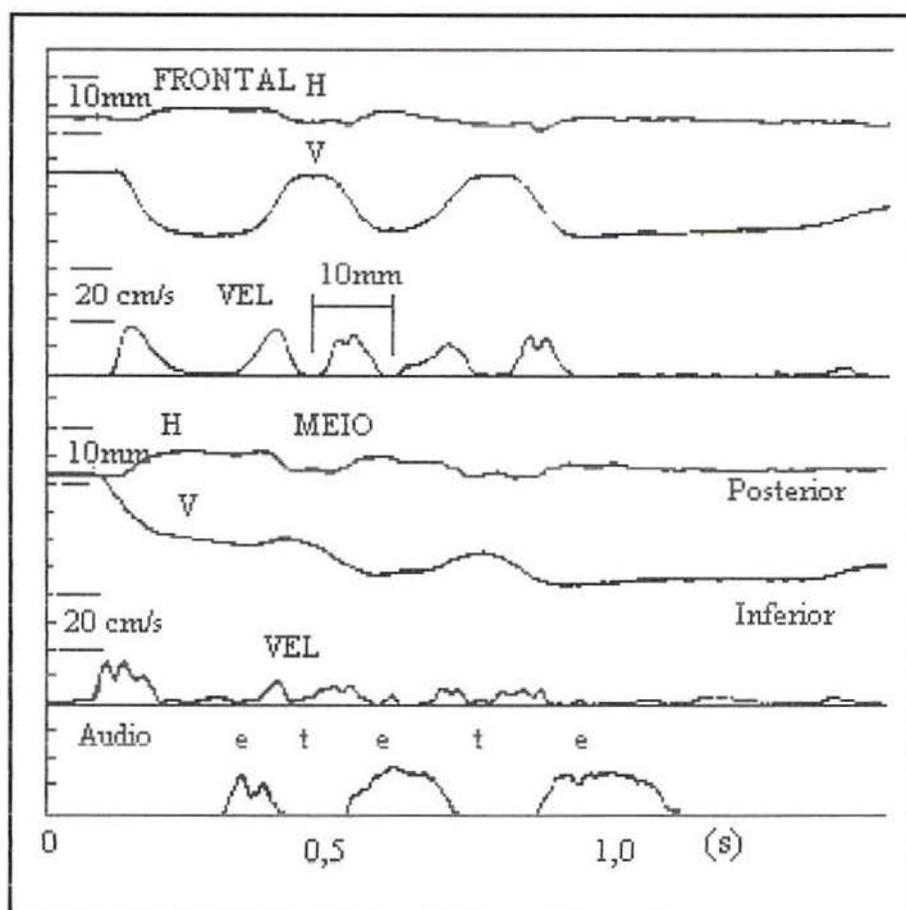


Fig. 2.7- Padrões de movimento da língua (em dois pontos, um a 10 e outro a 38 mm da ponta da língua) durante a pronúncia de etete [SON92].

2.1.4 - Medida de movimentos mandibulares [PIE91][LEM76a][LEM76b]

Este tipo de medida já vem sendo buscado a muito tempo; [PIE91]. Muitos foram os métodos utilizados, desde técnicas cinematográficas até modernos aparatos ópticos ou magnéticos.

Neste trabalho serão considerados apenas os sensores magnéticos. A intenção do instrumento específico é mostrar em três planos distintos os

movimentos simultâneos de deslocamento lateral, frontal e superior de um ponto de referência fixado na mandíbula.

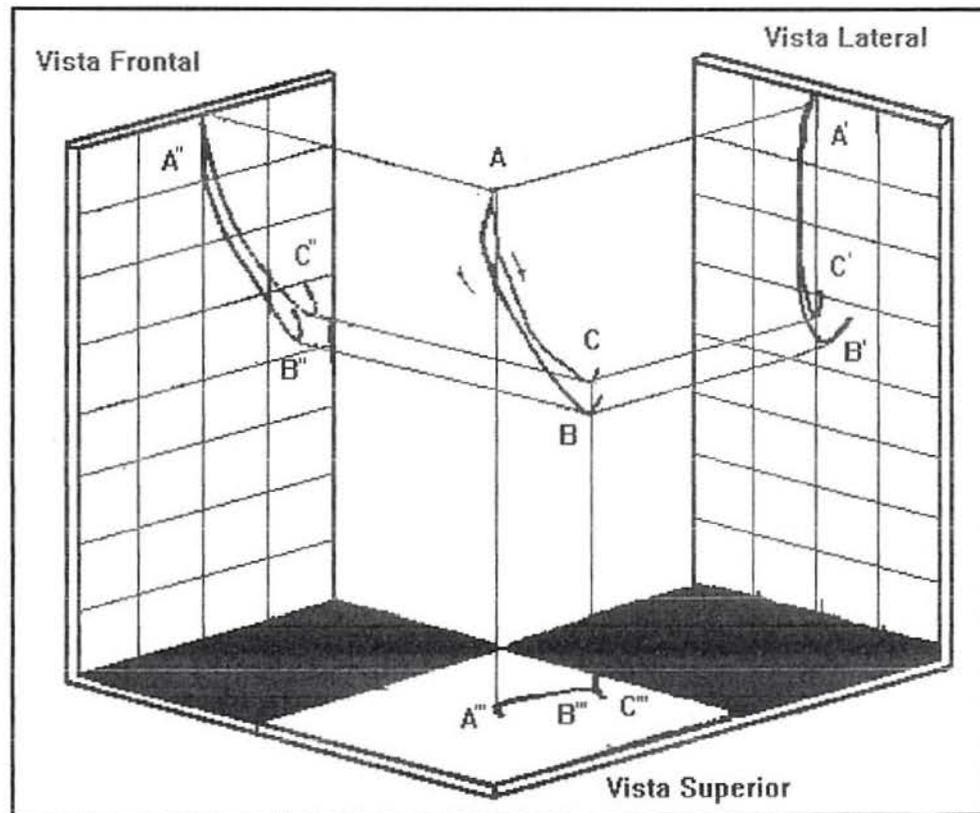


Fig. 2.8- Projeção de um movimento em 3 dimensões (de B para A e depois de A para C) em três planos distintos (frontal, lateral e superior) [HAN77].

Este tipo de medida permite diagnosticar disfunções em processos de mastigação devido a problemas articulares tendo como conseqüências diretas dor de cabeça constante, espasmos, etc.

JANKELSON, SWAIN, CRANE e RADKE mostram aplicações de fluxgates (ver item 3.1) [JAN75] dispostos geometricamente nos vértices de um cubo imaginário, de modo que percebam a variação do campo causada pela variação da posição do ímã fixado nos dentes incisivos como na fig. 2.9.

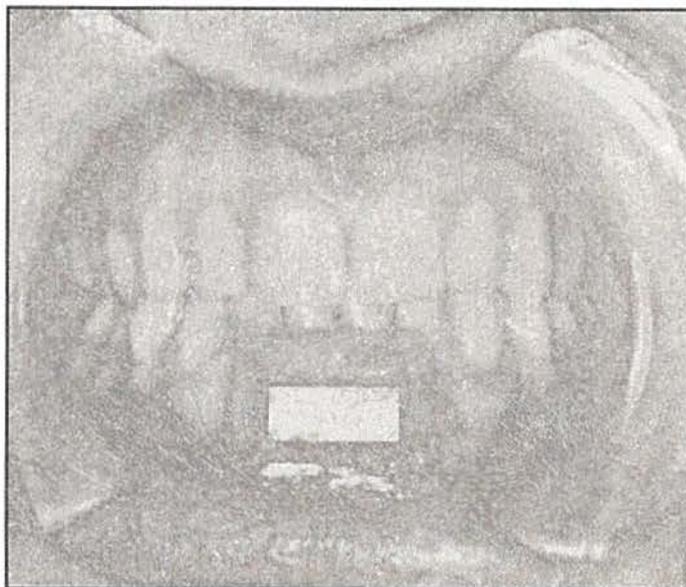


Fig. 2.9 - Exemplo da fixação do magneto no interior da boca do paciente [JAN75].

Também pode-se citar esta aplicação para outros sensores como os de efeito Hall (ver item 3.2) [LEM76]. A fig. 2.11 mostra 3 pares deste sensor onde a medida é feita sempre com 2 sensores relativos, ou seja, se a tensão relativa a um sensor aumentar, a tensão no sensor simétrico (do par) deve diminuir.

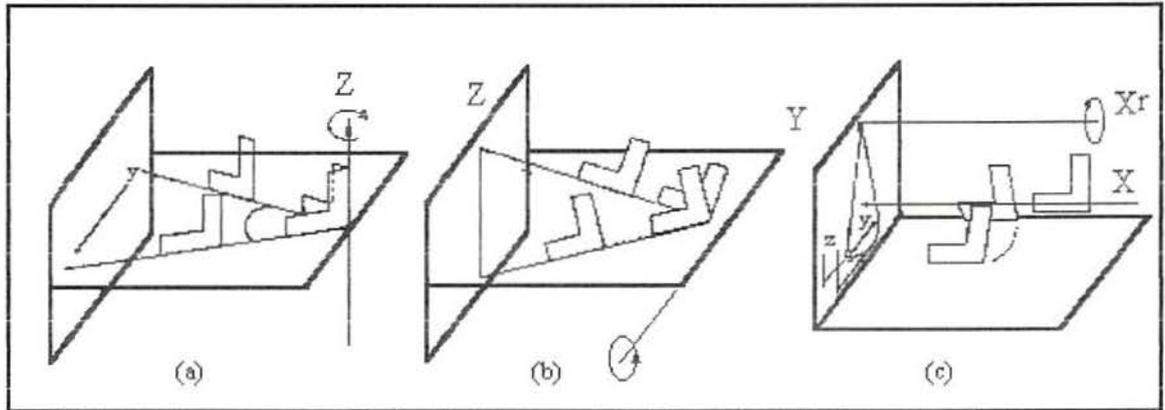


Fig. 2.10 - (a) A rotação sobre o eixo z , causa uma variação que será percebida pelos sensores do eixo Y . (b) rotação sobre o eixo Y causa uma perturbação nos sensores que estão no eixo z . (c) rotações no eixo X passando pelo centro do magneto não causam alteração em nenhum dos transdutores, já rotações no eixo X (X_r) fora do centro do magneto causarão variações em todos os transdutores [LEM76a].

Observa-se que esta técnica não permite uma visualização direta do verdadeiro movimento no plano se for analisado apenas um sinal por vez, é necessário comparar um sinal com o outro para determinar o plano.

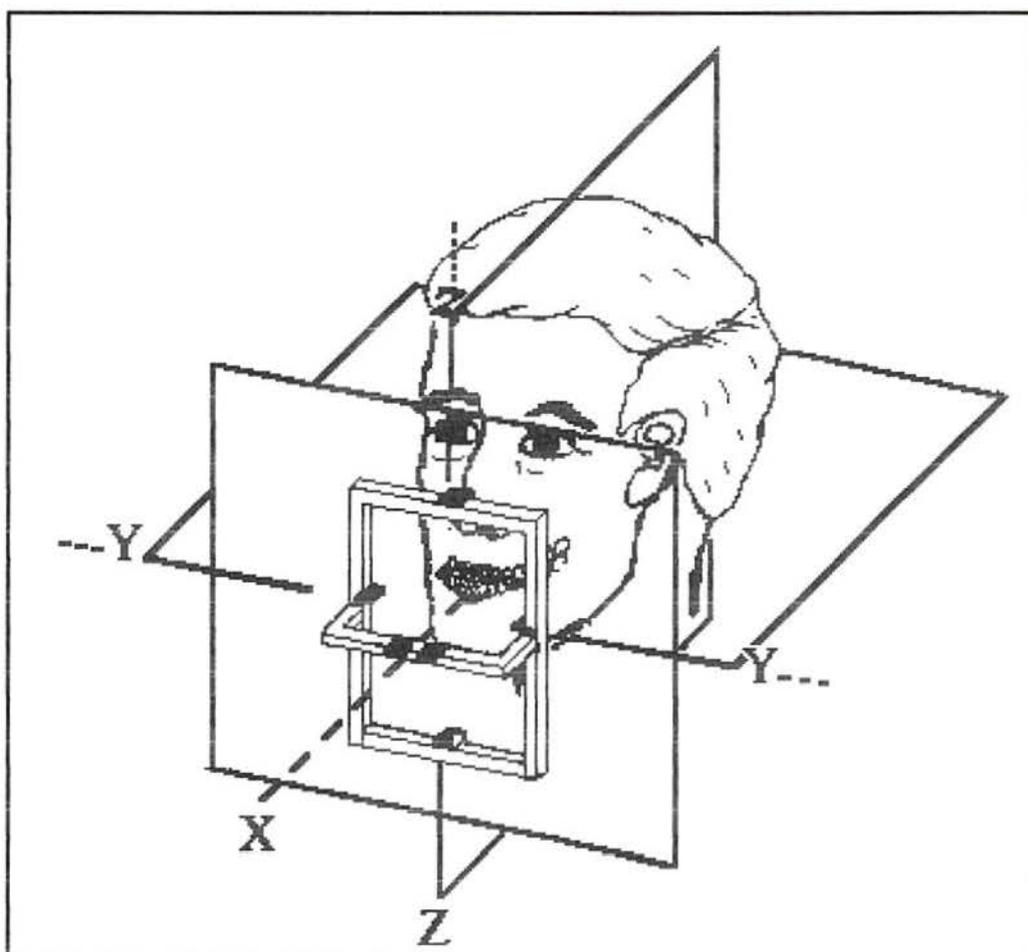


Fig. 2.11 - Sistema de coordenadas determinando os três planos desejados (frontal, lateral e superior) [LEM76b].

Introduzindo uma variável tempo, através de uma diferenciação obtém-se a velocidade do ponto e diferenciando uma segunda vez obtém-se a aceleração do mesmo, como pode ser visto na fig. 2.13.

Outro sensor também utilizado nesta aplicação é um magnetômetro de construção muito simples baseado no mesmo princípio do fluxgate, com um núcleo, uma bobina e dois *mos-fets*; nesse caso, utiliza-se 8 sensores [HAR89].

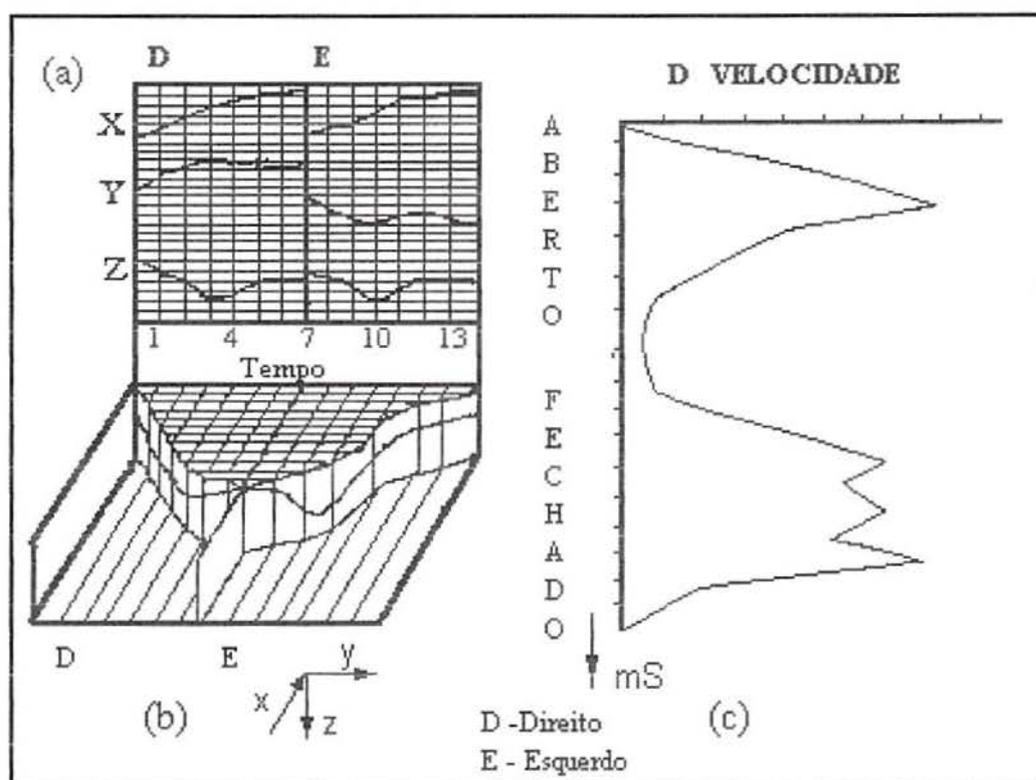


Fig. 2.12 - (a) Representação dos três deslocamentos (3 eixos) durante um movimento de deslocamento lateral e anterior da mandíbula (excursão lateral direita e esquerda da mandíbula com os dentes deslizando -superiores com inferiores-). Em (b) a representação tridimensional do deslocamento do magneto para o mesmo movimento. (c) A velocidade de abertura e fechamento da mandíbula (velocidade de deslocamento do ponto magnético) [LEM76b].

2.1.4.1 - Equipamentos comerciais

A literatura [NEI86] tem mostrado pelo menos dois fabricantes que são, respectivamente:

a) *Myotronics Research Inc., Seattle, Wash. com seu Mandibular Kinesiograph*

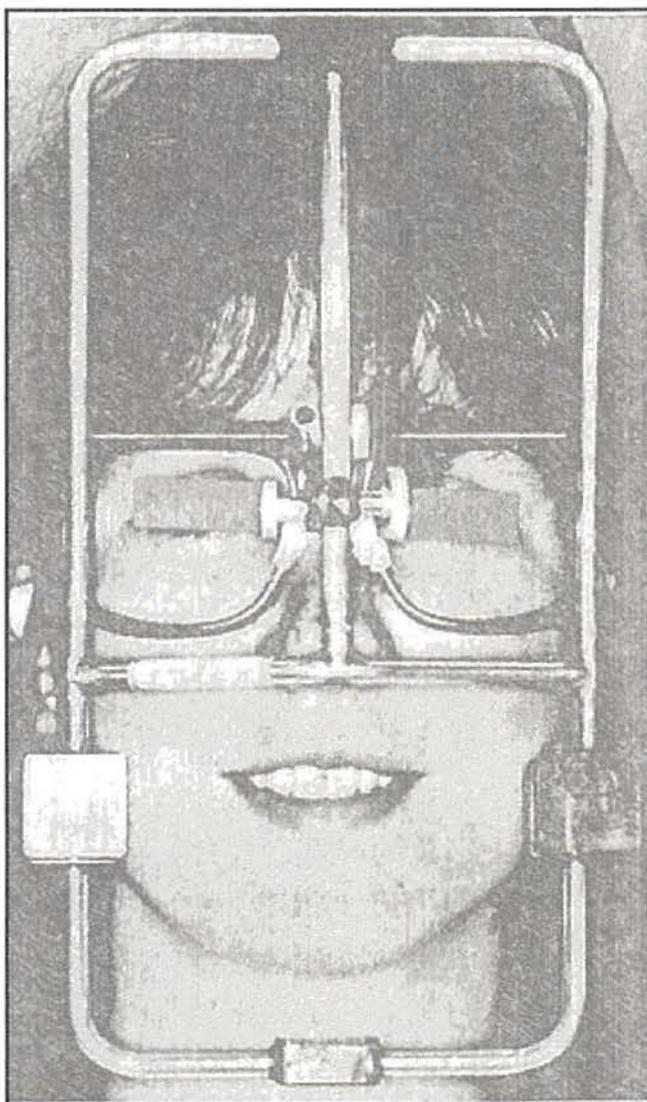


Fig. 2.13 - Kinesiógrafo mandibular [NE186].

b) *Siemens AG, Bereich Medizinische Technik, Kaufmannschelietung, Germany com seu Sirognathograph:*

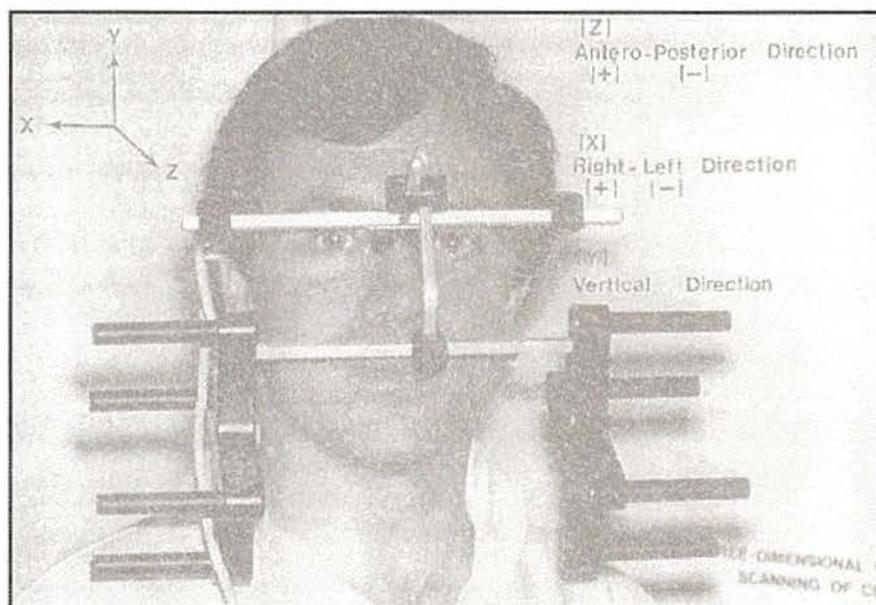


Fig. 2.14 - Sirognatógrafo (Siemens) [TAL91].

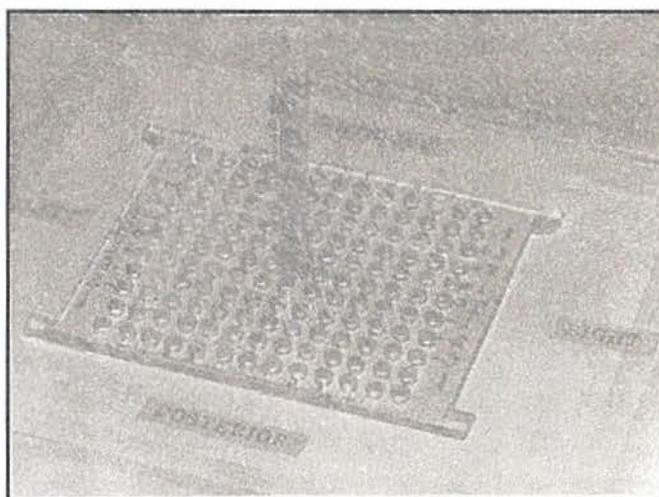


Fig. 2.15 - Dispositivo para calibração do Sirognatógrafo nos eixos x,y e z. Uma matriz padrão possui encaixes para uma haste que possui em sua ponta um magneto. Dessa forma, tem-se uma matriz de pontos de referência [TAL91].

2.2 - Outras Aplicações

Aplicações de uso geral desde laboratórios de pesquisa até chão de indústria podem ser citadas :

- a) Medidas de correntes sem contato, numa faixa muito extensa desde μA como se verá na seção 3.5 até milhares de amperes com sensores do tipo Hall.
- b) Mesas digitalizadoras (seção 3.4).
- c) Contagem de peças sem contato.
- d) Medidas de deslocamento.
- e) Medidas de deslocamento angular.
- f) Leituras magnéticas de dispositivos de armazenagem.
- g) Laços de controle.

Enfim, dependendo da faixa de uso e das condições expostas, a medida sem contato poderá ser feita por diferentes sensores magnéticos. No capítulo 3 serão apresentados 5 diferentes sensores magnéticos juntamente com detalhes de aplicações aqui citadas.

CAPÍTULO 3

SENSORES MAGNÉTICOS

Seja pelas características de sensoriamento sem contato, seja pela necessidade de medições em ambientes hostis, ou mesmo por características como confiabilidade (maior insensibilidade a choques mecânicos, flutuações de temperatura, radioatividade) e alta sensibilidade a campos magnéticos, estes sensores são cada vez mais utilizados.

Esta crescente busca, juntamente com o avanço de tecnologias relacionadas com novos materiais e suas características, permitiu uma melhora do rendimento e um grande desempenho, fazendo com que atualmente se tenha uma gama muito grande deste tipo de sensores, que apesar de terem os mesmos fins (medir intensidade de campo magnético) podem funcionar baseados em diferentes princípios físicos, como será observado.

3.1 - FLUXGATES

3.1.1 - Introdução [PRI79][GOR72]

Um *fluxgate* é um sensor utilizado para medir intensidade de campo magnético, que se baseia em características magnéticas não lineares de um núcleo de material ferromagnético. Trata-se de um sensor direcional que mede a componente de campo paralela ao eixo da bobina.

Os primeiros *fluxgates* foram introduzidos na década de 1930. Sua aplicação foi direcionada para aeronaves de inspeção geomagnéticas e para detecção de submarinos na segunda guerra mundial. Eles foram desenvolvidos para estudos geomagnéticos (aeronaves, submarinos, etc), para exploração

mineral e também foram adaptados e desenvolvidos para vários instrumentos de detecção e reconhecimento para uso civil e militar.

Com o começo da era espacial, nos anos 50 o *fluxgate* foi adaptado para a magnetometria espacial. O primeiro satélite a carregar um *fluxgate* foi o Sputnik 3, que foi lançado em 1958. Os *fluxgates* voaram em várias espaçonaves para mapear campos geomagnéticos da Terra, suas interações com partículas solares, o campo magnético lunar, os campos planetários e interplanetários. *Fluxgates* triaxiais colocados na superfície lunar por astronautas da Appolo são responsáveis por informações sobre o campo magnético lunar [GOR72].

Apesar do surgimento de novas tecnologias para sensores de campo magnético, os *fluxgates* ainda hoje continuam sendo muito utilizados em todas essas áreas, devido à sua confiabilidade, relativa simplicidade, baixo custo e robustez.

Uma das propriedades que fazem do *fluxgate* um magnetômetro muito procurado é a faixa (range) de medidas que podem ser feitas para um nível de ruído muito baixo. Para um observatório em Terra, os sensores geralmente medem variações de aproximadamente 500 nT superpostas a um campo uniforme de aproximadamente 60000 nT, neste caso a frequência e o nível de ruído são de aproximadamente 1 Hz e abaixo de 1 nT. Em foguetes e satélites de baixa altitudes, sensores individuais podem sentir campos de aproximadamente 60000 nT que variam senoidalmente com a frequência de giro; a largura de banda e os níveis de ruído são de 500 Hz e desde alguns décimos de picoteslas a alguns nanoteslas. Para missões espaciais os campos são da ordem de 1 a 10 nT, com níveis de 1% de ruído [PRI79].

3.1.2 - Princípio de funcionamento e teoria de operação [PRI79]

Um *fluxgate* consiste de um núcleo de material magnético envolvido por uma bobina (fig. 3.1).

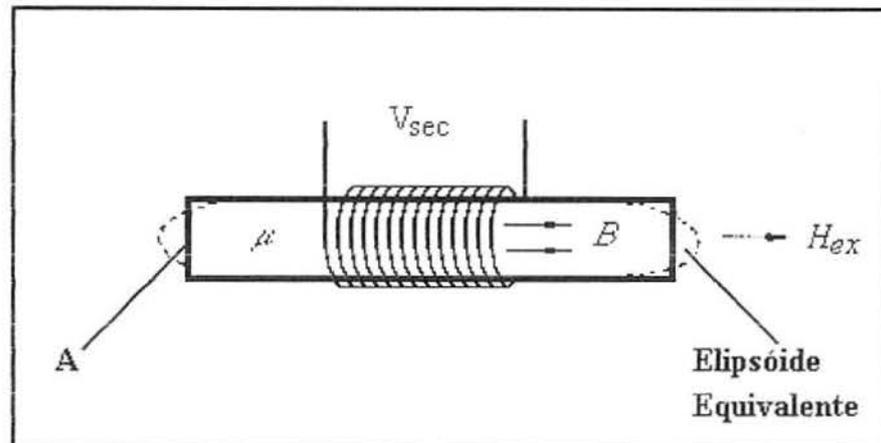


fig. 3.1 - O fluxgate básico consiste de um núcleo ferromagnético e de uma bobina. Mudanças na permeabilidade deste núcleo causam uma mudança no campo B , induzindo uma tensão na bobina (V_{sec})[PRI79].

O campo da Terra ao longo do eixo do núcleo produz um fluxo magnético $B.A$ na área de secção transversal A . Se a permeabilidade μ_r do material do núcleo é mudada, as mudanças de fluxo e a tensão V_{sec} são induzidas nas n espiras da bobina onde

$$V_{sec} = nA \frac{dB}{dt} \quad (3.1)$$

B é proporcional a B_{ext} para pequenos valores de B_{ext} , e o fator de proporcionalidade μ_a (a permeabilidade efetiva) depende do material e da geometria do núcleo:

$$B = \mu_a \times B_{ex} \quad (3.2)$$

O campo dentro do núcleo é dado por

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.3)$$

onde M , a magnetização, é proporcional a H :

$$M = \chi \cdot H \quad (3.4)$$

sendo a susceptibilidade χ o fator de proporcionalidade e H dado por

$$H = H_{ex} - DM \quad (3.5)$$

onde D é o fator de desmagnetização e

$$H_{ex} = \frac{B_{ex}}{\mu_0} \quad (3.6)$$

De (3.3) e (3.4) $B = \mu_0 H(1 + \chi)$, de (3.5) e (3.6) $H = \frac{B_{ex}}{\mu_0(1 + \chi)}$.. e fazendo

$\mu_r = 1 + \chi$ tem-se :

$$B = \frac{\mu_r B_{ex}}{[1 + D \cdot (\mu_r - 1)]} \quad (3.7)$$

Comparando com (3.2), a permeabilidade aparente é

$$\mu_a = \frac{\mu_r}{[1 + D(\mu_r - 1)]} \quad (3.8)$$

Inserindo (3.7) em (3.1) tem-se :

$$V_{sec} = nA B_{ex} (1 - D) \frac{\left(\frac{d\mu_r}{dt}\right)}{[1 + D(\mu_r - 1)]^2} \quad (3.9)$$

que é a equação básica do *fluxgate*.

3.1.3 - A variação da permeabilidade do material do núcleo [PRI79]

A ação do *fluxgate* é baseada no tempo de variação da permeabilidade do núcleo. Vários tipos de sensores já foram implementados desde ASCHENBRENNER e GOUBAU, (1928) quando implementaram um *fluxgate* com um núcleo tipo anel para medir distúrbios magnéticos.

Quando o material magnético é saturado, sua permeabilidade, bem como sua magnetização decrescem. A figura 3.2 mostra a curva de magnetização para um material de ferrite.

Pode-se observar que a inclinação da curva $\mu_r = \frac{dB}{\mu_0 dH}$ varia com a mudança do campo H aplicado. A variação da densidade de fluxo no núcleo induz uma tensão na bobina, e se dois núcleos opostamente magnetizados são colocados dentro da mesma bobina, as duas magnetizações se cancelam, e a única mudança de fluxo é causada por um campo externo B_{ex} e as consequentes variações da permeabilidade.

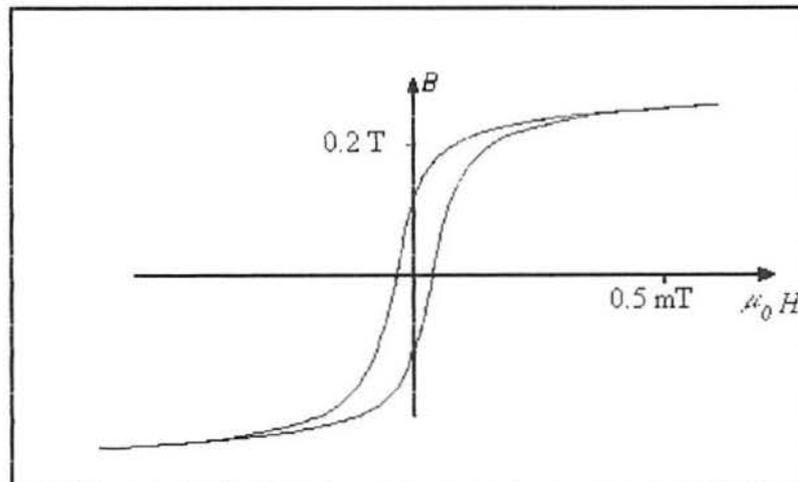


Fig. 3.2 - Detalhe da curva de magnetização B contra $\mu_0 H$ para um tubo de Permax 51 ferrite [PRI79].

Sensores deste tipo são mostrados na fig. 3.3. O sensor de VACQUIER possui dois núcleos dentro da mesma bobina. Cada núcleo possui uma bobina

de magnetização, e estas bobinas tem enrolamento em direções opostas. O sensor tipo anel foi usado por ASCHENBRENNER e GOUBAU, (1928) e GEYGER, (1957). Os sensores de VACQUIER e FÖRSTER foram desenvolvidos nos anos 40.

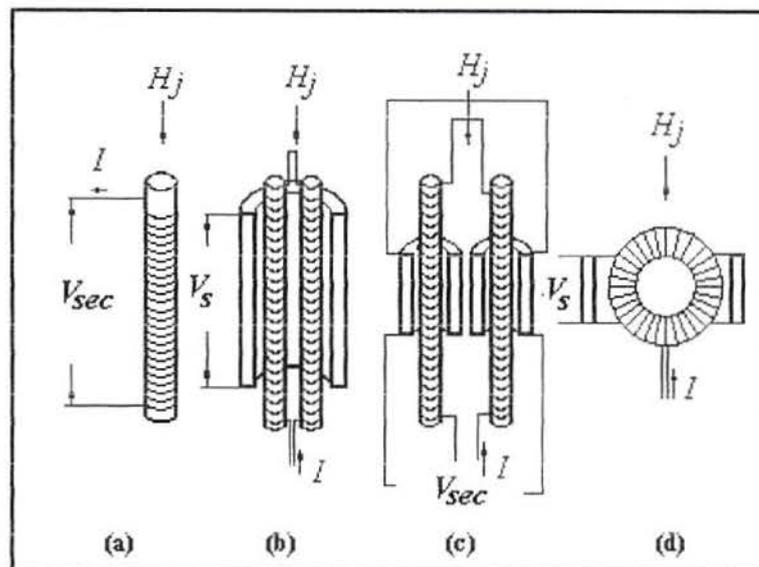


Fig. 3.3 - Sensores que possuem o campo de magnetização paralelo ao campo externo H_j . (a) Núcleo simples, (b) VACQUIER, (c) FÖRSTER, (d) ASCHENBRENNER e GOUBAU [PRI79].

O sensor de núcleo simples despreza a presença de um campo de desbalanço; foi extremamente utilizado para análises geológicas (WINCKOFF, 1948) e aplicações a aeronaves (PELEN, 1966).

Os sensores descritos acima tem o campo de magnetização H paralelo ao campo externo B_{ex} . Por esta razão eles são caracterizados como sensores paralelos. A fig. 3.4 mostra sensores *fluxgates* com o campo de magnetização ortogonal ao campo externo.

A bobina é desacoplada do campo de magnetização, e somente um núcleo é necessário. O primeiro sensor da fig. 3.4 é um fio ferromagnético

portando uma corrente de magnetização (BERSHTEIN, 1944, PALMER, 1953); o segundo é um tubo de material ferromagnético com a bobina enrolada toroidalmente (ALLDREDGE, 1958), e o último sensor (SCHONTEDT, 1959) é uma mistura de um *fluxgate* paralelo com um ortogonal onde o material ativo é uma película enrolada de forma helicoidal sobre um tubo de suporte cerâmico.

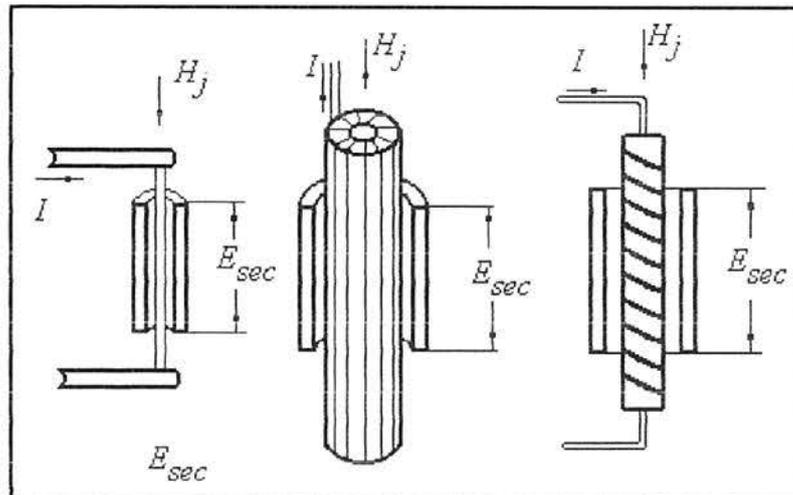


Fig. 3.4 - Sensores em que o campo de magnetização é ortogonal ao campo externo H_j [PRI79].

Os sensores apresentados até aqui são sensíveis a componentes de um campo externo na direção do eixo do sensor. Os sensores de núcleo tipo anel apresentam a possibilidade de detectar componentes de um campo externo em duas direções. Na fig. 3.5 pode-se ver duas bobinas de sinal perpendiculares entre si (ACUÑA e PELLERIN, 1969).

Além das geometrias citadas até aqui, ainda pode-se encontrar bibliografias que falam sobre bobinas esféricas para detecção de vetores triaxiais [PRI81], [EVE66].

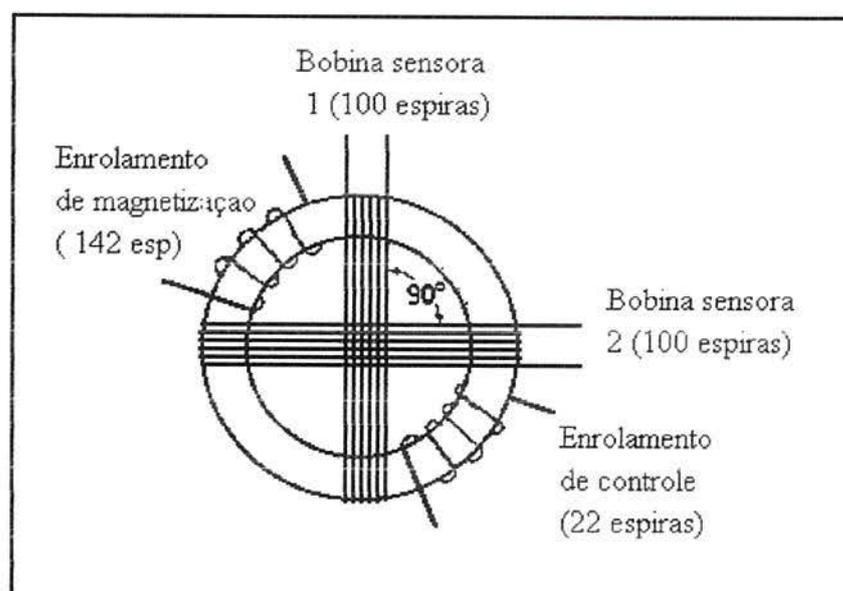


Fig. 3.5 - Sensor com núcleo tipo anel com duas bobinas sensoras (ACUÑA E PELLERIN, 1969) [PRI79].

Muitos materiais têm sido testados e utilizados durante os anos; *Mumetal* e *permalloy* tem sido os mais usados. ASCHENBRENNER e GOUBAU, (1936) utilizaram uma barra de ferro comum; ferrite também tem sido usado (LING, 1964) e ainda filmes ferromagnéticos muito finos depositados em quartzo (TAKEUCHI, 1973) ou num condutor cilíndrico (GISE e YARBROUGH, 1975).

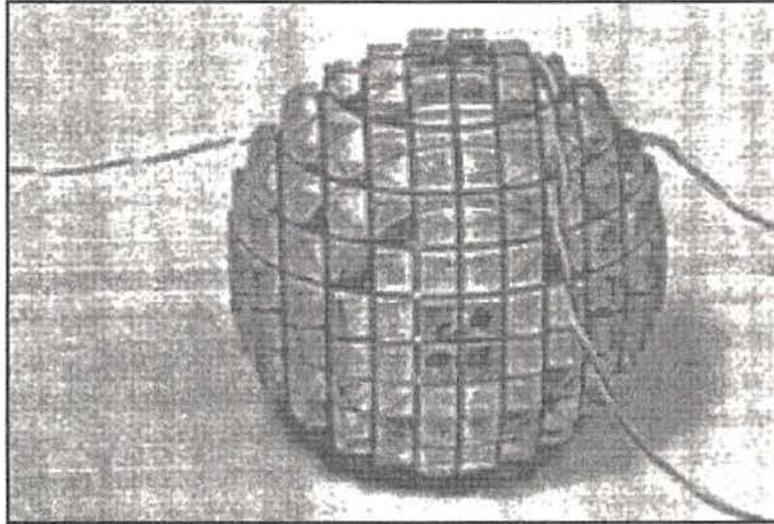


Fig. 3.6 - Bobina esférica compacta para detectar vetores triaxiais do campo magnético terrestre [PRI82].

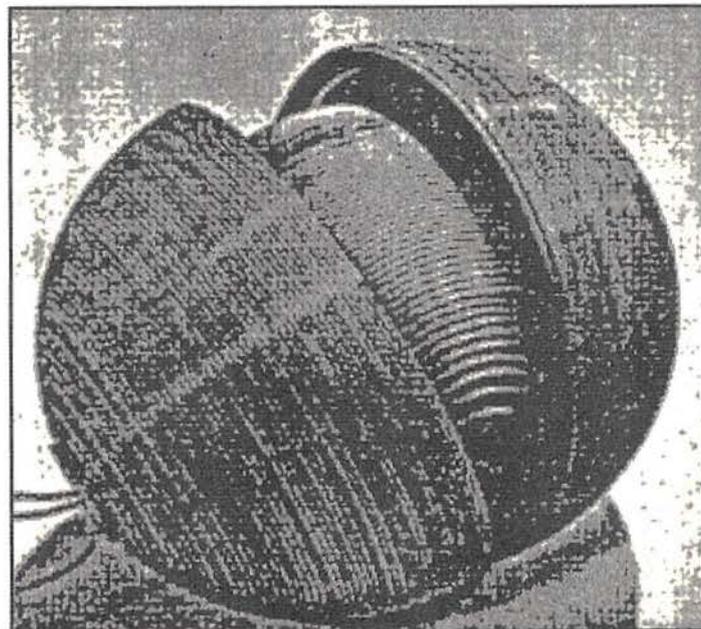


Fig. 3.7 - Detalhes de construção de uma bobina triaxial [EVE66].

3.1.5 - Métodos para detecção [PRI79]

Quando se aplica uma corrente de excitação senoidal, capaz de saturar o núcleo. A tensão de saída terá o dobro da frequência do sinal de excitação devido ao fato de existir saturação do núcleo em ambos os sentidos da corrente (fig 3.8).

Um dos métodos mais conhecidos para detecção de sinal de um sensor do tipo *fluxgate* é o método de detecção de segunda harmônica. A fig. 3.9 mostra um diagrama de blocos de um detetor deste tipo.

Na fig. 3.9 pode-se ver um gerador que tem a função de produzir a corrente de magnetização responsável pela saturação do núcleo. Quando o núcleo está saturado, a permeabilidade é reduzida; isso acontece tanto nos picos positivos como nos negativos; dessa forma a variação da permeabilidade do núcleo μ terá o dobro da frequência de magnetização.

O sinal de segunda harmônica, após amplificado e filtrado pode ser captado por um detetor síncrono (excitado pelo próprio gerador do *fluxgate*, porém com o dobro da frequência).

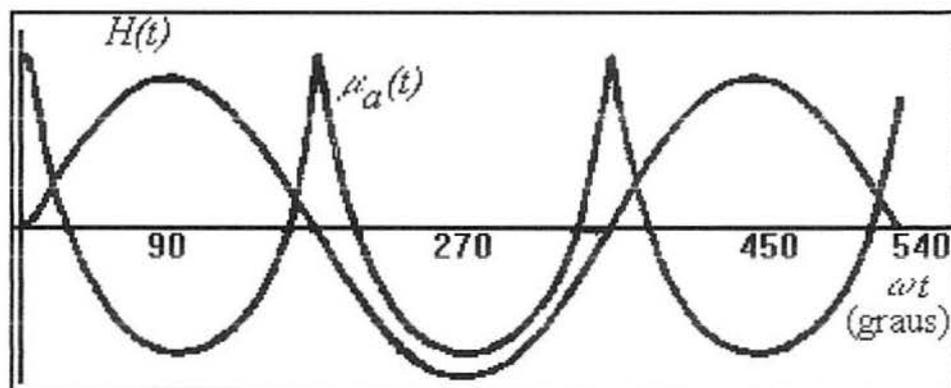


Fig. 3.8 - Permeabilidade aparente $\mu_a(t)$ e campo magnético de excitação senoidal $H(t)$ como função do tempo para um sensor de núcleo tipo tubular de ferrite [PRI79].

Pode-se observar também que no diagrama da fig. 3.9 aparece um laço de realimentação ligado ao sensor. No caso, este laço tem a função de anular o fluxo de desbalanço, através de uma bobina auxiliar de cancelamento de campo, caracterizando um sensor de ponto nulo que segundo PRIMDAHL, [PRI79] é muito mais estável que o sensor de tensão para o mesmo campo externo.

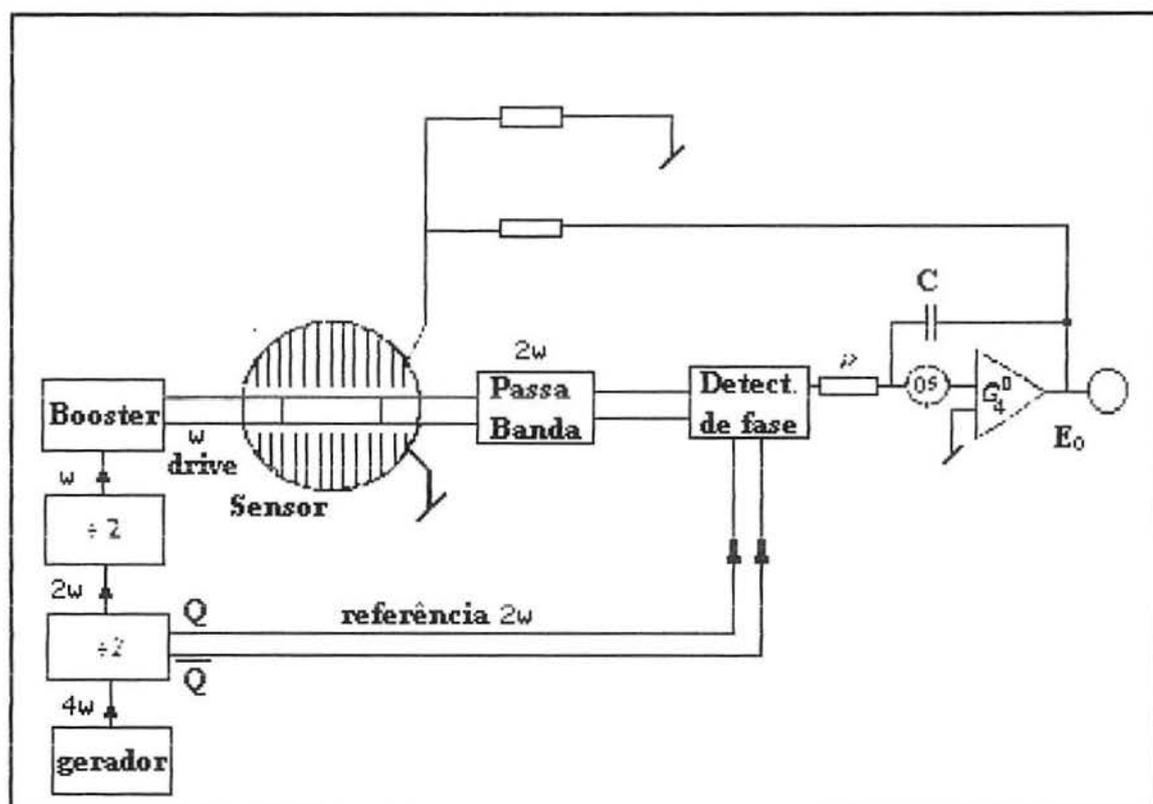


Fig. 3.9 - Diagrama em blocos do circuito eletrônico de um detector de segunda harmônica para um magnetômetro do tipo fluxgate, com detecção por desbalanço de campo [PRI79].

3.2 - SENSORES DE EFEITO HALL

3.2.1 - Histórico e princípios físicos [POP91]

O efeito Hall é assim chamado devido a sua descoberta ter sido feita pelo físico americano chamado E. H. Hall em 1879. Estudante de graduação, Hall estava interessado em provar que um magneto afeta diretamente a corrente e não o condutor, que era o que se acreditava na época.

O experimento era composto de folhas de ouro montadas em um prato de vidro, e uma corrente era introduzida nessas folhas, as quais estavam monitoradas nas bordas por um galvanômetro muito sensível. As folhas de ouro foram colocadas entre os pólos de um eletromagneto e dessa forma Hall observou que uma força eletromotriz surgia entre os mesmos, e concluiu que esta F_{em} era proporcional ao produto da indução magnética e a velocidade dos elétrons, ou seja:

$$V_H \approx [v \times B] \quad (3.10)$$

O efeito Hall está relacionado com a força de Lorenz, que define a interação de uma carga em movimento com um campo magnético. Quando um condutor é exposto a uma indução magnética transversal, os elétrons em movimento são repelidos para uma das bordas. A concentração de elétrons nessa borda causa um campo elétrico, que por sua vez forma uma força eletrostática contrária a força resultante do campo magnético (força de Lorenz). O efeito do campo elétrico somente anula o efeito do campo magnético, determinando o equilíbrio de forças. O campo elétrico transversal ao condutor causa uma diferença de potencial entre as duas bordas deste condutor, conhecida como tensão Hall V_H . Esta tensão Hall varia com o tipo de condutor que é exposto ao campo magnético. Devido às pequenas dimensões dos condutores e especialmente à baixíssima velocidade de deslocamento dos elétrons, normalmente a tensão Hall não é mensurável na maioria dos materiais.

Em mais de 100 anos de história, instrumentos baseados no efeito Hall têm sido utilizados para demonstrar leis básicas de Física, detalhes de portadores em fenômenos de transporte em sólidos, para detectar a presença de magnetos, bem como medir intensidade de campo magnético. Conhecendo alguns parâmetros (como a geometria), através da tensão Hall pode-se deduzir algumas importantes propriedades de determinado material. Neste caso o sensor Hall é aplicado como meio de caracterização do material.

As aplicações técnicas somente se fizeram possíveis, na metade dos anos 50, com a descoberta de alguns semicondutores que possuem baixa concentração e alta mobilidade de portadores, nos quais a corrente não é originada de muitos portadores lentos se movimentando, mas de poucos portadores com velocidade bem maior. Dessa forma, neste tipo de semicondutores a tensão Hall é muito maior que nos metais, sendo da ordem de até 100 mV (exemplos destes condutores são InSb, InAs).

Um coeficiente, muito importante, que caracteriza a eficiência da tensão Hall no material é o coeficiente Hall (R_H). Este coeficiente está diretamente relacionado com a mobilidade e a resistividade do material¹.

$$R_H = \mu_H \cdot \rho_b \quad (3.11)$$

onde μ_H é a mobilidade dos portadores e ρ_b é a resistividade.

3.2.2 - Construção dos Sensores de efeito Hall [GAL76]

Uma corrente de controle i_1 circula através de um material de espessura d enquanto um campo magnético B é aplicado perpendicularmente ao plano. Quando estas duas grandezas são aplicadas simultaneamente uma tensão (tensão Hall), surge entre os pontos 3 e 4 (fig 3.10), e a mesma pode ser determinada por :

$$V_H = \frac{R_H}{d} \cdot i \cdot B \quad (3.12)$$

¹ Para maiores detalhes sobre coeficiente Hall consultar [POP91].

onde R_H é o coeficiente Hall, i é a corrente, B a indução de campo magnético e d a espessura da tira utilizada como sensor (para efeitos de simplificação, considera-se o comprimento d' muito maior que a espessura d [POP91] (Pg. 56-62).

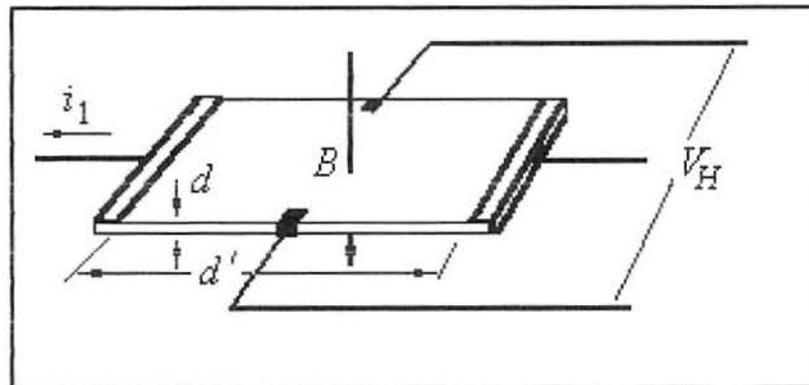


Fig. 3.10 - Principais características construtivas do sensor tipo Hall [GAL76].

O sensor Hall, em síntese consiste de um corpo semiconductor, dois terminais para dar caminho à corrente e dois eletrodos para coletar a tensão Hall.

O semiconductor pode ser classificado segundo os seguintes processos de fabricação:

a) Cristalino : O corpo semiconductor é produzido a partir de barras de semiconductor, através de corte, moagem e gravura com espessuras de 5 a 100 mm. O substrato e o semiconductor são colados por uma resina (1 a 2 mm).

b) Deposição de vapor : Uma camada de semiconductor é depositado por vapor; 2 a 3 mm de espessura. Particularmente utilizados em temperaturas muito baixas ou então muito altas.

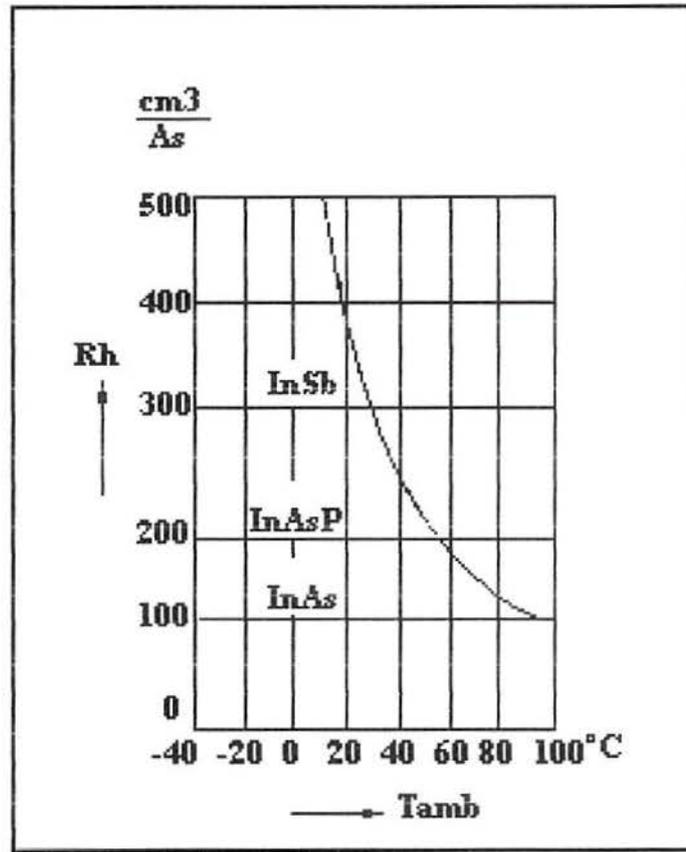


Fig. 3.11 - Dependência do coeficiente Hall R_H com a temperatura para vários materiais, e a localização aproximada de InSb, InAsP e In As [GAL76].

3.2.3 - Dependência do efeito Hall com a temperatura [GAL76]

O coeficiente R_H que depende do material, tem uma dependência muito grande com a temperatura (como se pode ver na fig. 3.11).

Esta dependência do efeito Hall com a temperatura envolve dois fatores: O coeficiente β que é definido pela variação do coeficiente R_H , e ainda outro coeficiente α que representa a dependência da resistência interna do semiconductor com a temperatura.

Estes dois fatores α e β podem ser expressos em $\%/K$:

$$a = \frac{100}{R(T_0)} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{100}{V_{20}(T_0)} \cdot \frac{\Delta V_{20}}{\Delta T} \quad (3.14)$$

3.2.4 - Características básicas: [POP91]

Quando utilizado como sensor magnético, a saída do sensor Hall deve ser considerada como a saída de um transdutor. A componente normal da indução magnética é então o sinal de entrada e a saída é a própria tensão Hall. A seguir serão apresentados os coeficientes básicos do sensor Hall, caracterizando sua operação como um transdutor de indução magnética/tensão Hall.

3.2.4.1 - Sensibilidade [POP91]

É o parâmetro mais importante. Pode-se definir densidade absoluta como

$$S_A = \left(\frac{V_H}{B_{\perp}} \right)_C \quad (3.15)$$

onde V_H é a tensão Hall, B_{\perp} é a componente normal de indução magnética e C é o conjunto de outras variáveis do sistema que são mantidas constantes como temperatura, frequência e corrente de excitação.

3.2.4.2 - Offset-equivalente à indução magnética [POP91]

A tensão de offset na saída do sensor Hall não pode ser distinguida do sinal relativo a indução magnética. Para caracterizar o erro na medida causado pelo *offset* é necessário fazer um pequeno cálculo :

$$B_{off} = \frac{V_{off}}{S_A} \quad (3.16)$$

Esta quantidade é o offset equivalente da indução magnética.

O maior causador de *offset* em sensores Hall são imperfeições na fabricação dos mesmos, como não uniformidade da resistividade e espessura do material. Tensões mecânicas (*stress*) na combinação com o efeito piezoresistivo também pode causar *offset*.

3.2.4.3 - Ruído equivalente de indução magnética [POP91]

O ruído na saída do sensor Hall pode ser interpretado como o resultado de uma indução magnética atuando como ruído num sensor Hall.

Uma maneira coerente para descrever as propriedades do ruído de um sensor é em termos de um limite de detecção. O limite de detecção é o valor da medida da correspondente relação sinal/ruído.

3.2.4.4 - Sensibilidade a fatores externos (*Cross Sensitivity*) [POP91]

Esta figura de mérito (*cross sensitivity*) do sensor magnético é a sensibilidade indesejada a outros parâmetros do ambiente como temperatura e pressão. A sensibilidade cruzada para um parâmetro pode ser calculada pela quantidade :

$$PC = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial P} \quad (3.17)$$

Por exemplo, se P é temperatura, então PC se torna TC, que é o coeficiente de temperatura. Na equação 3.16, S denota a sensibilidade magnética do sensor Hall.

3.2.4.5 - Não Linearidade [POP91]

Em algumas aplicações de sensores Hall como sensores magnéticos, é particularmente importante que a relação de proporcionalidade $V_H = I \cdot B_{\perp}$ seja muito precisa. Neste caso, V_H é a tensão Hall, com uma corrente I e uma indução magnética B_{\perp} .

Como fonte de não linearidade pode-se citar a não linearidade oriunda do material NL_M , que é definida como

$$NL_M \approx -\alpha \mu_H^2 B^2 \quad (3.18)$$

onde μ_H é a mobilidade e α é o coeficiente de não linearidade do material² e B a indução magnética. Outra fonte de não linearidade resulta da geometria do próprio semiconductor do qual é construído o sensor NL_G , que é definido por

$$NL_G \approx \beta \mu_H^2 B^2 \quad (3.19)$$

onde β é o coeficiente de não linearidade oriundo da geometria do material³.

Outra fonte de não linearidade que pode-se identificar num sensor Hall é o efeito de campo da junção, NL_{JFE} , que depende da estrutura do sensor e das condições de polarização, em contraste com as duas primeiras causas de não linearidade que são dependentes do quadrado do campo magnético e independentes da polarização.

² α depende dos fatores de rede (que estão relacionados com os tempos de relaxação dos portadores) [POP91] pg 133.

³ O coeficiente β pode variar de 0 a 0.604. Este valor é dependente de um fator de correção geométrica, necessária devido ao ângulo Hall [POP91] pg 169.

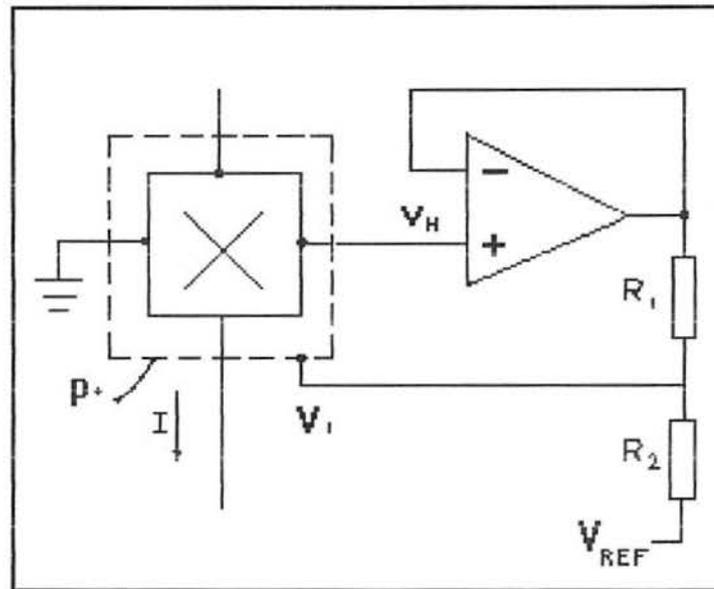


Fig. 3.12 - Um circuito para compensação do efeito de campo da junção, o quadrado tracejado representa a área do sensor Hall [POP91].

Geralmente a não linearidade originada pelo efeito de campo da junção é dominante, mas felizmente usando técnicas adequadas de compensação como na fig. 3.12, ela pode ser completamente anulada. Neste caso é utilizado um invólucro (jaqueta que faz contato com o sensor) com uma tensão aplicada (V_i), dependente do valor da tensão Hall e de polaridade invertida. No caso, esta tensão aplicada vai anular o efeito indesejado da NL_{JFE} [POP91] pg 215.

3.2.4.6 - Estabilidade [POP91]

O coeficiente Hall não pode ser considerado como um parâmetro absolutamente estável, e como se sabe a sensibilidade do sensor Hall é diretamente proporcional a este coeficiente. Um exemplo disso é que quando submetido a uma tensão mecânica, devido ao efeito *piezo-Hall*, o coeficiente Hall de um sensor com semiconductor tipo n de baixa dopagem, pode variar até 2,5%.

A sensibilidade relativa do sensor Hall também depende diretamente da densidade superficial de cargas. Dessa maneira, qualquer efeito físico que

venha a causar qualquer variação na densidade de portadores pode causar instabilidade.

Sensores de alta sensibilidade tendem a ser instáveis. Quanto maior a sensibilidade do sensor Hall, maior será a influência dos efeitos superficiais nele mesmo. Felizmente existem métodos de correção muito eficientes para estes efeitos apresentados de instabilidade, assim os sensores de efeito Hall podem ser extremamente estáveis.

3.2.5 - Aplicações [POP91] [GAL76]

Um sensor magnético Hall pode ser utilizado como magnetômetro e dessa forma relacionar informação de campo magnético com deslocamento mecânico, medidor de corrente, medidor de potência, etc. A seguir serão apresentados alguns exemplos :

3.2.5.1 - Transdutores de deslocamento mecânico

O princípio do transdutor de deslocamento envolvendo um sensor magnético é ilustrado na fig. 3.13. O transdutor consiste da combinação de um ímã permanente e um sensor magnético (Hall).

O magneto é acoplado ao objeto cujo deslocamento está sendo monitorado enquanto o sensor Hall permanece estacionário. O campo magnético do ímã visto pelo sensor depende da distância entre o ímã e o mesmo:

$$B_{\perp} = f_1(x, y_0) \quad (3.20)$$

e

$$B_{\perp} = f_2(x_0, y) \quad (3.21)$$

Se estas funções são conhecidas, pode-se determinar as coordenadas x e y pelas medidas da indução magnética.

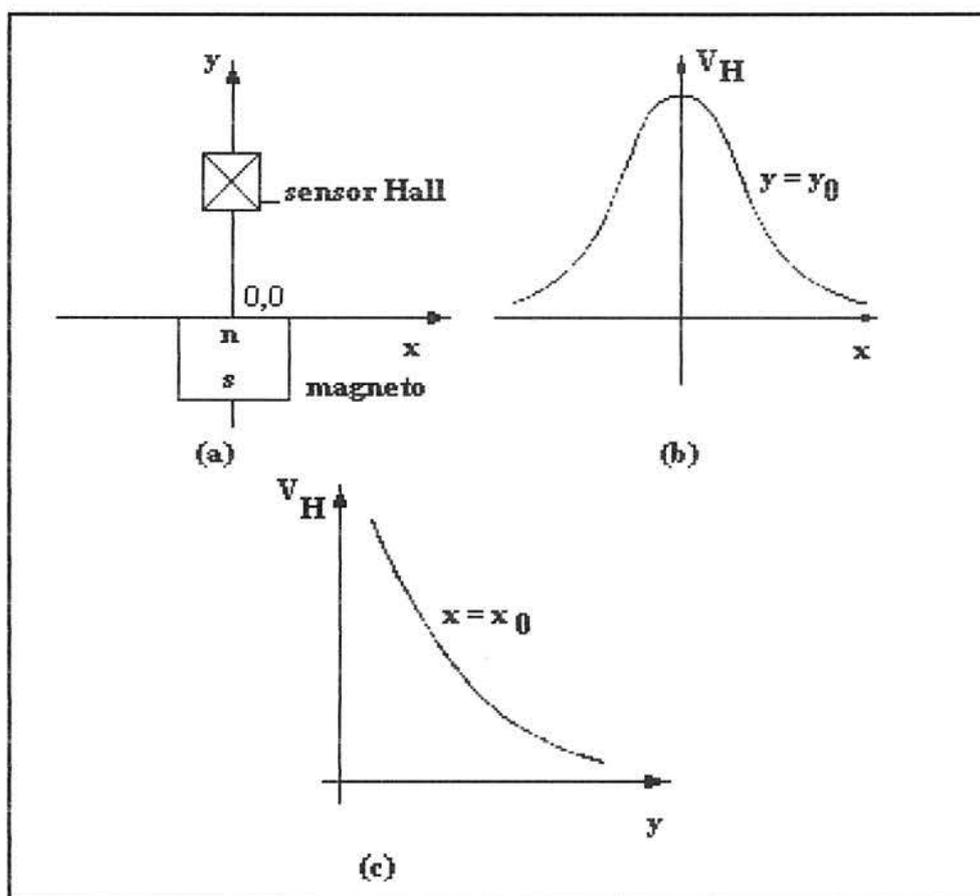


Fig. 3.13 Um sensor Hall usado como sensor de deslocamento. (a) A configuração básica. (b) A tensão Hall como função do deslocamento relativo ao longo do eixo x . (c) O mesmo de (b) mas para o eixo y [POP91].

Uma aplicação direta, e que depende de uma medida muito precisa para deslocamentos muito pequenos pode ser vista na fig. 3.14 onde um transdutor de deslocamento se encontra dentro de uma câmara de pressão. Neste arranjo tem-se um ímã permanente fixado a um diafragma de um sensor de pressão. Sob pressão, este diafragma se desloca para baixo e o magneto se move em relação ao sensor Hall que está fixo. Esta pressão é então convertida em tensão Hall.

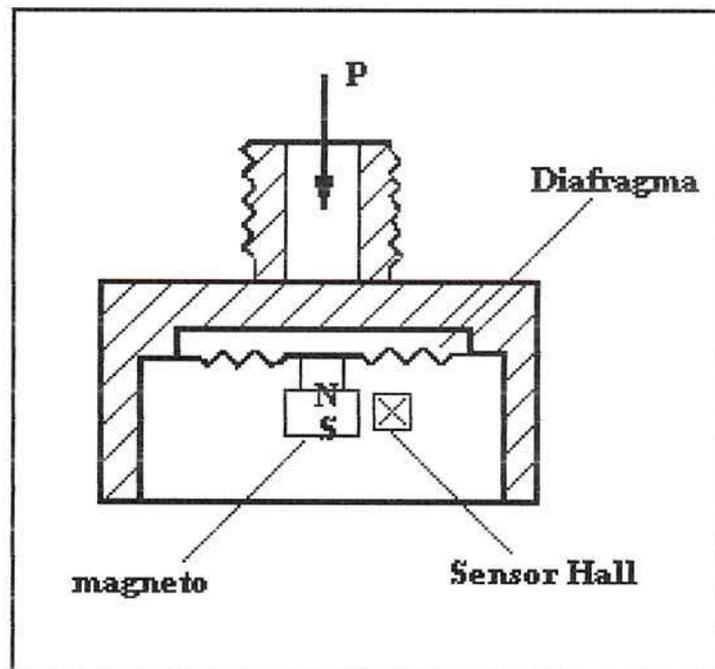


Fig. 3.14 Um transdutor de deslocamento baseado num sensor Hall, aplicado como sensor de pressão. O ímã permanente é fixado na diafragma. Quando o diafragma deflete devido a uma pressão P , o sensor Hall detecta esta perturbação [POP91].

3.2.5.2 - Medidas de corrente elétrica, potência e Energia

associados à corrente elétrica. Dessa forma a medição de indução magnética é uma medição indireta de corrente. Uma vez que a indução magnética B é exatamente proporcional a corrente i , a medida de corrente pode ser efetuada sem ter que abrir o circuito ou fazer qualquer contato entre o condutor e o instrumento. A fig. 3.15 ilustra um arranjo básico para efetuar esta medida. Um condutor de corrente passa por um anel magnético que possui um *gap* (l_0), onde é colocado o sensor. Este anel é construído de um material ferromagnético com alta permeabilidade.

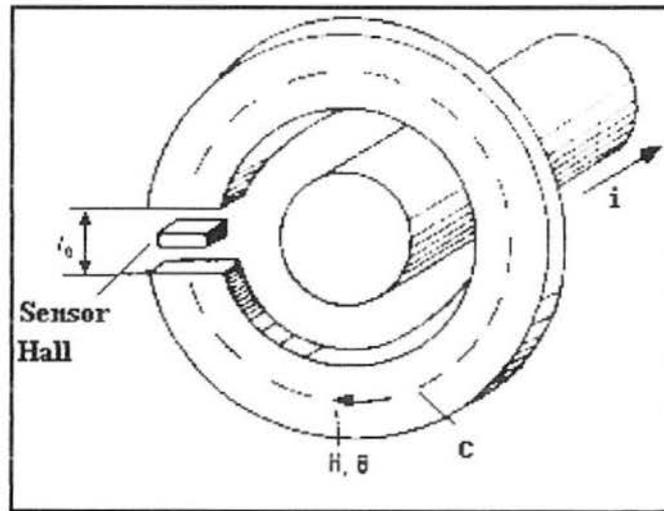


Fig. 3.15 - Arranjo básico para medidas de grandezas elétricas. A tensão Hall é proporcional a B (que é proporcional a i) [POP91].

Pela lei de Ampere :

$$i = \oint_c H dl = H_o l_o + H_y l_y \quad (3.22)$$

Onde i é a corrente no condutor, H o campo magnético e a integração é feita no caminho fechado c . H_o e l_o são os campos magnéticos no *gap* de ar e seu comprimento, respectivamente, e H_y e l_y são o campo magnético e o comprimento total do anel.

Substituindo $H = \frac{B}{\mu_o \mu_r}$, μ_o sendo a permeabilidade no gap e μ_r a permeabilidade relativa do material tem-se :

$$B \cong \frac{\mu_o}{l_o} i \quad (3.23)$$

e sabendo que sensibilidade a corrente é definida por $S_I = \frac{S_A}{I}$, onde

$S_A = \left| \frac{V_H}{B_{\perp}} \right|$, fazendo a substituição tem-se :

$$V_H = S_I \frac{\mu_0}{l_0} I i \quad (3.24)$$

Se as condições se mantiverem constantes, a tensão Hall é proporcional a corrente i .

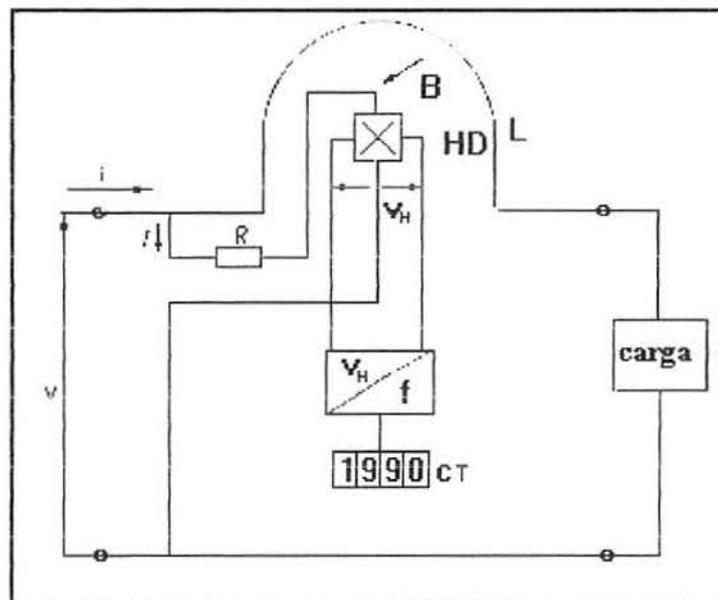


Fig. 3.16 Diagrama esquemático de um medidor de potência baseado num sensor Hall. L é o condutor, B é o campo produzido pela corrente I que será medida pelo sensor HD. V_H é a tensão de saída [POP91].

Um sensor Hall é um multiplicador de quatro quadrantes. Um método eficiente para medir potência elétrica pode ser baseado nesse princípio. Se a corrente da fig. 3.15 for proporcional a tensão v , isto é, $I \propto v$ então de acordo com (3.24) $V_H \propto vi$.

A fig. 3.16 mostra um medidor de energia elétrica (Watt-hora) baseado neste princípio:

3.3 - SENSORES BASEADOS EM MATERIAL AMORFO

Com o desenvolvimento de técnicas de manufatura, novos materiais, (com suas características peculiares) tem surgido. Um dos que mais despertam interesse na área atualmente, são os materiais amorfos magnéticos.

A razão por este interesse, está nas características magnéticas favoráveis oferecidas por este tipo de material, que segundo [MOH92] são superiores em sensibilidade de detecção, máxima temperatura de operação, tempo de resposta, resistência a choques mecânicos e miniaturização se comparados com materiais como *superpermalloy*, ferrites e supercondutores (materiais também utilizados como núcleos de sensores).

Segundo [MOH92], ligas de materiais amorfos, hoje em uso, são feitos de FeCoSiB e FeNiSiB. E filmes finos FeCoZr, TbFeCo, GdFeCo dentre outros.

3.3.1 - Características de materiais amorfos magnéticos para uso como sensores [MOH92]

- a) Possuem uma estrutura bi-dimensional extremamente uniforme;
- b) São materiais elásticos, que suportam tensões máximas acima de 400 Kgf / mm^2 . O fio (de material amorfo) pode ser utilizado com a capa de proteção, e pode ser facilmente utilizado na construção de grandes áreas sensoras (através de uma malha com estes fios). Pelos diâmetros encontrados, também é possível fabricar bobinas miniaturas com núcleos.
- c) Excitações na banda de Mhz são possíveis. Em outras palavras a frequência de corte para alguns sensores é de até centenas de Mhz.
- d) A permeabilidade excede a do *permalloy*, e faixa (*range*) de ruído de rotação de magnetização de *Barkhausen* é baixo, o que significa que é possível fazer sensores de respostas rápidas e alta sensibilidade (aproximadamente 10^{-6} Oe).

e) É muito fácil controlar a magnetostricção⁴ através da composição, desta forma sensores de tensões (*stress*) mecânicas e propagação de onda magnetostrictiva podem ser fabricados.

Por outro lado, quando se utiliza um material amorfo como sensor magnético os seguintes pontos devem ser lembrados :

a) A temperatura de cristalização T_x é entre 400 e 500 °C. Para aplicações práticas é aconselhável utilizar temperaturas abaixo de 200 graus Celsius.

b) Materiais ferrosos sofrem de baixa resistência à corrosão, sendo obrigatória a adição de Cr.

3.3.2 - Aplicações [MOH92]

A fig. 3.19 é um diagrama hierárquico classificando os sensores implementados com ligas amorfas que estavam em uso no ano de 1991, ou que ainda estavam em pesquisa, cujas aplicações práticas estavam em progresso.

Material magnético amorfo para uso como sensor magnético pode ser dividido em materiais com magnetostricção zero ($|\lambda| \leq 10^{-7}$, onde λ é a constante de saturação da magnetostricção) e materiais com alta magnetostricção. Materiais com magnetostricção zero (FeCoSiB) têm propriedades eletromagnéticas estáveis, como alta permeabilidade e excelente resistência a corrosão e ao manuseio; eles foram primeiramente aplicados em cabeças magnéticas para áudio, suas aplicações então se expandiram ao ponto de incluir sensores de campo magnético, sensores de corrente elétrica, sensores de deslocamento e outros.

Materiais de alta magnetostricção apresentam um efeito de magnetostricção muito sensível, e efeito inverso magnetostrictivo não encontrado em materiais cristalinos, mas suas aplicações práticas foram atrasadas devido a problemas de corrosão. Subseqüentemente ao desenvolver

⁴ Magnetostricção é um fenômeno que ocorre em alguns materiais, que quando estão sob um campo magnético, apresentam alterações da rede cristalina que se deforma, mudando as dimensões deste sólido.

fios amorfos, foi detectado um grande efeito de *Barkhausen*, com grandes pulsos de tensão induzidos sob baixos campos magnéticos (0.1 OE) [MOH84], estes tiveram aplicações práticas nos U. S. como etiquetas para sensores de segurança (Unitika LTD., 1987). No momento, a produção anual é de algumas dezenas de milhares por ano, isto é, está sendo produzida em massa. Mesas digitalizadoras também têm sido implementadas com tiras de material amorfo magnetostrictivo, onde a intensidade de propagação magnetostrictiva é controlada por um magneto. Recentemente sensores ópticos baseados no efeito magnetóptico de filmes amorfos RE-TM tem atraído atenção [YAO91].

A figura 3.18 mostra uma mesa baseada no efeito Matteuci: 40 fios com 20 cm de comprimento de FeCoSiB, colocados a 5 mm de espaçamento entre si na direção X e outros 40 fios similarmente colocados ao longo da direção Y, formando no total uma mesa de área 20x20 cm. Juntamente com este arranjo (mesa) existe uma caneta de excitação, que se constitui num circuito oscilador. Um sistema de varredura (multiplexador), faz com que um pulso seja dado, temporariamente, tanto nas linhas como nas colunas (corrente DC de 5mA). Quando a caneta se aproxima de um fio, este será induzido, aparecendo assim uma tensão na saída.

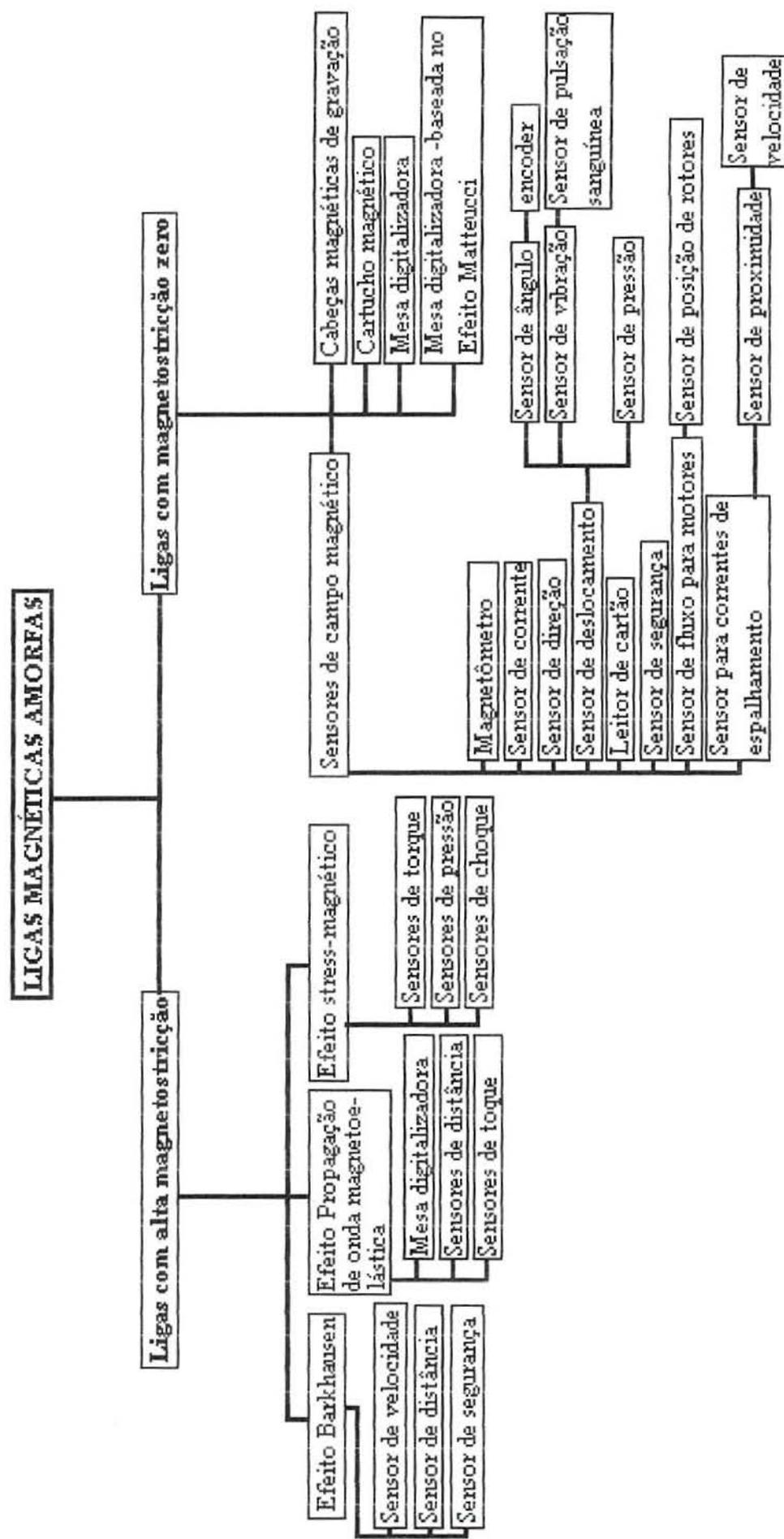


Fig. 3.17 - Sensores magnéticos implementados com materiais magnéticos amorfos [MOH92].

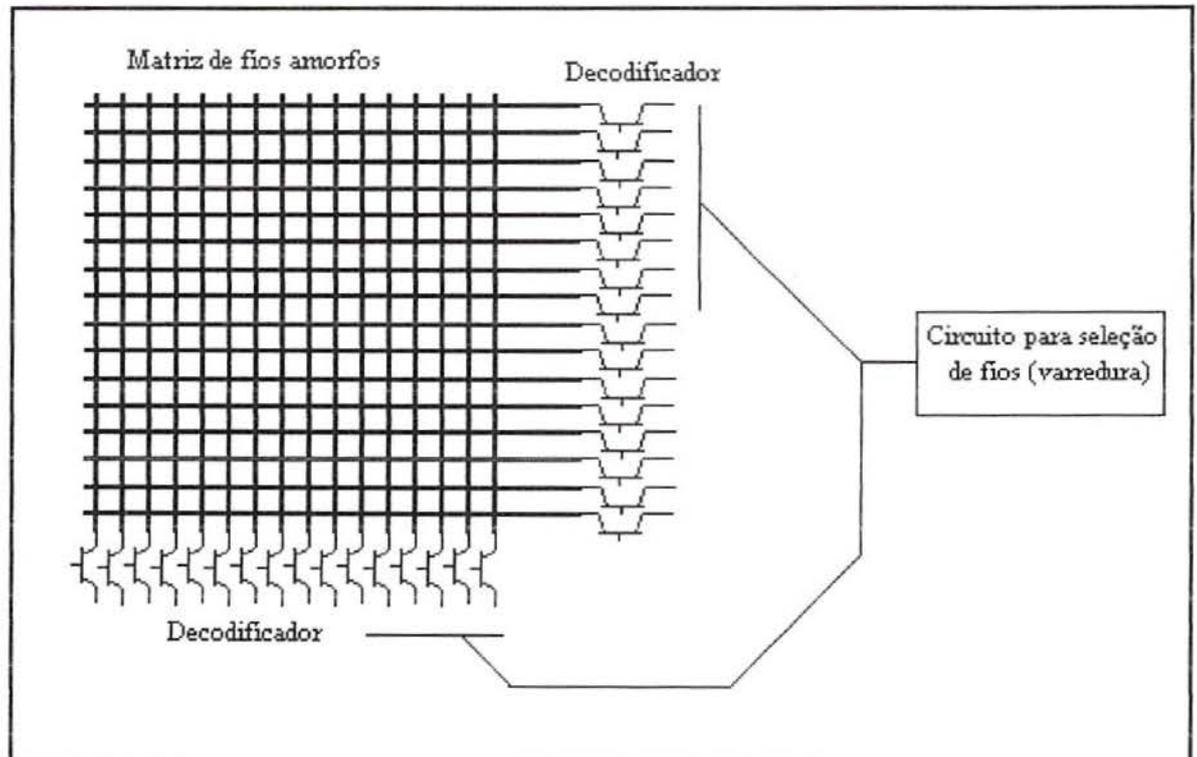


Fig. 3.18 - Esquema de uma mesa digitalizadora implementada com uma matriz de fios amorfos e baseado no efeito Matteucci [MOH92].

Outra aplicação deste tipo de sensores, é na forma de biosensores; a fig. 3.19 mostra um biosensor vibracional que usa um sensor magnético para detectar através das linhas de força, as vibrações de um magneto que fica em contato com a pele [MOH87]. O miniaturizado núcleo amorfo do sensor de campo tem uma configuração radial e as bobinas são conectadas em série, de modo a descartar as influências devido ao campo magnético terrestre (por cancelamento).

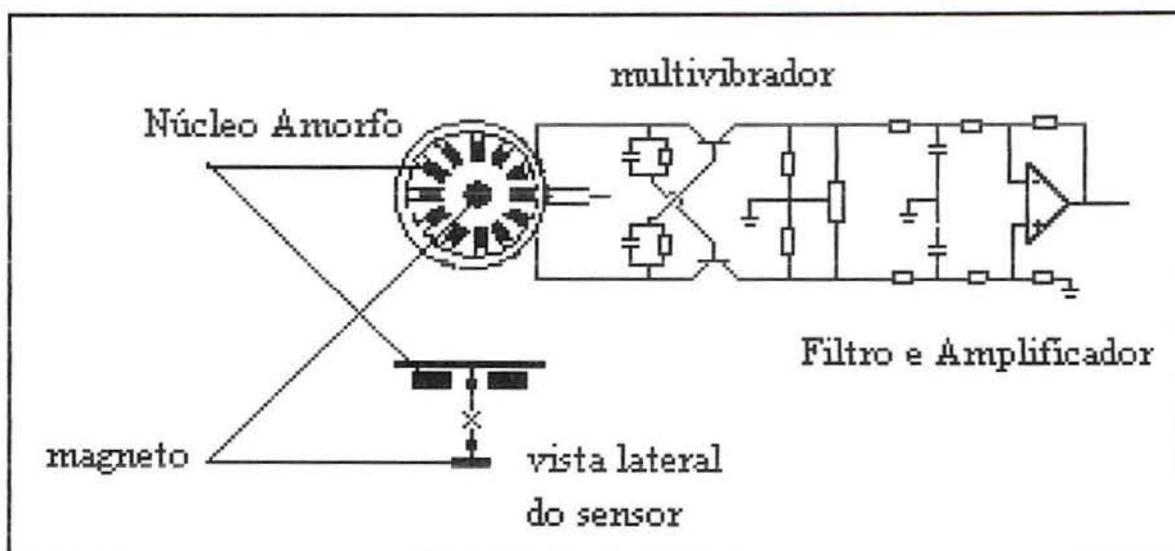


Fig. 3.19 - Sensor de deslocamento multivibracional utilizando um núcleo amorfo tipo estrela [MOH92].

Sensores que são desenvolvidos com o objetivo de ter alta sensibilidade, tamanho mínimo e uma larga faixa de trabalho quanto a temperatura (temperaturas criogênicas), particularmente para pesquisas de supercondutividade a altas temperaturas, também tem sido implementados com material amorfo [MAK91]. Pode-se citar:

a) Sensores Ressonantes [MAK91]

Este sensor é um circuito ressonante com um núcleo amorfo dentro de um indutor. Quando os pulsos de tensão passam pelo núcleo, são induzidos para a bobina. A forma destes pulsos induzidos é a mesma do circuito ressonante, só atrasada, e seu tempo de posição corresponde as frentes inicial e final do pulso. A frequência de oscilação deste pulso depende da intensidade do campo magnético externo, e sua fase inicial depende do sinal da projeção do campo magnético na fita de detecção. A medida de frequência é geralmente realizada pelo registro de um a cinco meios períodos iniciais.

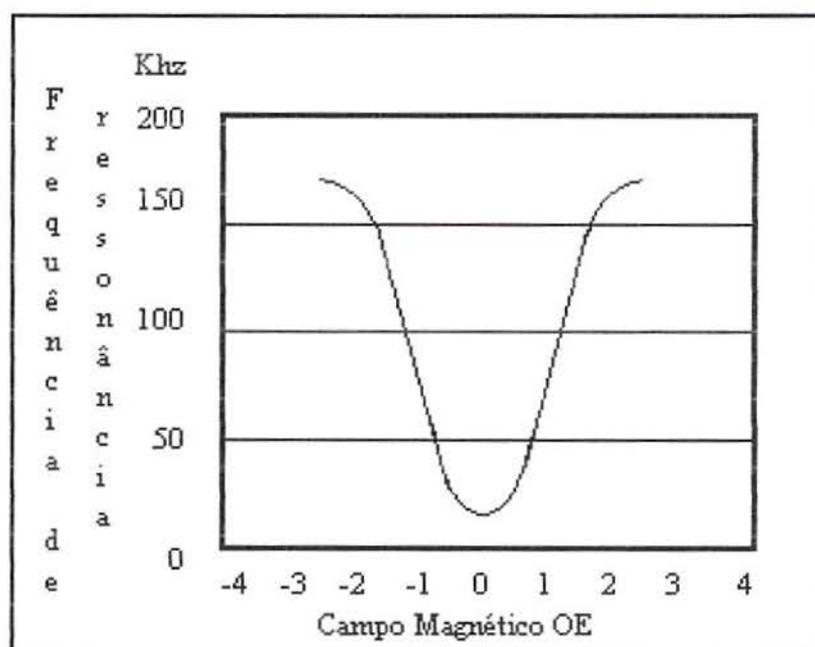


Fig. 3.20 - Frequência de ressonância do sensor como função da intensidade de campo magnético [MAK91].

As características de saída do sensor são dependentes da frequência do campo magnético. A forma convencional desta curva para o sensor é mostrada na fig. 3.20.

Uma das vantagens deste sensor é sua capacidade de operar em temperaturas criogênicas, porque as fitas amorfas mantêm suas características de sensibilidade a temperaturas do Hélio líquido.

b) Sensores de vibração [MAK91]

O princípio de operação destes sensores é medir a deformação do campo magnético perto de uma das pontas de uma fita amorfa utilizando um sensor Hall de vibração. Este campo é determinado pelo momento magnético da tira de material amorfo, conseqüentemente o sensor mede sua magnetização, que por sua vez depende de um campo magnético externo ao longo da tira.

A amplitude do sinal do sensor Hall será determinada pela projeção do campo magnético externo no eixo longitudinal da tira amorfa. O campo magnético perto da borda da fita amorfa dá a principal contribuição para o sinal de saída, assim este sensor pode ser utilizado para medir a distribuição local do campo magnético.

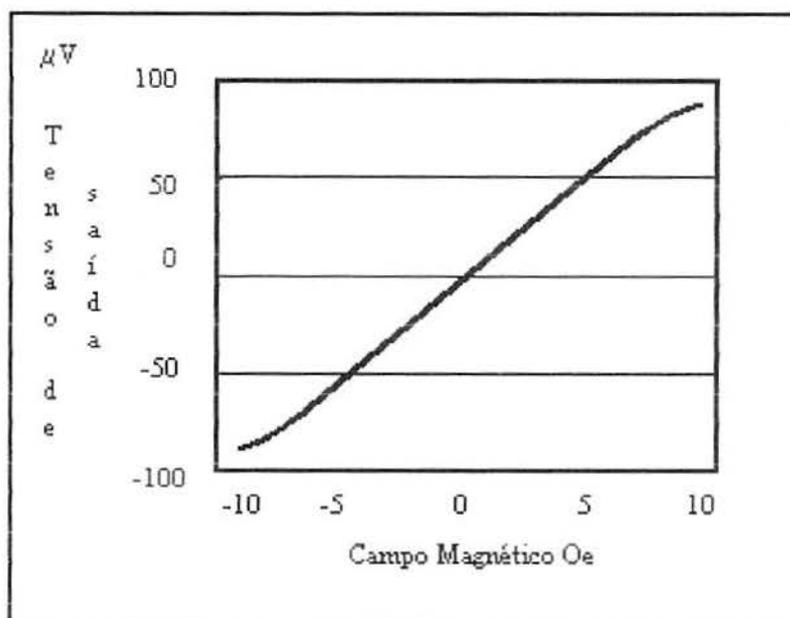


Fig. 3.21 - Saída do sensor de vibração como resposta de um campo magnético externo [MAK91].

A construção deste sensor consiste de barras de 2mm x 2mm x 60mm. Numa das pontas existe uma tira amorfa e na outra um sensor Hall. Neste conjunto aparece também um vibrador piezoelétrico que tem a função de excitar o sistema. As características de saída do sensor de vibração são dependentes da intensidade do campo na tira amorfa, medidas pelo sensor Hall, e podem ser vistas na fig. 3.21.

A exemplo do anterior este sensor também pode operar a temperaturas criogênicas.

c) Sensores Resistivos [MAK91]

O princípio de operação é medir a impedância da fita amorfa a altas frequências, a qual depende da intensidade do campo magnético aplicado. Para isso é aplicado um sinal V_{ac} de amplitude constante através da tira amorfa e mede-se, então, a tensão resultante para determinar a impedância.

A dependência da impedância da tira amorfa com o campo magnético faz parte das características de saída do sensor. Esta relação pode ser vista na fig. 3.22. Quando a frequência é 200 KHz, a curva tem seu valor máximo, quando o campo magnético é zero, já quando a frequência é 2MHz a curva dá seu valor mínimo neste mesmo valor de campo.

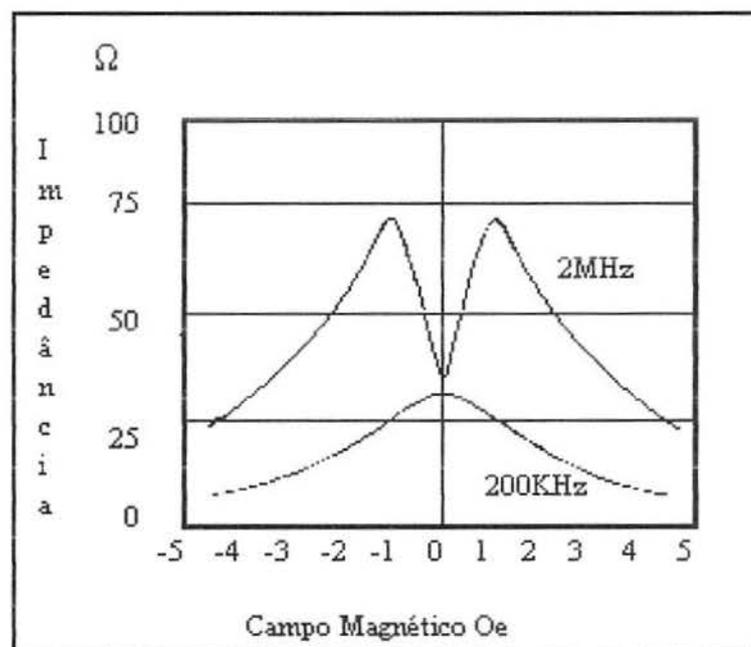


Fig. 3.22 - Características da saída do sensor resistivo para duas frequências diferentes [MAK91].

Deve ser mencionado, ainda, que as características de saída deste sensor dependem muito das tensões (*stress*) mecânicas e da corrente DC que passa através da tira.

3.4 - SENSORES MAGNETO-RESISTIVOS

São sensores feitos de filmes ferromagnéticos muito finos. Estes sensores podem medir campos magnéticos numa faixa de 10^{-3} a 10^4 A/m (campos muito menores que os sensores de efeito hall). Primeiramente será mostrada a relação entre campo magnético e a variação de resistência e depois algumas imperfeições internas.

3.4.1 - Introdução [DIB86]

Sensores magneto-resistivos fazem uso da propriedade de que a resistividade elétrica ρ de uma certa liga ferromagnética é influenciada por um campo externo.

Comparando os sensores magnetoresistivos com o sensor de efeito Hall, o sensor magneto-resistivo pode captar campos muito mais fracos. Esta alta sensibilidade é causada por uma camada de material ferromagnético que possui uma alta magnetização interna podendo ser facilmente rotacionada.

3.4.2 - Fundamentos do sensor [DIB86]

Relação resistência / campo magnético:

A resistividade ρ do metal anisotrópico ferromagnético depende do ângulo θ entre a magnetização interna M e a corrente I [McG75][tho75]:

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \cos^2 \theta \quad (3.25)$$

Onde ρ_{\perp} e ρ_{\parallel} são as resistividades perpendicular e paralela a M respectivamente. O quociente

$$\frac{(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})}{\rho_{\perp}} = \frac{\delta\rho}{\rho} \quad (3.26)$$

é denominado efeito magneto-resistivo e normalmente é expresso em percentagem.

Estes sensores são feitos de filmes finos de materiais ferromagnético por possuírem duas grandes vantagens : A resistência é maior ($R > 100$ Ohms) e a anisotropia é uniaxial (se confeccionados corretamente). As camadas se comportam como um domínio simples e possuem uma direção de magnetização no plano chamado de eixo fácil, que é a direção de magnetização sem a influência de campos externos.

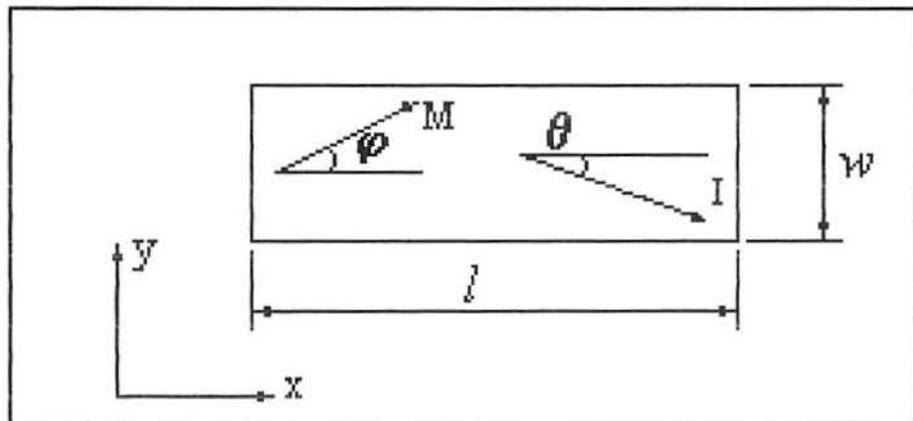


Fig. 3.23 - Geometria de um sensor magneto-resistivo. Valores típicos são $l=100$ mm $w=10$ mm, $t=100$ nm [DIB86].

A fig. 3.23 mostra a geometria de um sensor simples. A espessura t não é mostrada (20 nm $< t < 1$ um). Normalmente $t \ll w < l$ é válida. Se I flui paralela ao eixo x ($\theta=0$ ou $\Theta=\phi$). Da eq. 3.25 tem-se:

$$R = R_0 + \delta \cdot \cos^2 \phi \quad (3.27)$$

onde θ é o ângulo entre o eixo horizontal (x) e a corrente I e ϕ é o ângulo entre o eixo horizontal (x) e a magnetização M (horizontal é o mesmo que paralelo ao eixo x). Com uma corrente constante I a tensão V_x será :

$$V_x = \rho_{\perp} \cdot I \cdot \left(\frac{l}{W \cdot t}\right) \left[1 + \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right) \cdot \cos^2 \phi\right] \quad (3.28)$$

a variação desta tensão está ligada diretamente com a variação da resistência, e da mesma forma existe uma tensão V_y relativa a direção y :

$$V_y = \rho_{\perp} \cdot I \left(\frac{1}{t}\right) \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right) \sin\phi \cos\phi \quad (3.29)$$

Este efeito é conhecido como planar ou pseudo efeito Hall por se assemelhar ao efeito Hall (porém a origem física deste efeito difere completamente do efeito Hall).

Todos os sinais do sensor são determinados pelo ângulo ϕ , que depende de um campo magnético externo. Será assumido que o eixo fácil é a direção x ; assim sem a influência de campos magnéticos externos M terá somente uma componente x ($\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$). Duas energias precisam ser introduzidas quando M é rotacionado por campos externos: A energia anisotrópica E_k , dada pelo campo anisotrópico H_k (que depende do material e do processo que este sofreu até então) e a energia de desmagnetização que depende da geometria. Esta dependência é geralmente mais complexa, mas é simples para elipsóides, onde um campo de desmagnetização H_d uniforme pode ser introduzido. Aproximando para a situação da fig. 3.23 tem-se :

$$H_d \approx \left(\frac{t}{W}\right) \left(\frac{M_s}{\mu_0}\right) \quad (3.30)$$

com o fator de desmagnetização $N = \frac{t}{W}$, saturação magnética $M_s \approx 1T$ e a constante de indução $\mu_0 = 4\pi^{-7} \text{Vs/Am}$.

O campo

$$H_0 = H_k + \left(\frac{l}{W}\right) \frac{M_s}{\mu_0} = H_K + H_d \quad (3.31)$$

determina a faixa (*range*) de medida dos sensores magnetoresistivos. Como ϕ é dado por :

$$\sin\phi = \frac{H_y}{H_0 + H_x / \cos\phi}, \left(|H_y| \leq |H_0 + H_x| \right) \quad (3.32)$$

onde H_x e H_y são as componentes do campo externo. Num caso simples de $H_x = 0$ tem-se :

$$V_x = \rho_{\perp} \cdot I \left(\frac{l}{Wt} \right) \cdot \left(1 + \left(\frac{\delta\rho}{\rho} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2 \right) \right) \quad (3.33)$$

$$V_y = \rho_{\perp} \cdot I \left(\frac{1}{l} \right) \left(\frac{\delta\rho}{\rho} \right) \left(\frac{H_y}{H_0} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{H_y}{H_0} \right)^2} \quad (3.34)$$

se $H_x \neq 0$ substituindo-se H_0 por $H_0 + \frac{H_x}{\cos\phi}$

desconsiderando a parte constante de V_x , existem duas diferenças principais entre V_x e H_y :

a) O sinal magnetoresistivo V_x depende do quadrado de $\frac{H_y}{H_0}$ onde a tensão

Hall de V_y é linear para $H_y \ll H_0$.

b) A razão de seus valores máximos é $\frac{l}{W}$. Por isso a tensão Hall é muito menor, porque na maioria dos casos $l \gg W$.

Será mostrado a seguir como contornar a dependência quadrática de V_x e H_y

A equação 3.32 é apenas uma simplificação do modelo físico real, dessa forma, ϕ tem duas soluções $\phi_1 < 90^\circ$ e $\phi_2 > 90^\circ$ (com $\phi_1 + \phi_2 = 180^\circ$ para $H_x = 0$) de acordo com a teoria de *Stoner e Wolfarth* [PRU64][COH70]. Substituindo ϕ por $180^\circ - \phi$ isto não terá influência na tensão V_x , mas muda a tensão Hall e também a tensão da maioria dos sensores magnetoresistivos linearizados.

Desta, forma uma das duas soluções precisa ser escolhida para evitar ambiguidade. Isto pode ser feito por um campo próprio H_x , um pulso curto de $|H_x| > H_k$ e de sinal correto que irá magnetizar no estado desejado. Este estado será mantido enquanto a componente x não mudar seu sinal (o valor exato é dado pelo desvio de *Stoner-Wolfarth*). Infelizmente, estas condições precisam ser trazidas para um comportamento não ideal das camadas, descrita na teoria ripple [COH70][HOF79]: O valor permitido de H_x agora está mais restrito ao valor de bloqueio da curva. É aconselhável (com exceção de $H_y \ll H_0$) introduzir um campo estável (H_{st}) na direção x. O valor mínimo de H_{st} depende da estrutura das camadas sensitivas e tem que ser da ordem de H_k . Grandes cristais requerem um alto H_{st} , um valor insuficiente de H_{st} irá manifestar a característica de histerese do sensor.

3.4.3 - Magnetoresistores comerciais [GAL76]

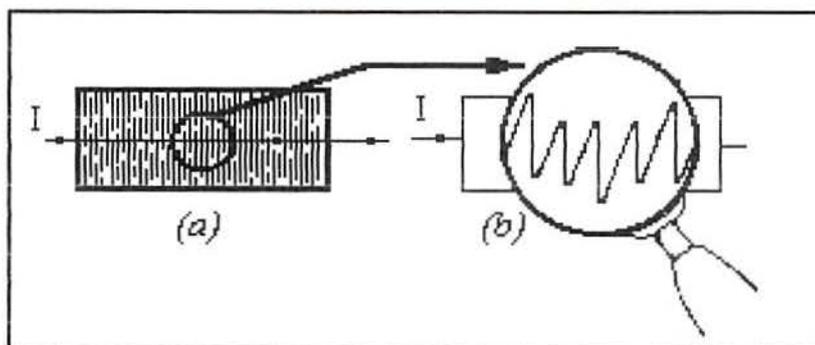


Fig. 3.24- Caminhos de corrente num semiconductor retangular. (a) Com campo magnético zero, (b) com campo magnético B [GAL76].

Exemplos de magnetoresistores comerciais são semicondutores de Índio/Antimônio e Níquel Antimônio. A fim de obter uma distribuição homogênea da carga dos portadores são adicionados metais condutores (NiSb) ao material básico. O ângulo entre o caminho da corrente a um campo magnético zero e um campo magnético transversal é chamado de ângulo Hall. Para um campo de 1 Tesla, o valor deste ângulo é de aproximadamente de 80 graus. A medida que o caminho percorrido pela corrente aumenta, aumenta também a resistência ôhmica.

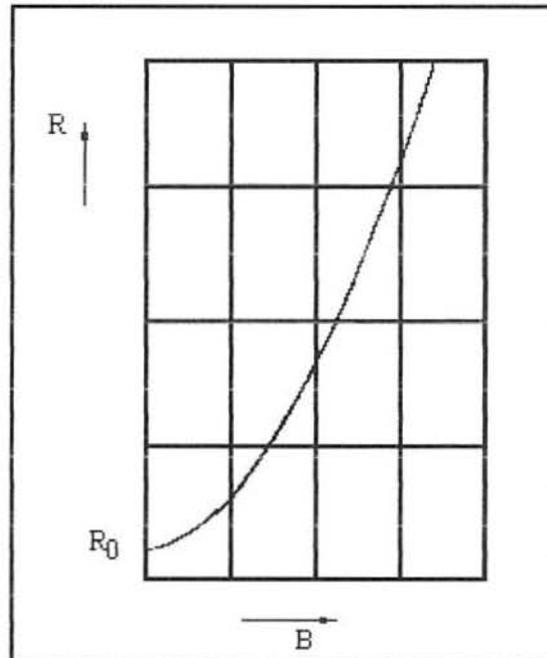


Fig. 3.25 - Resistência do magneto resistor x Indução magnética [GAL76].

3.4.4 - Resistência R_S num campo magnético [GAL76]

A resistência R_S do magneto resistor é a resistência do sensor sob um campo magnético. Ela pode ser determinada pela:

- a) Resistência básica R_0 (É a resistência do semicondutor sem a influência do campo magnético).
- b) Amplitude do campo magnético (o qual se deseja medir).
- c) O fator de doping.

A fig. 3.26 mostra a resistência relativa $\frac{R_B}{R_0}$ para três materiais básicos D, L e N (as condutividades desses tres materiais são respectivamente 200, 550 e 800 $(\Omega cm)^{-1}$), como função da indução magnética B. Na fig. 3.28 pode-se ver a dependência do sinal de saída com o ângulo entre a normal do sensor e a indução B.

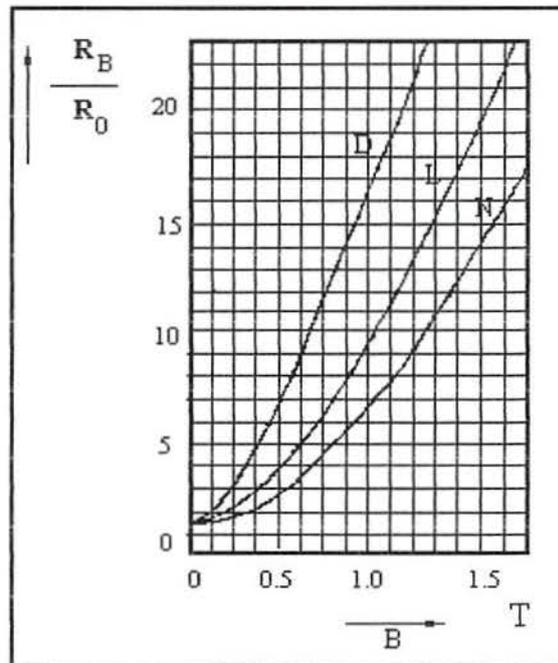


Fig. 3.26 - Razão de $\frac{R_B}{R_0}$ como função da indução magnética B [GAL76].

3.4.5 - Aproximação matemática das características do magneto resistor [GAL76]

A relação da resistência destes sensores com a indução B pode ser escrita na forma de um polinômio :

$$R(B) = a_0 + a_2 B^2 + a_4 B^4 + a_6 B^6 + a_8 B^8 + a_{10} B^{10} \quad (3.35)$$

Os valores medidos são padronizados de maneira que a resistência a 25° C e a 0 Tesla totalize 100 Ω ; Observe que a dependência com a temperatura é importante.

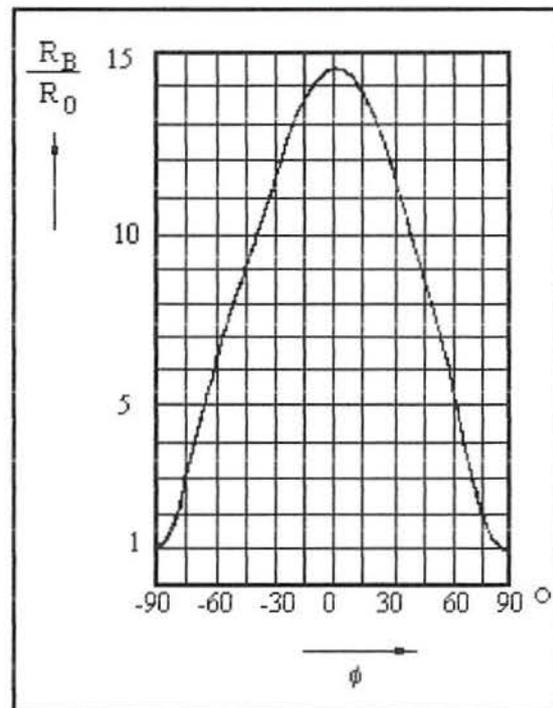


Fig. 3.27- Dependência da relação $\frac{R_B}{R_0}$ com a indução magnética [GAL76].

3.4.6 - Aplicações [PHI85]

Muitas podem ser as aplicações de um sensor desta natureza, como exemplos pode-se citar :

3.4.6.1 - Sensor para detectar velocidade de uma roda [PHI85]

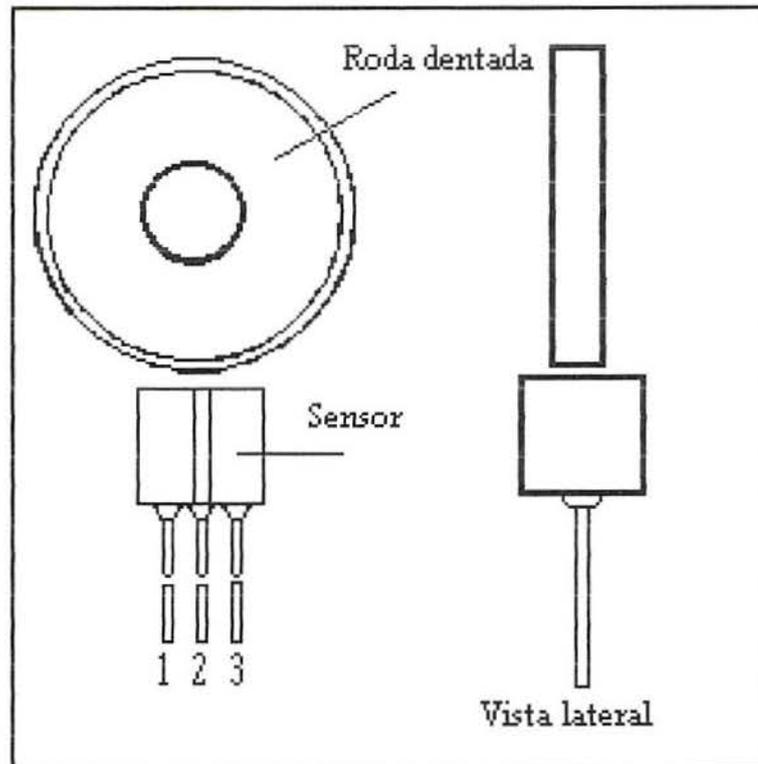


Fig. 3.28- Utilização de um magnetorresistor (do tipo diferencial) para medir velocidade [PHI85].

3.4.6.2 - Sensor de deslocamento [PHI85]

Na fig. 3.29 pode-se ver (a) um arranjo de um sensor magnetorresistivo (KMZ10) medindo deslocamento na direção x . Em (b), o comportamento de um campo auxiliar (H_x) e do campo transversal (H_y) para o ímã permanente. (c) A resposta do sensor para este arranjo.

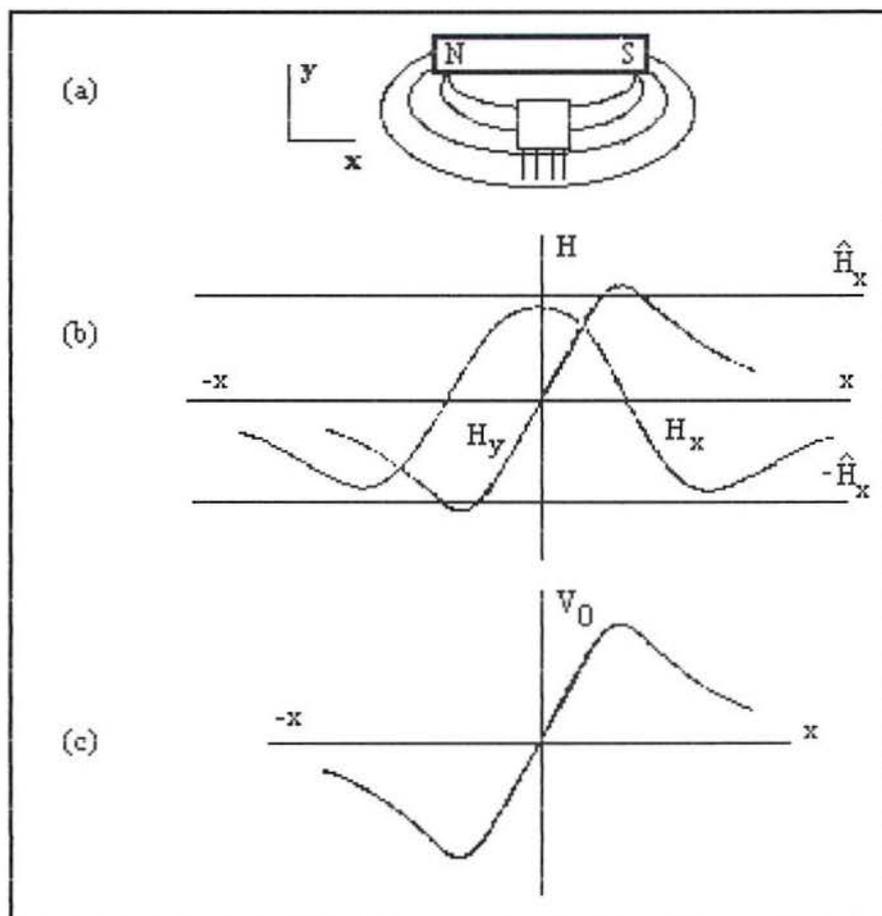


Fig. 3.29 - Utilização do sensor magneto resistivo (KMZ10) como sensor de deslocamento [PHI85] NOTA⁵.

3.4.6.3 - Sensor de posição [PHI85]

A fig. 3.30 (a) mostra um sensor magneto resistivo entre uma peça com um furo (que serve de referência). A descontinuidade desta peça é percebida pelo sensor como uma descontinuidade da homogeneidade das linhas de campo do magneto e sua resposta (saída) pode ser vista em (b); observe também que apesar de apresentar diferentes amplitudes para distâncias

⁵ NOTA: Neste tipo de aplicação, ou qualquer outra que envolver uma componente de campo magnético tanto em x como em y, é preciso tomar o cuidado de observar se a componente em x não excede o valor da magnetização interna do sensor (defasada de 180°). Se isso acontecer a curva de resposta deste sensor será invertida de 180° (este fenômeno é chamado de *flipper*) e conseqüentemente os valores de calibração não serão mais válidos. Para resolver este tipo de problema o fabricante recomenda aplicar um campo auxiliar na direção y. Para maiores detalhes [PHI85].

diferentes (entre a peça e o sensor) o ponto que o sinal passa por zero é o mesmo.

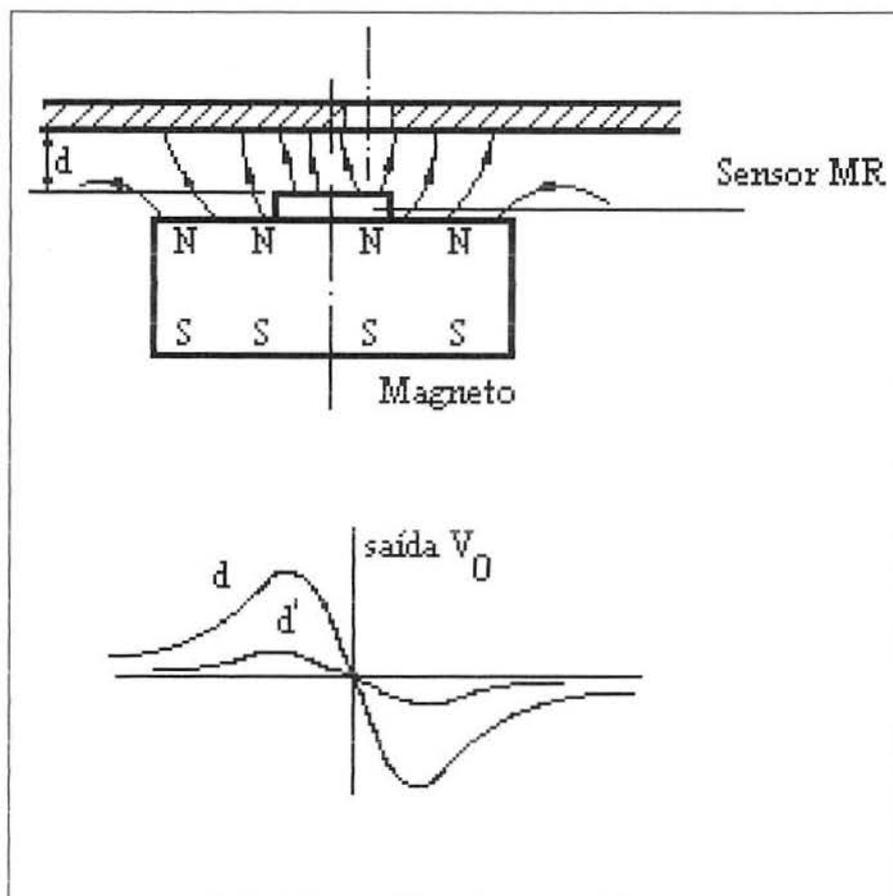


Fig. 3.30 - Detetor de posição utilizando um sensor MR [PHI85].

3.4.6.4 - Sensor de Posição angular [PHI85]

A fig. 3.31 mostra um arranjo com um sensor MR (magneto-resistivo) para medir posição angular de um bloco inteiro. um ímã permanente se desloca (rotaciona) juntamente com todo o bloco em volta do sensor.

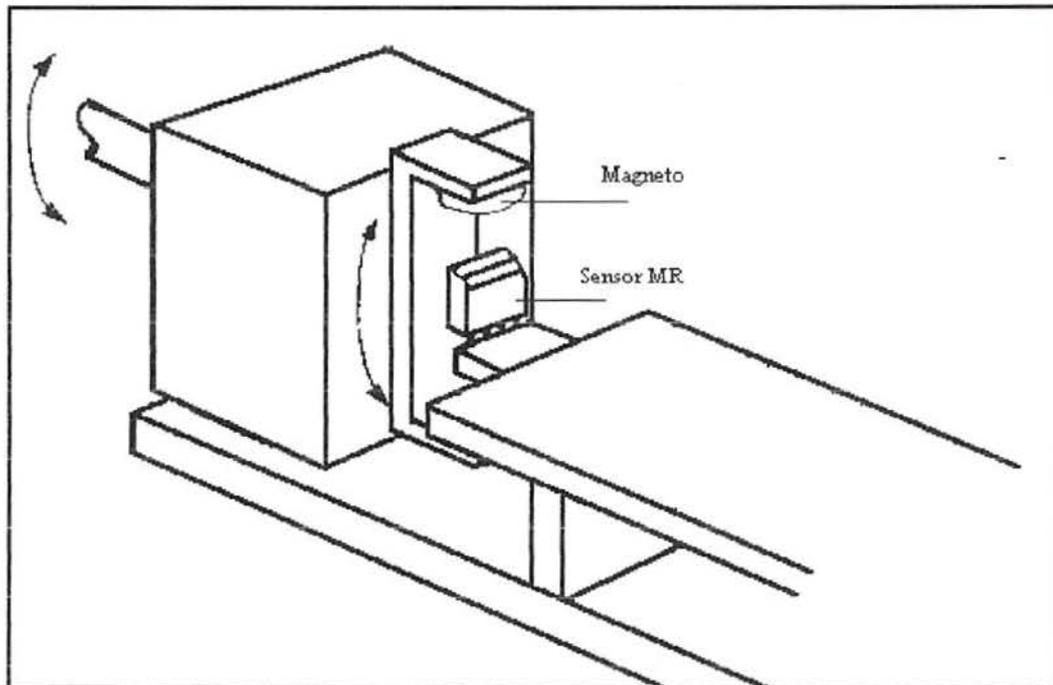


Fig. 3.31 - Medição de deslocamento angular com um sensor MR [PHI85].

3.4.6.5 - Medição de corrente [PHI85]

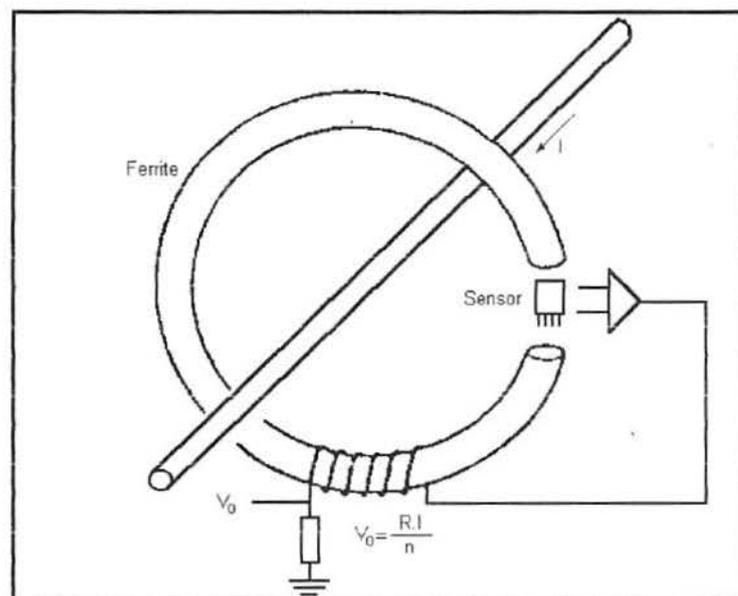


Fig. 3.32 - Medição de corrente utilizando um sensor MR. No arranjo pode-se ver um condutor que transporta uma corrente I , gerando o campo que é medido [PHI85].

A fig. 3.32 mostra um arranjo com o sensor MR medindo corrente indiretamente através do campo magnético, que é induzido num núcleo de ferrite possuindo um *air gap* onde o sinal é detectado. Este é um método de medida sem contato bastante praticado na indústria.

3.5 - SQUIDS

Os SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Devices*) são dispositivos que utilizam-se do efeito *Josephson* juntamente com o fenómeno da supercondutividade (Efeito *Meissner*) para medir campos magnéticos com altos níveis de precisão. Para mostrar um pouco mais deste sensor é necessário revisar alguns conceitos, os quais são relatados a seguir :

3.5.1 - Supercondutividade [GAL91]

A supercondutividade tem revolucionado medidas feitas com altíssimos níveis de precisão nos últimos 20 anos, principalmente com a descoberta do efeito *Josephson* e o desenvolvimento dos SQUIDS.

Serão considerados primeiramente os aspectos convencionais de supercondutividade. A propriedade da resistência cair a zero abaixo da temperatura de transição que tem sido bastante utilizada por cientistas em ambientes de pesquisa, agora também já está sendo implementada em campos como medicina e indústria principalmente pela característica de produzir altos campos eletromagnéticos.

O verdadeiro mecanismo da supercondutividade só foi realmente explicado 45 anos depois da descoberta inicial, quando ficou claro que o par de elétrons no condutor é responsável pelas propriedades características. Num material supercondutor convencional cada membro de um par é atraído pelo outro pela troca de *phonons* virtuais. Em outras palavras a passagem de um elétron através da rede cristalina perturba os íons imediatamente vizinhos, que

são atraídos na direção das forças de natureza Colombiana. Desta forma uma densidade de carga positiva local é formada, que ainda demora um tempo para se dissipar depois que o elétron se afasta, devido a grande massa dos íons. (Ao retornar para sua posição de equilíbrio são geradas excitações elásticas na rede cristalina, as quais são chamadas de *phonons*). Em altas temperaturas existem mais *phonons* na rede; e a interação elétron-*phonon* causa um espalhamento dos elétrons condutores determinando incremento na resistência. Em temperaturas suficientemente baixas observa-se um decréscimo considerável, e em alguns sólidos a resistência desaparece completamente nas chamadas temperaturas críticas (T_c).

3.5.2 - O efeito *Meissner* [GAL91]

A variação espacial da fase da função de onda do supercondutor $\Psi(r)$ pode ser influenciada pela aplicação de campos magnético, elétrico ou gravitacional num material supercondutor. Para esta revisão é preciso considerar somente os campos magnéticos.

É um resultado básico da mecânica quântica que o momento para uma partícula num campo magnético descrito pelo vetor potencial $A(r)$ é :

$$p = p_0 + qA(r) \quad (3.36)$$

onde p_0 é o momento quando o campo magnético é zero e q é a carga das partículas ($-2e$). O operador Hamiltoniano dará sua contribuição, dando a seguinte forma para a equação de *Schrödinger* independente do tempo:

$$\left(\frac{\hbar}{m}\right)(-i\hbar\nabla - 2eA(r))^2\Psi = E\Psi \quad (3.37)$$

Pode-se mostrar que o efeito do vetor potencial é multiplicar a função de onda de campo zero (Ψ_0) por um fator adicional $e^{(-2ieA(r)dl/\hbar)}$, indo de um ponto a outro por pequenas distâncias dl . Agora a função de onda tem de

assumir valores simples como resultado da mudança total de fase sobre um determinado caminho p , do tipo $2n\pi$, onde n é um inteiro :

$$(2e / h) \int A \cdot dl = 2n\pi \quad (3.38)$$

Considerando o contorno de integração da figura 3.36, e fazendo uma sucessão de reduções infinitesimais no comprimento total do caminho de integração, este tende a zero. Obviamente para um caminho de comprimento zero, n deve ser igual a zero. Uma vez que o caminho é incrementado por variação infinitesimais, é fácil aceitar que não existirá uma mudança brusca na fase, permitindo que n seja igual a 1, precisa ser verdade então que $n=0$ para todos os caminhos. O teorema de Stokes permite que esta integral de contorno seja transformada numa integral de $\nabla \times A$ sobre uma superfície S :

$$\int A \cdot dl = \int \nabla \times A \cdot dS = 0 \quad (3.39)$$

Por definição tem-se $B = \nabla \times A$, substituindo na equação 3.38 tem-se:

$$\int B \cdot dS = \Phi = 0 \quad (3.40)$$

onde B é a componente normal do fluxo magnético sobre a área dS . Este é o mecanismo quântico básico do efeito *Meissner* que mostra que os supercondutores, sob temperaturas críticas, excluem todo o campo magnético do seu interior.

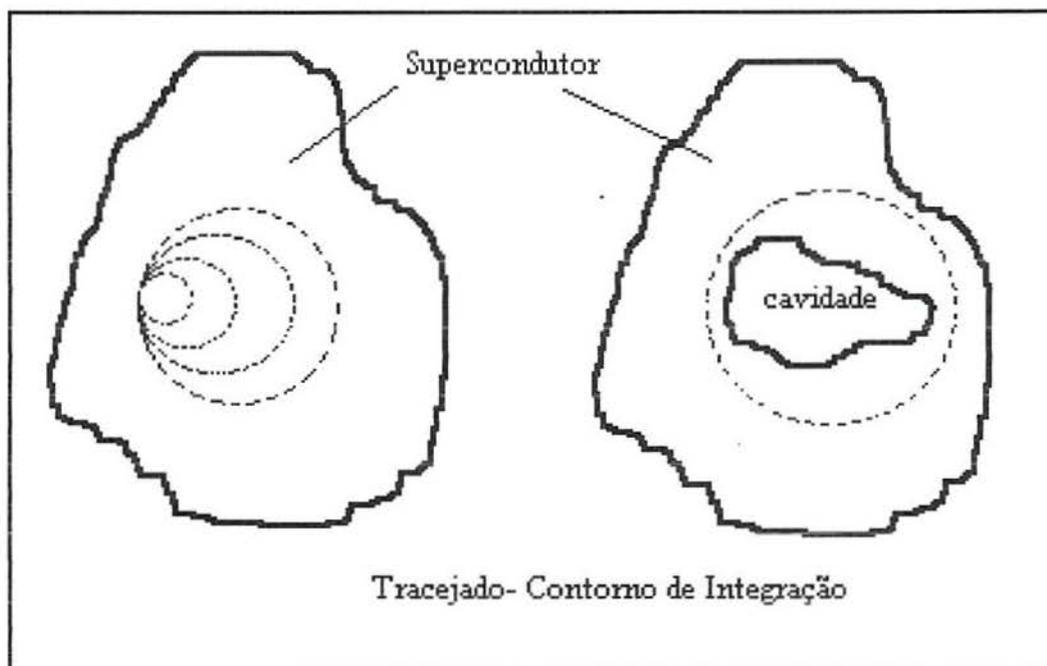


Fig. 3.33 - Pedacos de supercondutor (um inteiro e outro com uma cavidade central) com contornos de integração [GAL91].

Para um pedaço de supercondutor com um furo no seu interior, fig 3.37, pode-se esperar que o campo seja expelido do interior do material, porém, fazendo uma análise análoga a anterior verifica-se que não existe maneira de fazer o caminho decrementar até zero, dessa maneira conclui-se que n sempre assumirá um valor, e ainda que a componente normal do fluxo será quantizada em unidades de $h/2e$ onde h é a constante de *Planck* e e é a carga elétrica:

$$\Phi = \int B \cdot dS = nh / 2e = n\Phi_0 \quad (3.41)$$

O fluxo magnético é muito pequeno ($2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$), e a quantização é concluída por supercorrentes que se deslocam pela superfície do material.

3.5.3 - O efeito *Josephson* [GAL91]

O fluxo quântico é muito pequeno e além disso, é uma razão exata de duas constantes que tem características muito interessantes para medidas precisas, contudo, nos supercondutores a quantização é um efeito de "tudo ou

nada". O fluxo quântico não pode ser manipulado separadamente ou em números pequenos. Para fazer maiores progressos com metrologia criogênicas precisas, é necessário encontrar uma variação suave da fase da função de onda com a aplicação de campos magnéticos e elétricos (efeito *Josephson*).

A função de onda descrevendo um único pedaço de semiconductor sem qualquer furo, possui duas características físicas observáveis, o número de pares elétricos, que para um pedaço isolado a $T=0$ K é bem definido, e a fase f . Os operadores correspondentes a estes dois são conjugados, satisfazendo a relação:

$$[N, f]=0. \quad (3.42)$$

Então quando N é exatamente especificado, a fase torna-se totalmente indeterminada e por isso sem importância.

Se dois pedaços de supercondutores forem acoplados juntos, (de modo a formar uma junção de *Josephson*), suas funções de onda serão misturadas e poderão ser observados efeitos de tunelamento⁶ dos elétrons de um para outro supercondutor.

Aqui deve-se mencionar que a junção de *Josephson* conectada a um circuito externo é equivalente a seguinte forma :

$$[Q, f]=ih \quad (3.43)$$

onde Q é o operador para a diferença de cargas elétricas através da junção e f é o operador para o fluxo magnético total fechado na junção e suas influências no circuito. É possível descrever o comportamento quântico de qualquer circuito com este modelo [WID79], por exemplo um circuito ressonante LC e analogias entre osciladores elétricos e mecânicos. Nesta representação Q é análogo ao deslocamento e f pode ser substituído por variáveis clássicas.

⁶Todo tunelamento é um efeito quântico : por tunelamento entende-se a penetração de uma partícula através de uma barreira de potencial - isto é, através de uma região proibida dentro da mecânica clássica.

Josephson provou que a supercorrente pode passar de um eletrodo para outro por tunelamento e que a diferença de fase da função de onda através da barreira pode se ajustar de acordo com :

$$i = i_c \sin(\phi_1 - \phi_2) = i_c \sin(\delta\phi) \quad (3.44)$$

A corrente crítica i_c , determina um limite, e ainda se a supercorrente for maior que i_c aparece uma tensão V através da junção e ao mesmo tempo uma supercorrente alternada com a frequência :

$$f = \frac{2ev}{h} \quad (3.45)$$

Desta forma existem 2 regimes de comportamento para a junção *de Josephson*. Para baixas correntes a representação utilizada é em termos de transferência coerente de um par de elétrons de um eletrodo para outro. Para correntes que excedem i_c tem-se uma transferência de fluxo quântico.

3.5.4 - O SQUID - Uma junção de *Josephson* num anel supercondutor [GAL91]

A combinação destes dois fenômenos de natureza quântica, é conhecida como SQUID (Superconducting Quantum Interference Device).

Na prática, um squid é composto de um anel supercondutor, acoplado em paralelo com um circuito ressonante LC, com a inserção da bobina L dentro do anel supercondutor.

Uma modulação é aplicada ao anel *excitando* o circuito ressonante perto de sua frequência de ressonância (aproximadamente 20 Mhz) e a energia de absorção associada com a execução do loop de histerese consome a energia armazenada no LC, fazendo a amplitude de oscilação cair.

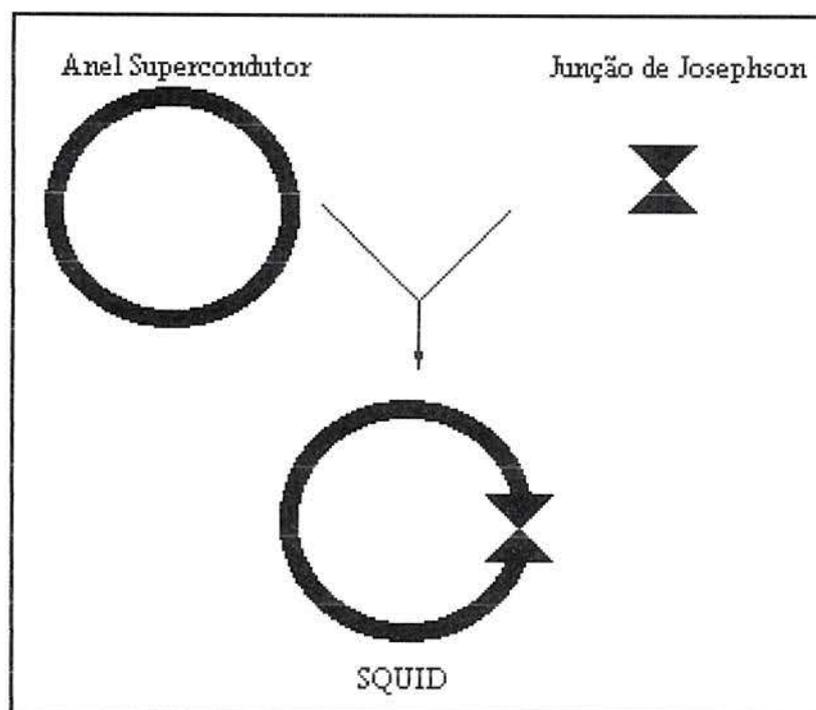


Fig. 3.34 - Diagrama esquemático de um SQUID mostrando os elementos básicos (Anel supercondutor mais uma junção de Josephson) [GAL91].

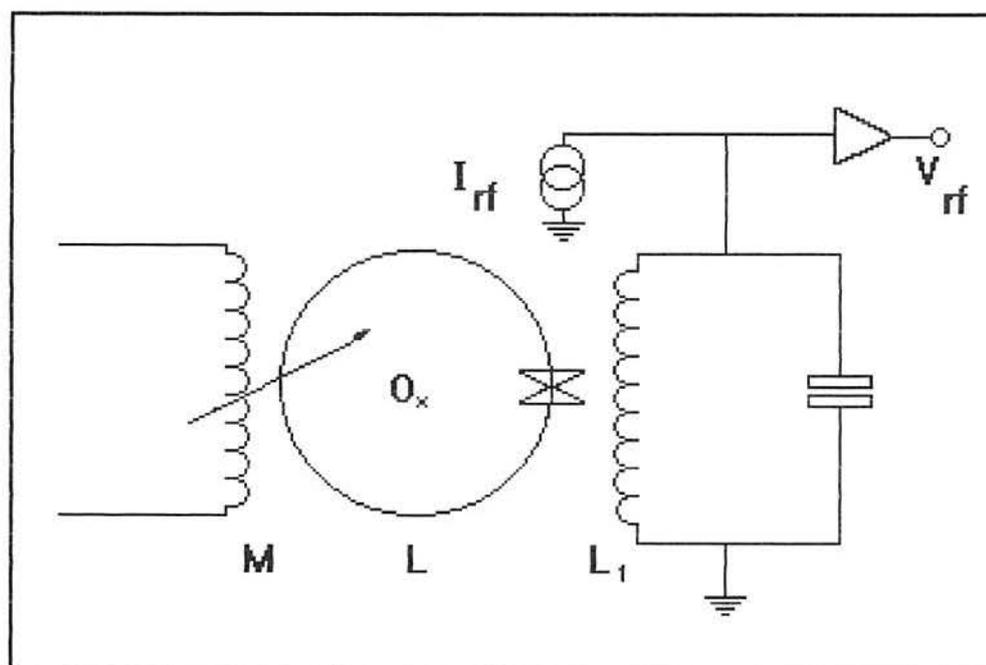


Fig. 3.35 - Diagrama esquemático de um SQUID comum circuito ressonante LC [GAL91].

3.5.4.1 - SQUID DC [GAL91]

Um SQUID DC consiste de um anel supercondutor com duas junções de Josephson, geralmente com propriedades semelhantes.

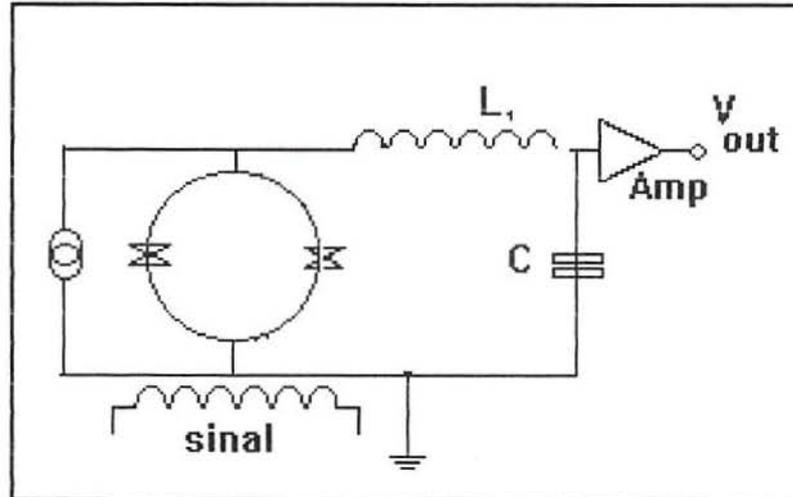


Fig. 3.36 - Diagrama esquemático de um SQUID DC [GAL91].

Em termos de limite de detecção tem-se relatado [AWS88] que um SQUID é sensível a mudança de $1.7 \times 10^{-34} \text{ J Hz}^{-1}$, um valor da ordem dos valores prognosticados pelo princípio de incerteza de *Heisenberg*. É interessante notar que SQUIDS podem perceber simples *photons* em áudio frequências.

3.5.5 - Medindo Campos magnéticos com SQUIDS [GAL91]

Ao invés de usar o anel (SQUID) como sensor direto de campo magnético, geralmente se utiliza uma bobina intermediária, conhecida como bobina transformadora de fluxo.

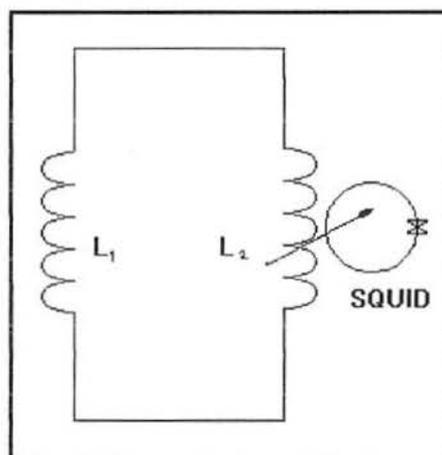


Fig. 3.37 - Configuração básica do transformador de fluxo com as bobinas primária e secundária [GAL91].

Um transformador inteiramente supercondutor, que faz uso da propriedade resistência-zero dos supercondutores para coletar a densidade de fluxo de uma grande bobina sensora, concentrada em uma área muito pequena dentro do anel do SQUID. Uma mudança em B_x causa uma mudança em i_s , que é sentida pelo anel SQUID como uma mudança do fluxo Φ_x . A fig. 3.39 mostra uma vista esquemática deste transformador. A máxima sensibilidade se dá quando as indutâncias dos enrolamentos primário e secundário são iguais. Um SQUID dentro de ambientes livres de interferências (ruídos) é capaz de detectar mudanças ΔB da ordem de 1 fT. Este é um valor muito menor que flutuações típicas do campo magnético da Terra que são da ordem de 1 nT.

3.5.6 - Aplicações de SQUIDS [GAL91]

3.5.6.1 - Magnetômetro Absoluto e Transdutor de Deslocamento [GAL91]

Simple SQUIDS podem medir somente mudanças de fluxo, e não o valor absoluto da densidade de fluxo. Como parte de uma medição precisa do comprimento de onda do elétron de *Compton*, foi desenvolvido um magnetômetro absoluto utilizando um SQUID, que combina a alta sensibilidade do supercondutor com uma medida precisa da densidade de fluxo dada pela

ressonância magnética nuclear. Sensibilidades de 3×10^{-11} T já foram conseguidas.

Um SQUID fornece a parte essencial do mais sensível transdutor de deslocamento hoje em operação que se tem notícias. Com este dispositivo deslocamentos da ordem de 10^{-19} m podem ser detectados [MIC87].

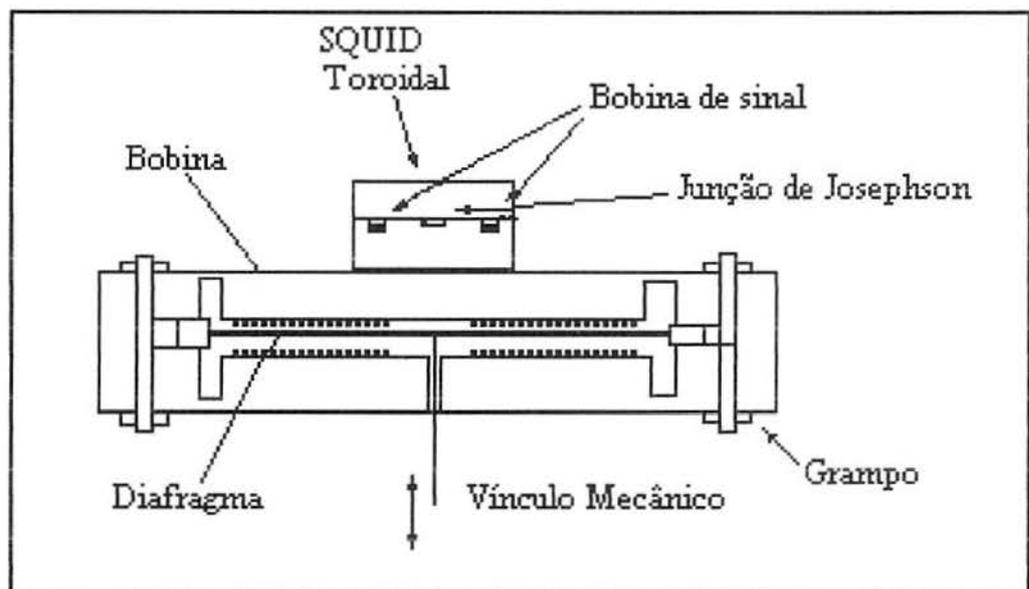


Fig. 3.38 - Detalhes internos da construção de um transdutor de deslocamento baseado num SQUID [GAL91].

3.5.6.2 - Medidas elétricas utilizando SQUIDS e o efeito *Josephson* [GAL91]

Um SQUID pode ser facilmente convertido de um medidor de fluxo para um medidor de corrente ou tensão.

A sensibilidade para tensões diretas é extremamente alta ($< 10^{-20}$ V); a sensibilidade para corrente também é muito boa ($\approx 10^{-13}$ A).

É claro que para medidas desta ordem é necessário ambientes estabilizados quanto a temperatura e livres de ruídos magnéticos [HIL85].

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO, SEM CONTATO, EM UM PLANO

4.1 - Sistema *Rast_2D*:

Rast_2D é o nome dado ao conjunto de 4 sensores magnéticos geometricamente dispostos de maneira a ter uma resposta diferente a um elemento de excitação, no caso, um magneto, sendo que a área total de movimentação deste magneto se restringe apenas à área limitada pelos 4 sensores. Anexo a este conjunto encontram-se mais um magneto, uma interface analógico/digital e um *software*; cuja função é "transformar" 4 sinais independentes entre si em duas coordenadas que representam o eixo de ordenadas (y) e abcissas (x) do magneto em relação a um ponto de referência (00) no caso, um dos cantos como se observa na fig. 4.1

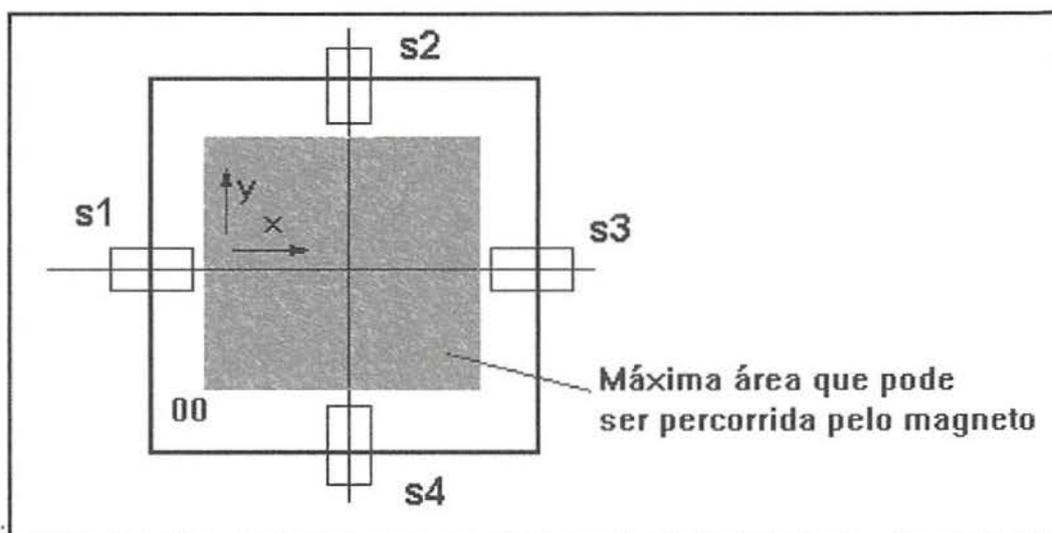


Fig. 4.1- Disposição dos sensores juntamente com área onde o magneto pode mover-se.

4.1.1 - Sensores

Sensores magnéticos ideais são aqueles que apresentam uma resposta comportada, estável, repetitiva, uniforme e idênticas entre si, de modo que todas as referências e os fundos de escala são iguais. As simulações implementadas são baseadas neste modelo.

Será considerado que o *sensor ideal* possua uma resposta do tipo $\frac{1}{x}$, ou seja, a saída em tensão é proporcional ao inverso da distância em relação ao ponto de referência (magneto), que no caso, considera-se idealmente como sendo um ímã puntiforme que gera um campo magnético uniforme e esférico (formando equipotenciais esféricas).

4.1.2 - Amplificadores

Assim como os sensores, considera-se este circuito como sendo ideal. Desta forma despreza-se efeitos de *CMRR (Common Mode Rejection Ratio)*, *offset* e ruídos externos (elétrico e magnético).

Considerando-se também que os sensores funcionem de forma similar a uma ponte de *Wheatstone* na qual dois fios alimentam e outros dois conduzem um sinal diferencial de desbalanço da ponte. Com isso a configuração do amplificador torna-se diferencial, passando a utilizar um amplificador de instrumentação de ganho G ; no caso, é usado um amplificador para cada sensor totalizando 4 amplificadores de instrumentação de ganho G .

4.1.3 - Interface A/D

Para efeito de análise, aqui também são desprezados os efeitos de resolução do conversor, bem como ruídos de qualquer natureza, comuns em circuitos como este.

4.1.4 - Software

A análise é baseada em elementos¹ de área, como pode ser observado no fluxograma (fig 4.2).

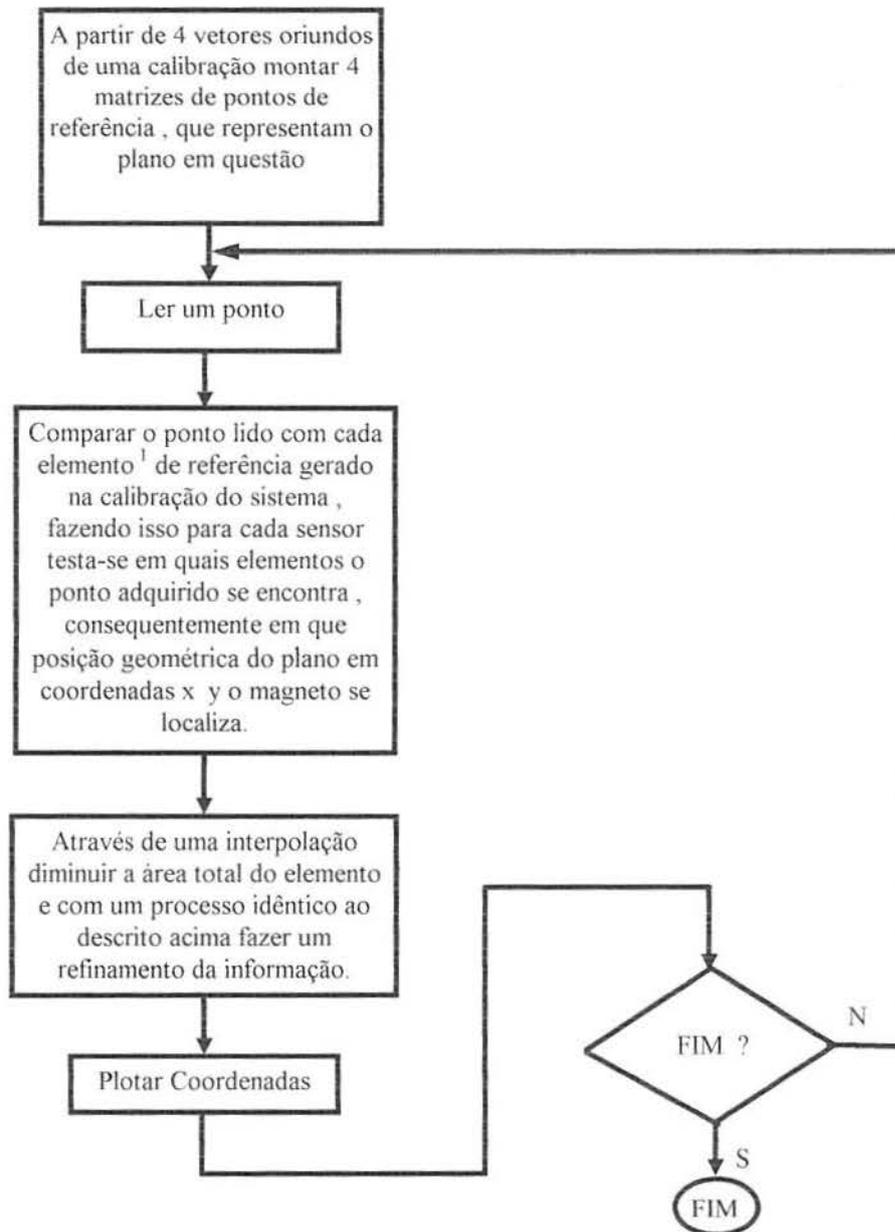


Fig. 4.2 - Fluxograma simplificado do software do sistema.

¹ O elemento neste caso possui a área limitada por 4 vértices que são 4 pontos de calibração, cujas distâncias são uma unidade medida, também definida na calibração.

Quando o magneto está se deslocando sobre o plano, torna-se possível definir um ponto, e cercá-lo por 4 vértices de referência, que na verdade são medidas reais previamente feitas. Conseqüentemente, tal processo faz uma varredura nas matrizes de pontos definidos para os sensores, assim, pode-se registrar com precisão a posição exata deste magneto.

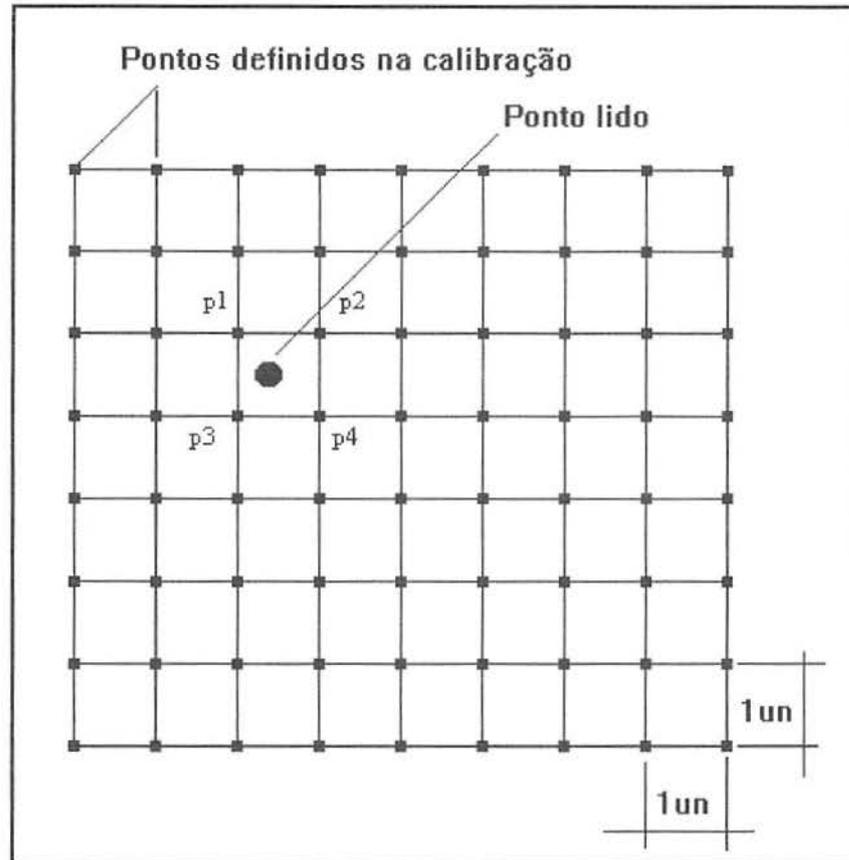


Fig. 4.3 - Uma matriz de pontos definidos por uma calibração prévia. onde a distância entre dois pontos corresponde a uma unidade de distância e os pontos p1 p2 p3 e p4 podem ser definidos como função dos sensores $P_n = F(s_1, s_2, s_3, s_4)$.

Uma vez determinadas as coordenadas dos 4 vértices que cercam o ponto lido, através de um processo de interpolação cria-se uma nova matriz dentro deste elemento e por uma maneira similar é feito um refinamento da resposta previamente encontrada; na verdade este procedimento apenas diminui a área total do elemento que cerca o ponto lido. É o que mostra a

quarta parte do fluxograma. Feito isso basta plotar o ponto na tela e em seguida ler um novo ponto para recomeçar todo o processo.

4.2 - Simulações

Com base no sistema descrito é reproduzido um ensaio primeiramente considerando todas as condições ideais e posteriormente introduzindo fontes de erros, que podem se manifestar na prática.

4.2.1 - Calibração do sistema

Considerando os sensores ideais obtém-se uma resposta comportada, apesar de não linear (resposta do sensor até o magneto):

$$V_0 \propto \frac{1}{r} \quad (4.1)$$

Aplicando-se a equação 4.1 e considerando-se individualmente os 4 sensores é possível gerar as curvas de respostas dos mesmos, (fig. 4.4) com base nos dados gerados.

4.2.2 - Simulando um deslocamento retilíneo

Para implementar a simulação de um deslocamento retilíneo é necessário introduzir no sistema a equação de uma reta do tipo

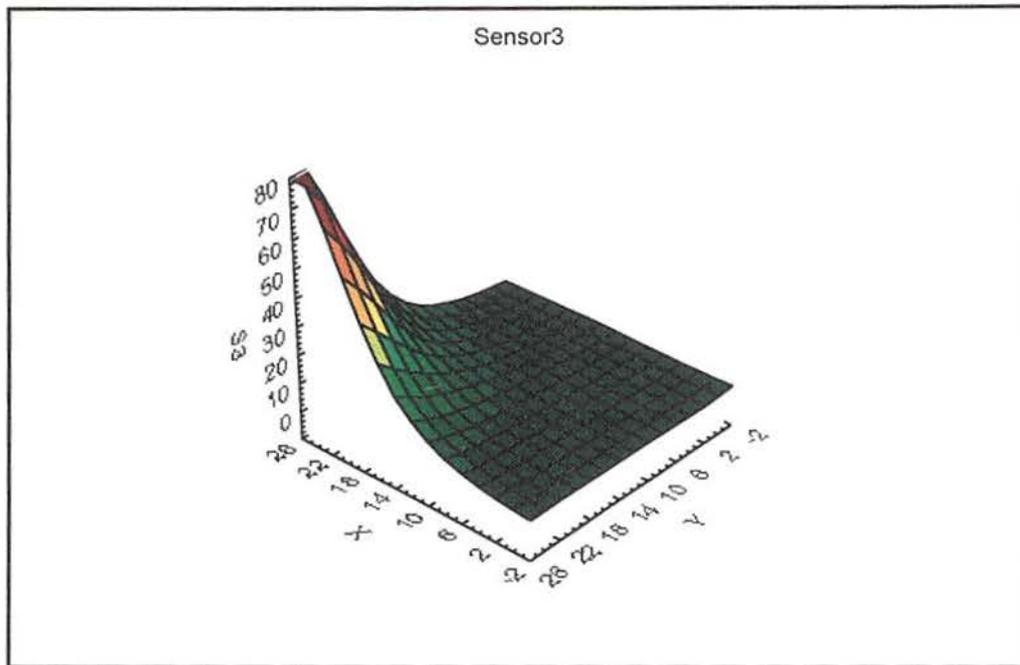
$$y = ax + b \quad (4.2)$$

onde x e y são coordenadas e a e b são parâmetros. A questão está em reproduzir esta reta como função da resposta dos sensores que é $V_0 \propto \frac{1}{r}$ com um ganho de 100. Juntando estas equações e aplicando para uma reta que passa pela diagonal ($a=1$ e $b=0$) a equação simplificada fica:

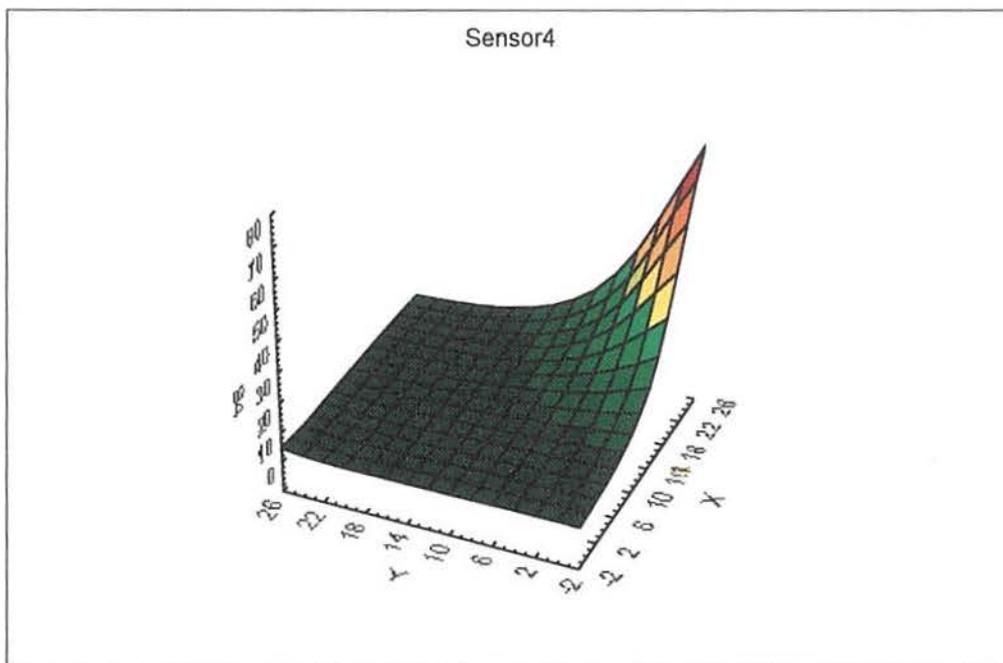
$$y = x. \quad (4.3)$$

Aplicando para o sensor (4.1) tem-se $V_0 = 100 \frac{1}{\sqrt{x^2 + x^2}}$ ou

plotando este resultado obtém-se :



(a)



(b)

Fig. 4.4 - Curvas 3D baseadas numa simulação de sensores que têm resposta do tipo $\frac{1}{x}$ em função da distância até o magneto com um ganho de 100 já associado. Em (a) a resposta do sensor 3 e em (b) a resposta do sensor 4, as respostas dos sensores 1 e 2 são simétricas.

Fig. 4.4 - Curvas 3D baseadas numa simulação de sensores que têm resposta do tipo $\frac{1}{x}$ em função da distância até o magneto com um ganho de 100 já associado. Em (a) a resposta do sensor 3 e em (b) a resposta do sensor 4, as respostas dos sensores 1 e 2 são simétricas.

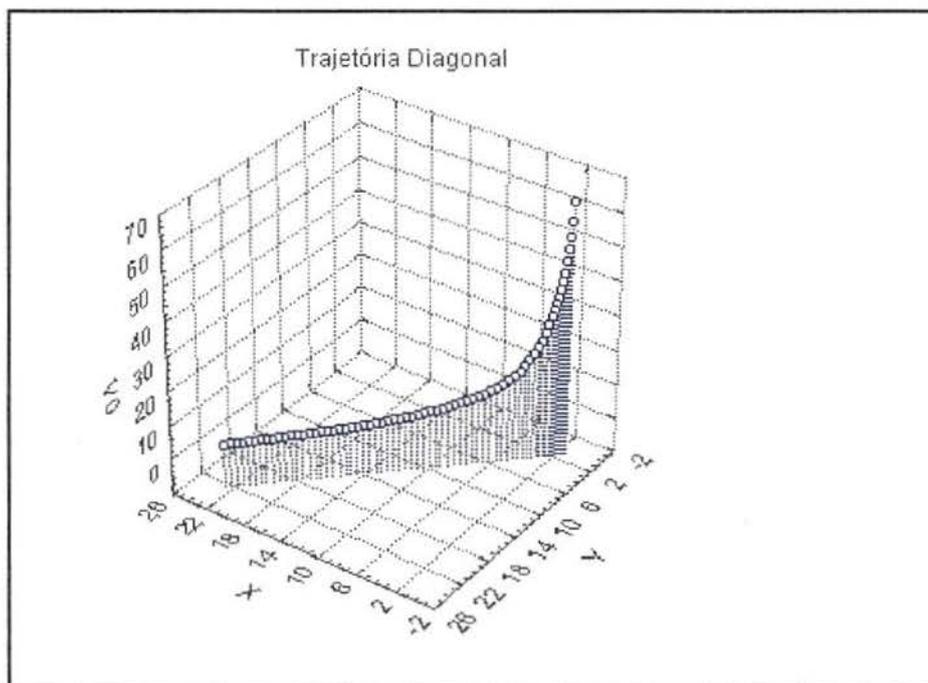


Fig. 4.5 Resposta do sensor 1 para um deslocamento retilíneo na diagonal ($y=x$).

Implementando esta equação no *software* desenvolvido, (uma para cada sensor), sob as condições ideais, obtem-se o seguinte resultado:

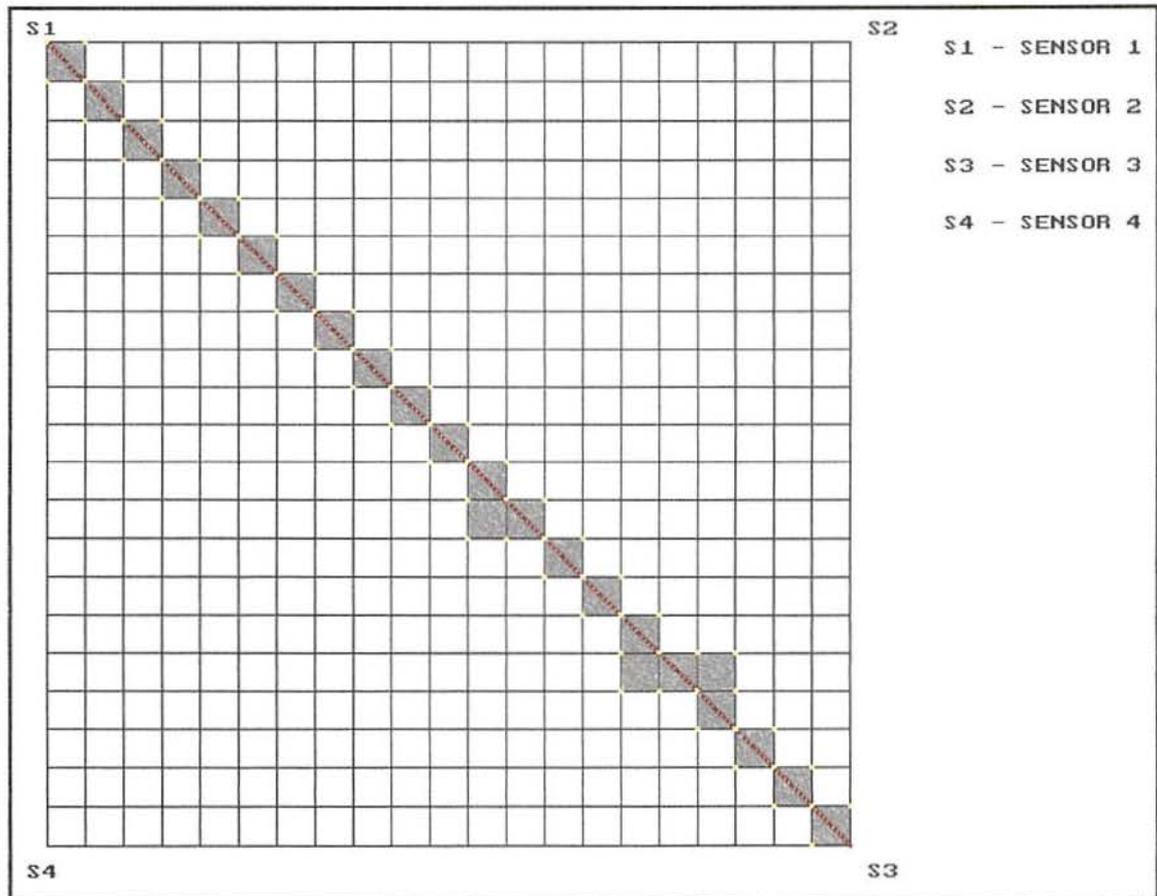


Fig. 4.6 Resposta do sistema para um deslocamento do tipo $x=y$ (diagonal). Pontos em amarelo representam a primeira aproximação, pontos em vermelho representam a posição do ímã (refinamento do elemento de área).

4.2.3 - Simulando uma trajetória senoidal

Para implementar a simulação de uma trajetória senoidal é preciso entrar com uma expressão do tipo

$$y = \sin(x) \quad (4.5)$$

na expressão (4.1) de modo que

$$V_0 = \frac{100}{\sqrt{x^2 + (\sin(x))^2}} \quad (4.6)$$

esta resposta pode ser observada na fig. 4.7 e a resposta do sistema pode ser vista na fig. 4.8.

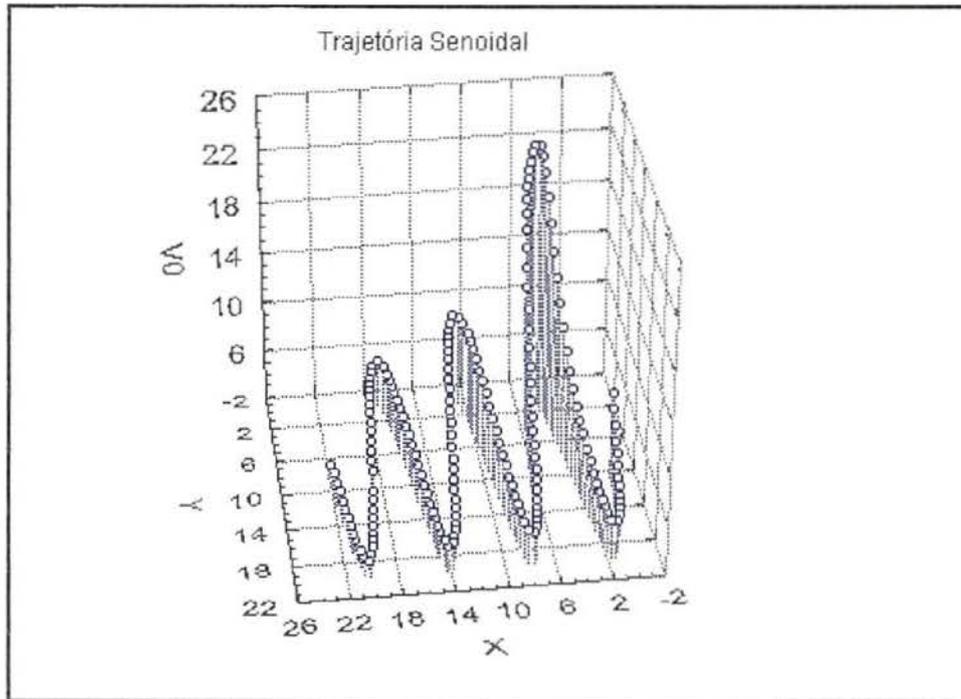


Fig. 4.7 Resposta de uma trajetória senoidal para o sensor 1.

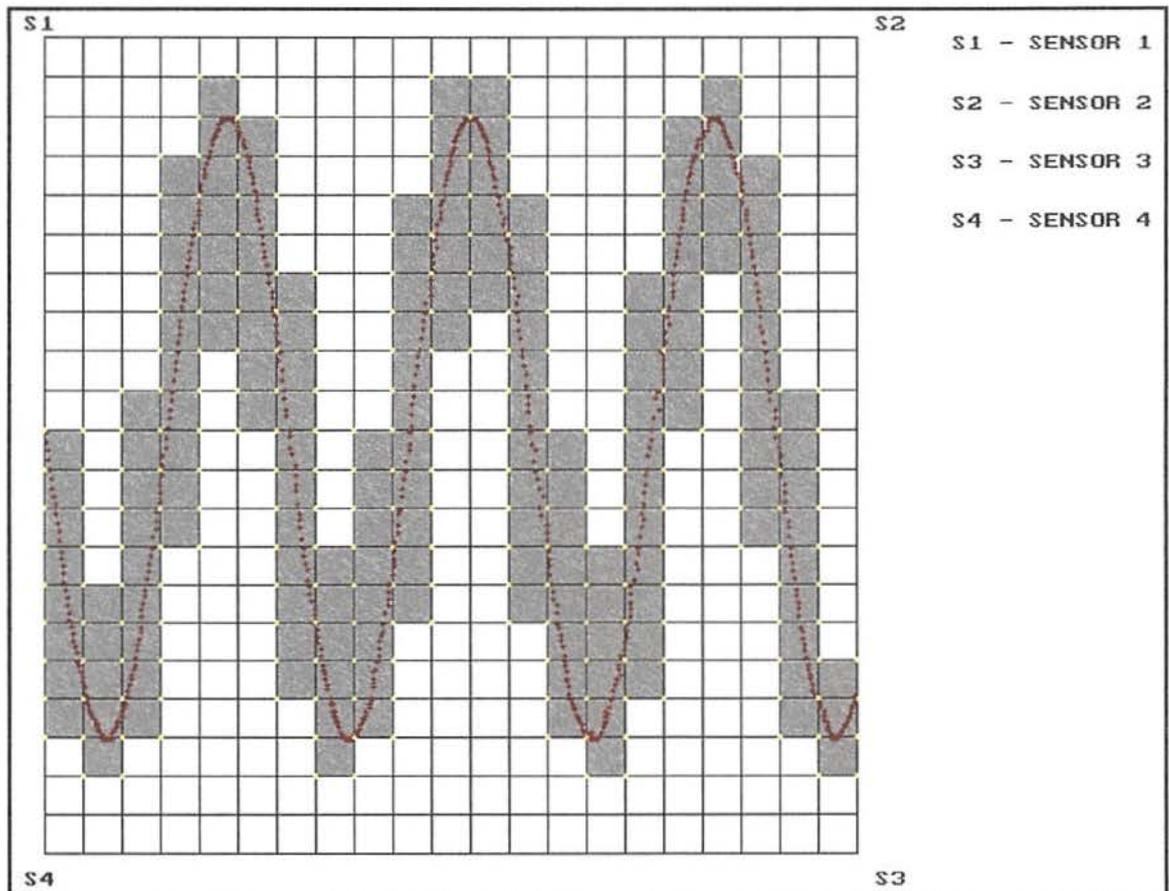


Fig. 4.8 Resposta do sistema para um ponto com trajetória senoidal.

4.2.4 - Simulando uma trajetória espiral

Para simular uma trajetória espiral, procede-se da mesma forma como para os casos diagonal e senoidal. Assim, faz-se

$$x = i \cdot \sin(i) \quad (4.7)$$

$$y = i \cdot \cos(i) \quad (4.8)$$

onde i varia de 1 a 22. Substituindo na equação de resposta do sensor chega-se a:

$$V_0 = \frac{100}{\sqrt{(i \cdot \sin(i))^2 + (i \cdot \cos(i))^2}} \quad (4.9)$$

é possível ver as respostas do sensor e do sistema respectivamente nas fig. 4.9 e fig. 4.10.

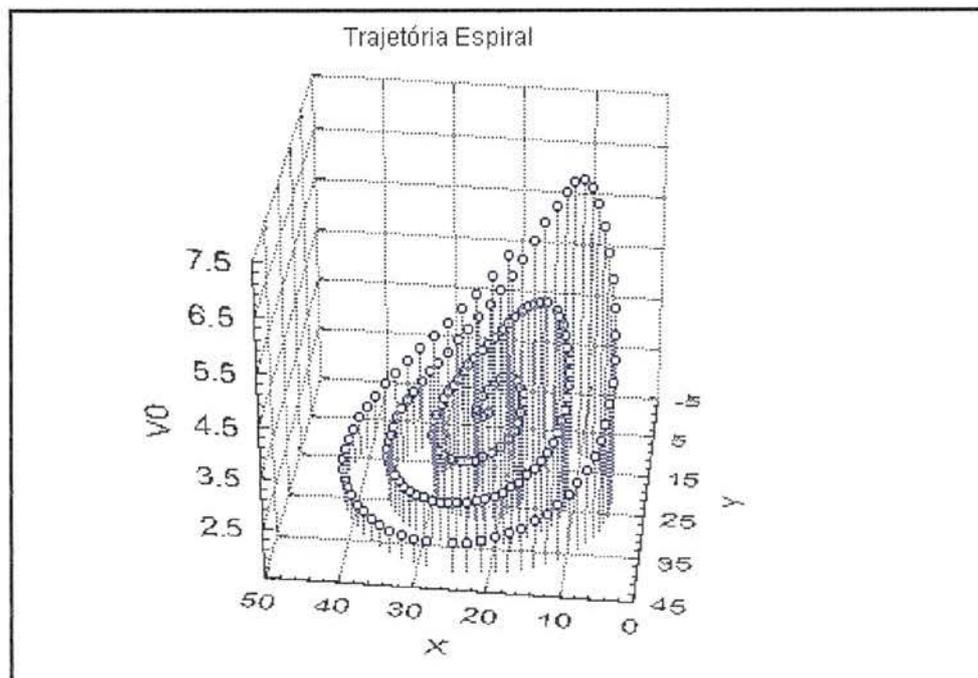


Fig. 4.9 Resposta de uma trajetória espiral para o sensor 1.

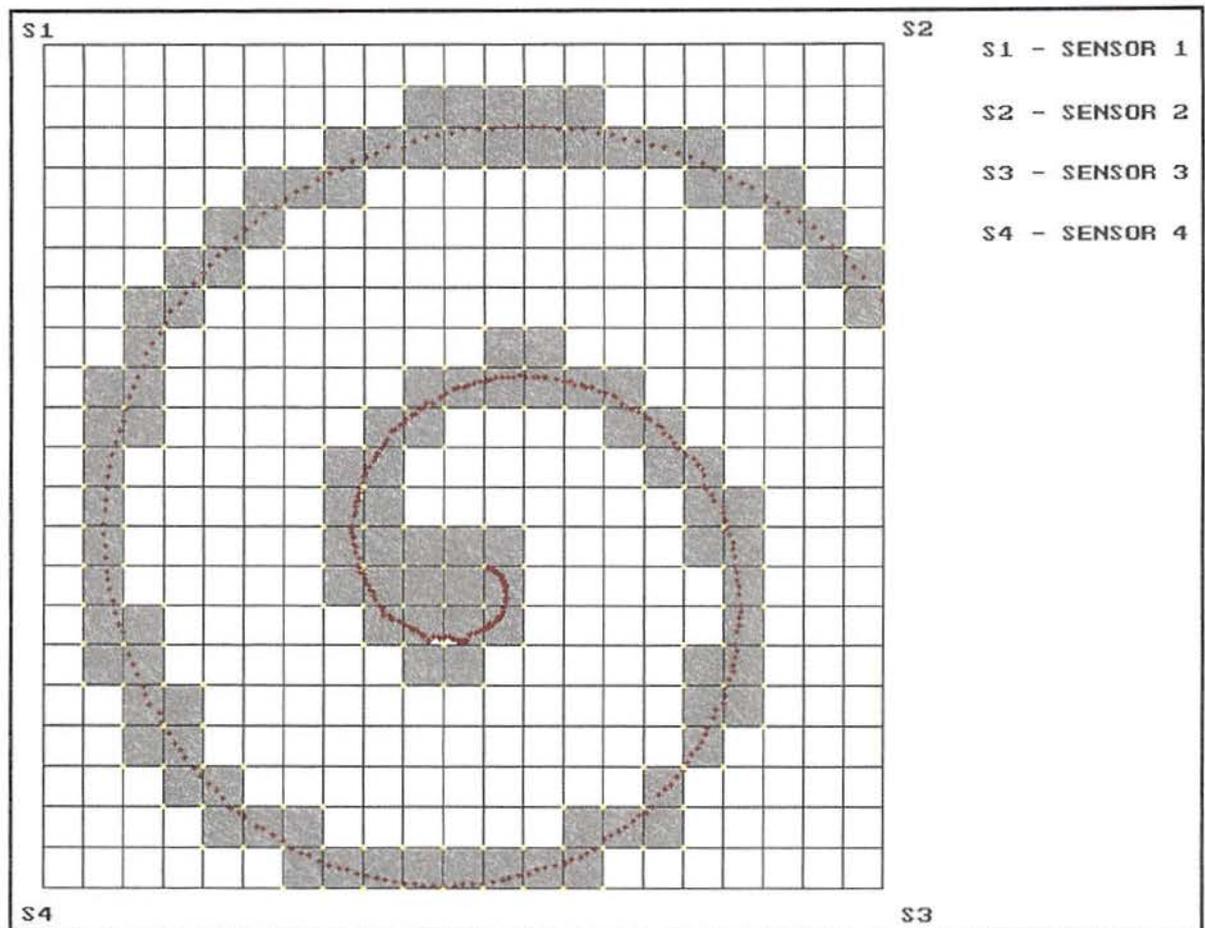
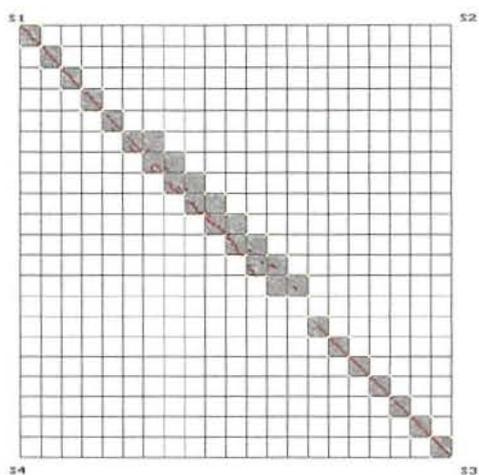


Fig. 4.10 Resposta do sistema para um ponto com trajetória espiral.

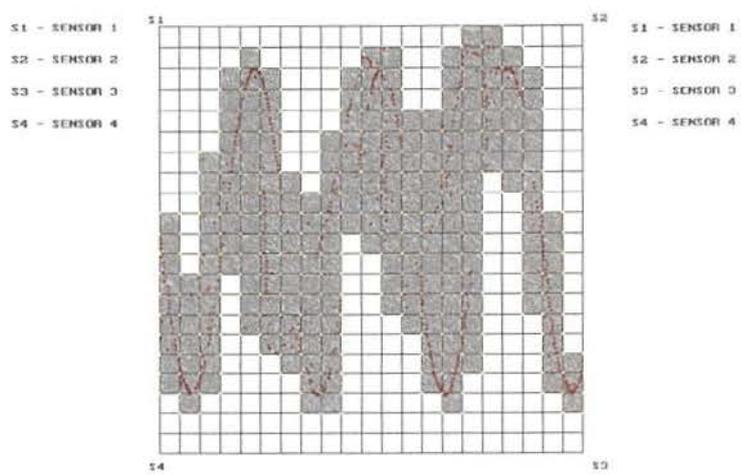
4.2.5 - Simulando Ruídos nos Sensores

Depois de ver a resposta do sistema para um caso ideal, o objetivo torna-se inserir problemas nos sensores que podem acontecer numa situação real, como *offset* e indução eletromagnética de 60 Hz.

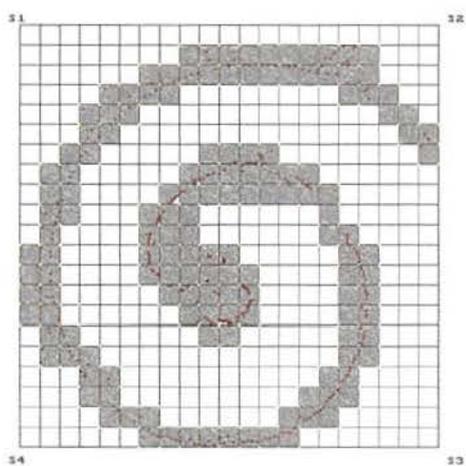
Primeiramente é introduzido em um dos sensores, um ruído de 1% do valor de fundo de escala (máximo valor de resposta) isto significa 0.7 em 70, no caso em análise :



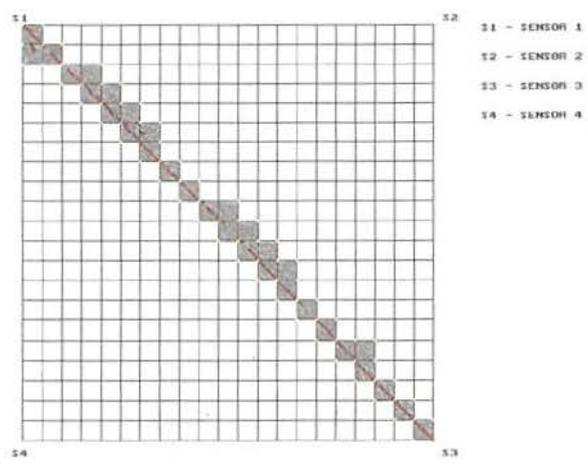
(a)



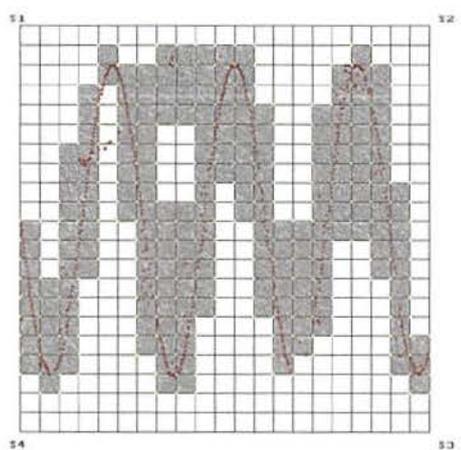
(b)



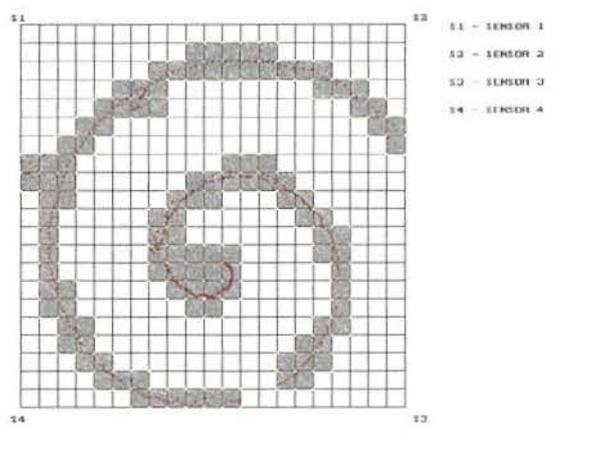
(c)



(d)



(e)



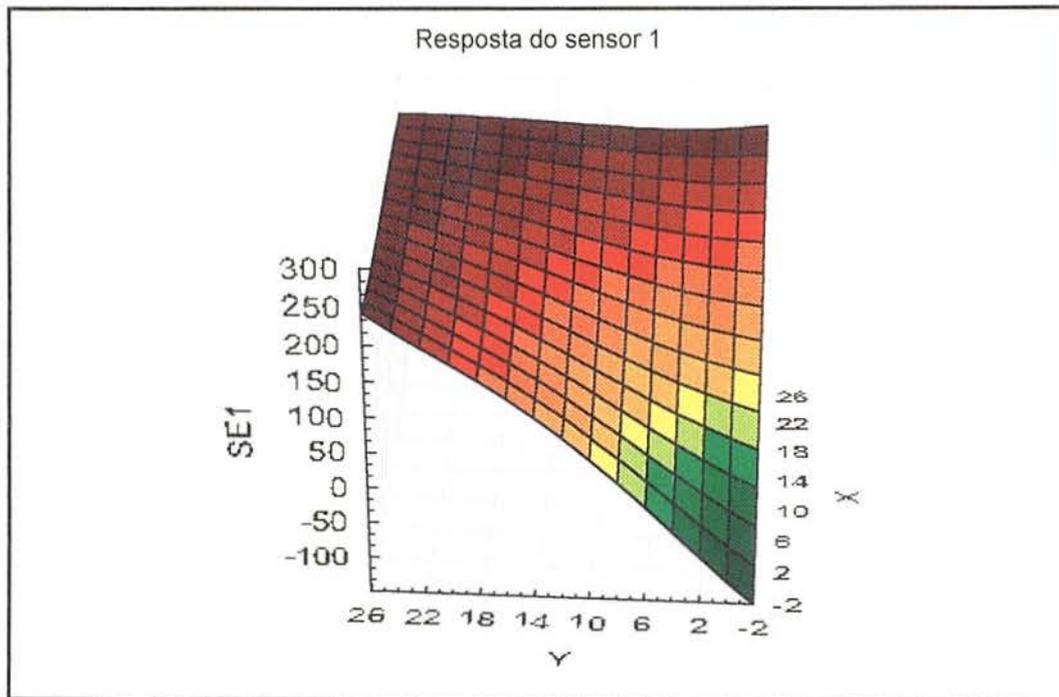
(f)

Fig. 4.11 - Simulações do sistema introduzindo *offset*. (a) Resposta da trajetória tipo reta com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (b) Resposta da trajetória tipo seno com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (c) Resposta da trajetória tipo espiral com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (d) Resposta da trajetória tipo reta com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor. (e) Resposta da trajetória tipo seno com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor. (f) Resposta da trajetória tipo espiral com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor.

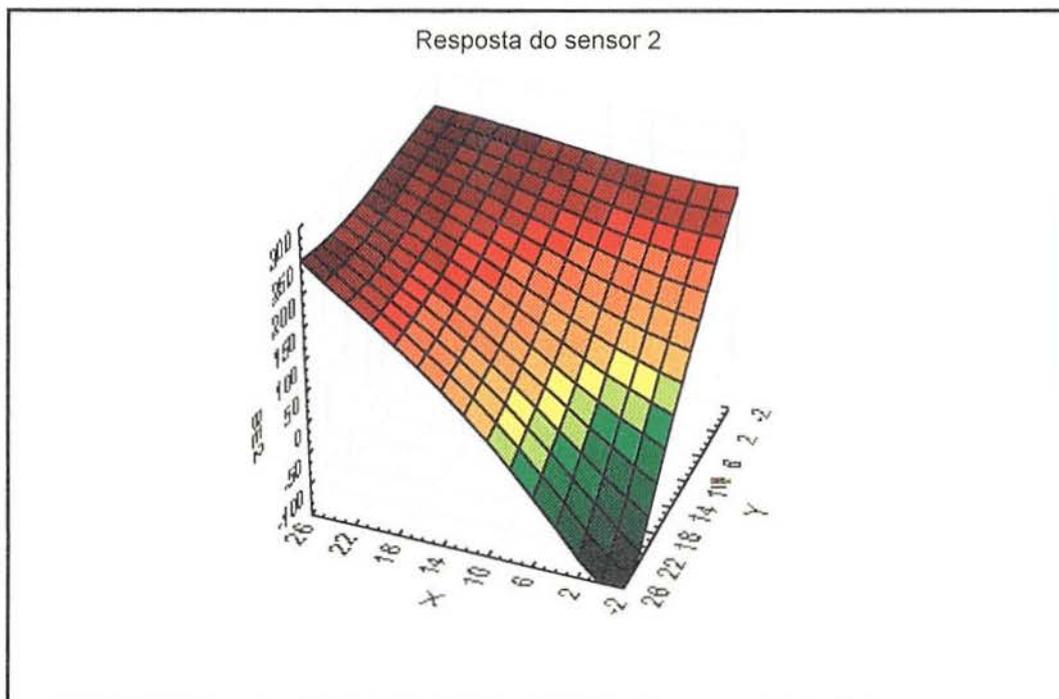
Como pode-se observar o sistema mostrou-se bastante sensível para qualquer variação, ainda que em apenas um sensor. De alguma forma isso era esperado. Como existem 4 sensores, quando o *software* tem "certeza" da posição de um ponto encontra 6 coincidências (s1 com s2 , s1 com s3 , s1 com s4 , s2 com s3 , s2 com s4 , s3 com s4). Com a ausência de um dos sensores, no máximo três coincidências serão encontradas.

Um fator que também contribui muito para esta sensibilidade é o tipo de resposta do sensor ($\frac{1}{x}$). Isso quer dizer que próximo a um dos sensores há uma resolução muito boa apenas para um sensor, nos demais a variação do sinal para um elemento é muito pequena. A implementação de um novo sensor com uma resposta bem mais suave (baseado em uma curva real e desprezando efeitos indesejados como diretividade, influência de ruídos, etc) do tipo $V_0 = -123.735 + 20.09672x - 0.277378x^2$ NOTA¹ pode ter um comportamento melhor. Duas curvas de resposta de dois sensores podem ser observadas nas figuras 4.12a e 4.12b, (as outras duas são simétricas):

¹ Os valores desta curva, forma levantados a partir de um experimento onde o ímã se deslocava retilineamente na direção do sensor. Com estes dados foi feito então um ajuste de curvas.



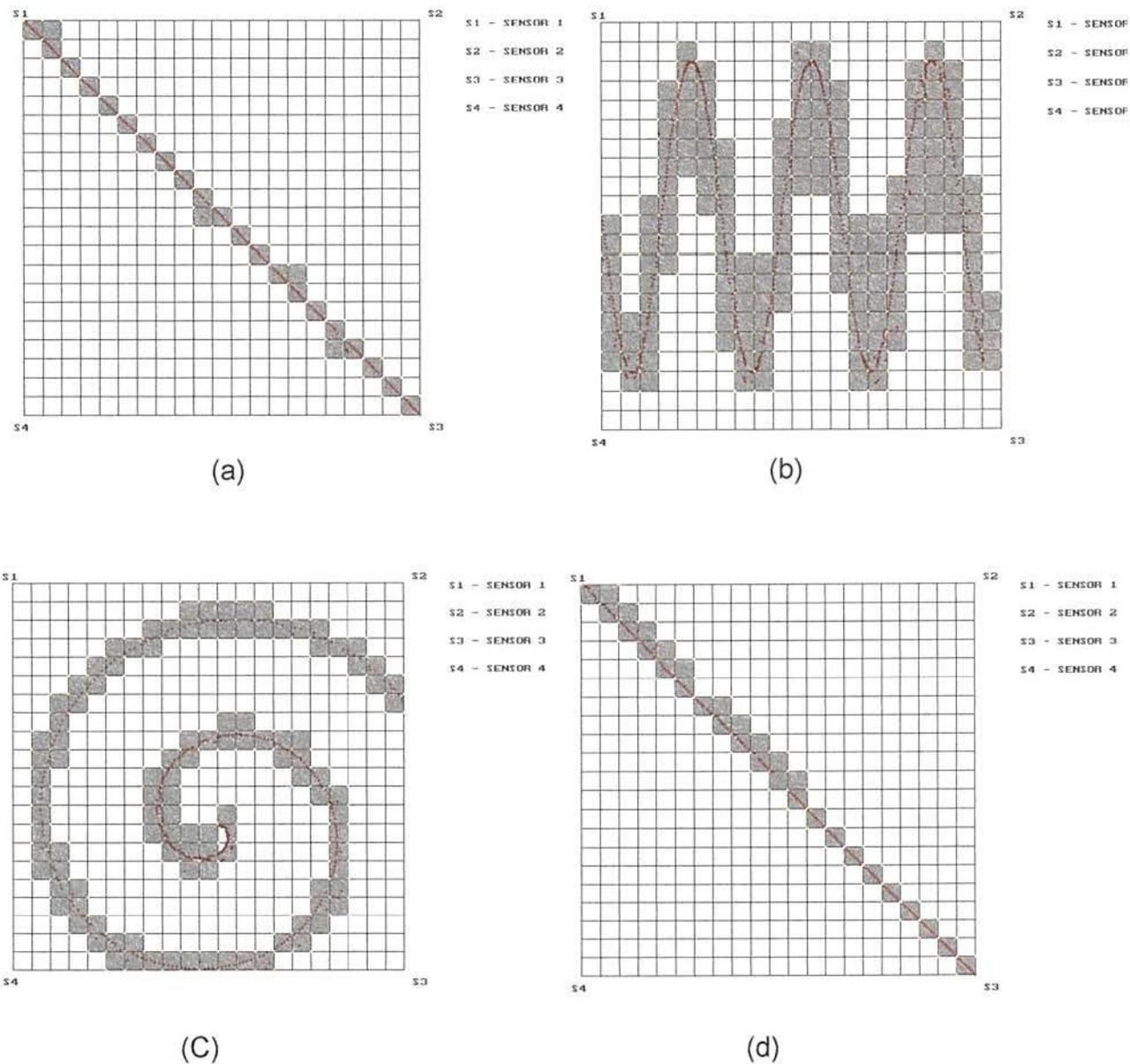
(a)



(b)

Fig. 4.12 Simulação das respostas ($V_0 = -123.735 + 20.09672x - 0.277378x^2$) dos sensores 1 e 2 ((a) e (b)), visto que farão parte da nova matriz de pontos. As respostas dos sensores 3 e 4 são simétricas.

Fazendo-se uma análise similar a anterior, foram reproduzidas novamente as 3 trajetórias (reta, senóide e espiral) sob as mesmas condições de idealidade. Como era esperado, as respostas foram idênticas à primeira simulação. O interessante aqui é a simulação dos erros, que influenciaram muito no sistema anterior. Como anteriormente, foi inserido um erro de offset de 1%, depois aumentado para 10% em um dos sensores. Os resultados podem ser observados na fig. 4.13:



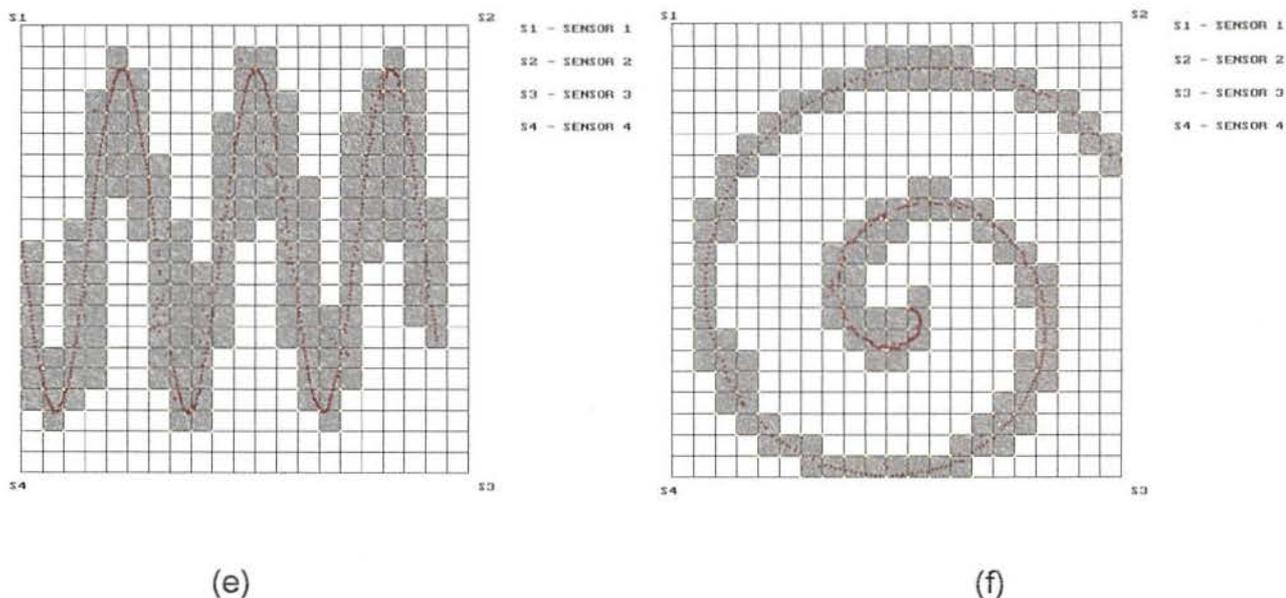


Fig. 4.13 - Simulações do sistema introduzindo *offset*. (a) Resposta da trajetória tipo reta com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (b) Resposta da trajetória tipo seno com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (c) Resposta da trajetória tipo espiral com 1% de *offset* do fundo de escala num sensor. (d) Resposta da trajetória tipo reta com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor. (e) Resposta da trajetória tipo seno com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor. (f) Resposta da trajetória tipo espiral com 10% de *offset* do fundo de escala num sensor.

Como era esperado, as influências dos *offsets* continuam, porém com menor intensidade. Pode-se observar ainda, que um erro de 1 % e outro de 10% não apresentam uma diferença significativa, isto porque, tanto num caso como no outro, os valores redundantes dos três sensores garantem a posição correta .

Como estas curvas se aproximam das curvas reais, torna-se conveniente simular mais alguns casos comuns numa situação real :

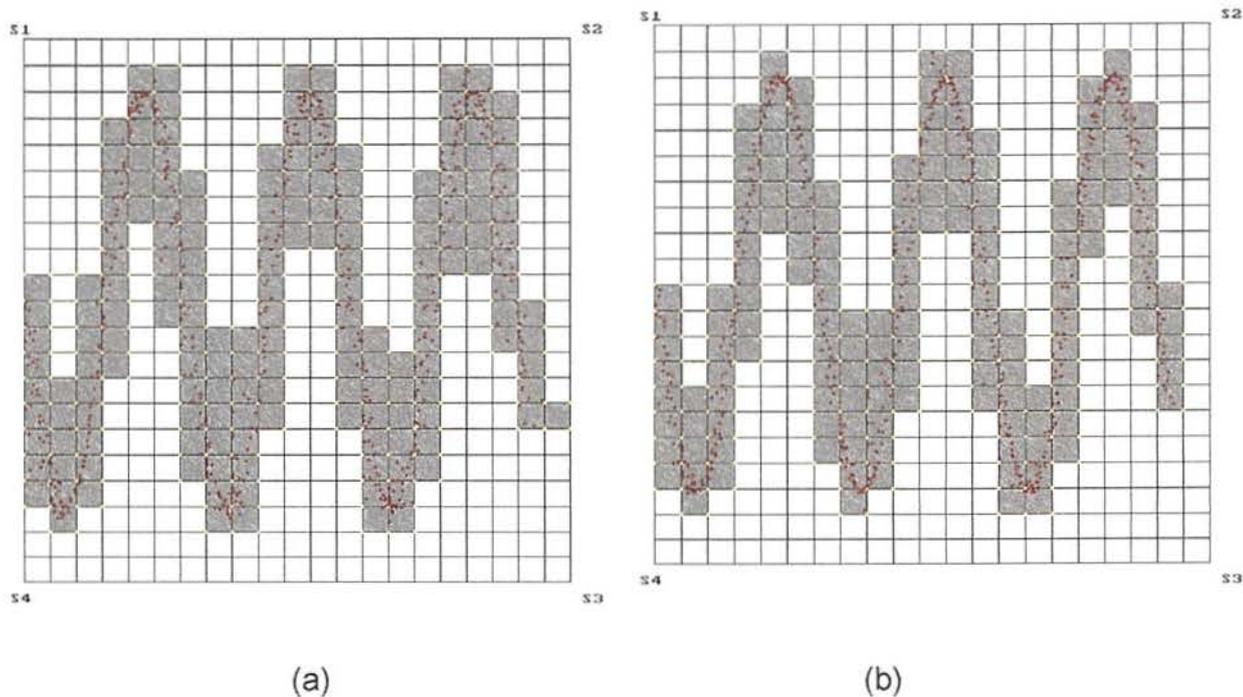


Fig. 4.14 - Em (a) vê-se a resposta do sistema para um ruído de 60 Hertz de amplitude de 1% do fundo de escala para dois sensores (s1 e s2). Em (b) a resposta para um ruído de 60 Hertz para os quatro sensores, com amplitude de 0.25% do fundo de escala.

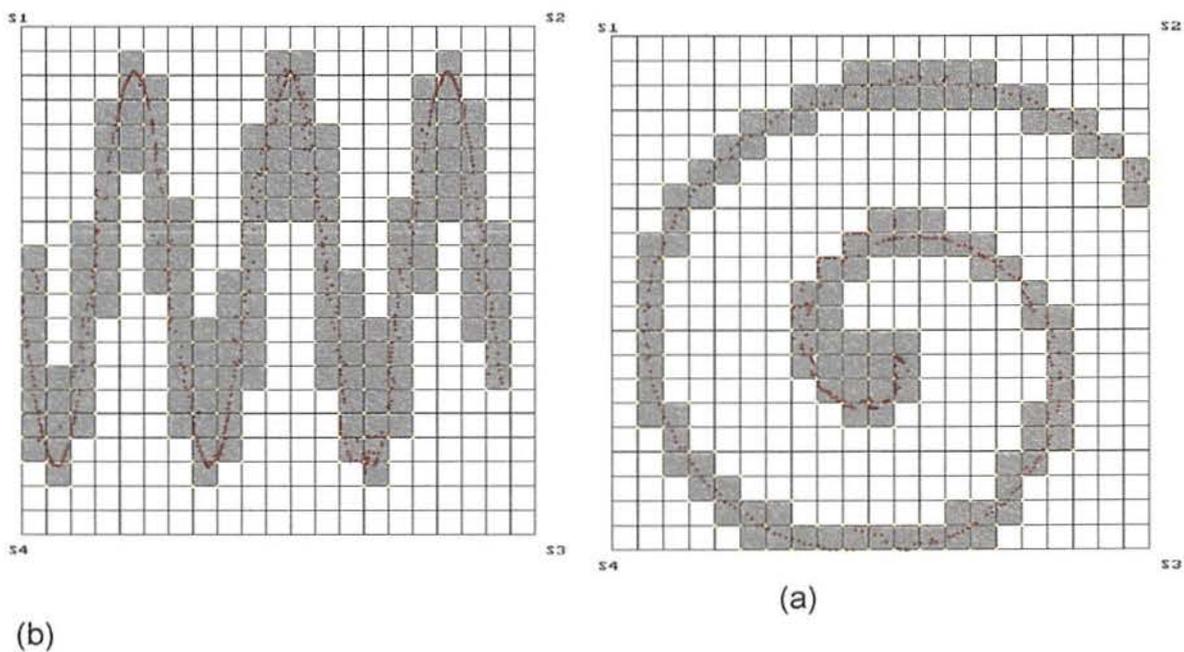


Fig. 4.15 - Resposta do sistema para um *offset* de 0.25% de fundo de escala para os quatro sensores, em uma trajetória senoidal (a) e espiral (b).

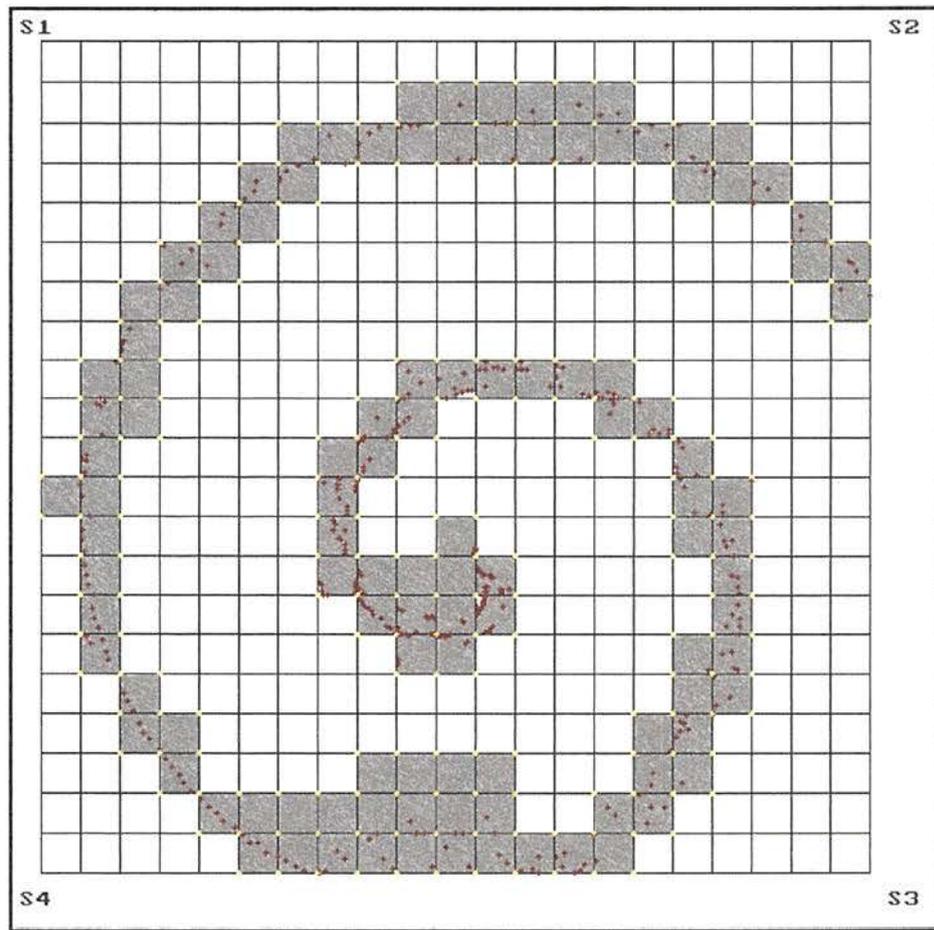


Fig. 4.16 Resposta do sistema para uma situação de ruído nos 4 sensores , de 1% , 0.75% , 0.50% e 0.25% do fundo de escala.

Depois desta análise, conclui-se que é possível implementar o sistema proposto, porém o desempenho do mesmo depende muito do comportamento dos sensores. Repetibilidade e estabilidade são características que devem ser exigidas. Como pode se observar, vão determinar a precisão do sistema. O ruído é outro fator que deve ser considerado, seja ele de origem elétrica ou magnética, visto que, num sistema deste tipo (com ganho alto e excitação de um campo magnético externo) é comum surgirem problemas desta natureza.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO SEM CONTATO NO ESPAÇO

5.1 - Sistema *Rast_3D*

Rast_3D é o nome dado ao conjunto de 8 sensores magnéticos geometricamente dispostos de maneira a ter uma saída diferente entre si (devido a posição diferenciada dos sensores em relação ao magneto), um elemento de excitação, no caso um magneto, sendo que o espaço de deslocamento total se restringe apenas aquele determinado pelos oito sensores dispostos nos vértices virtuais de um cubo imaginário (fig 5.1).

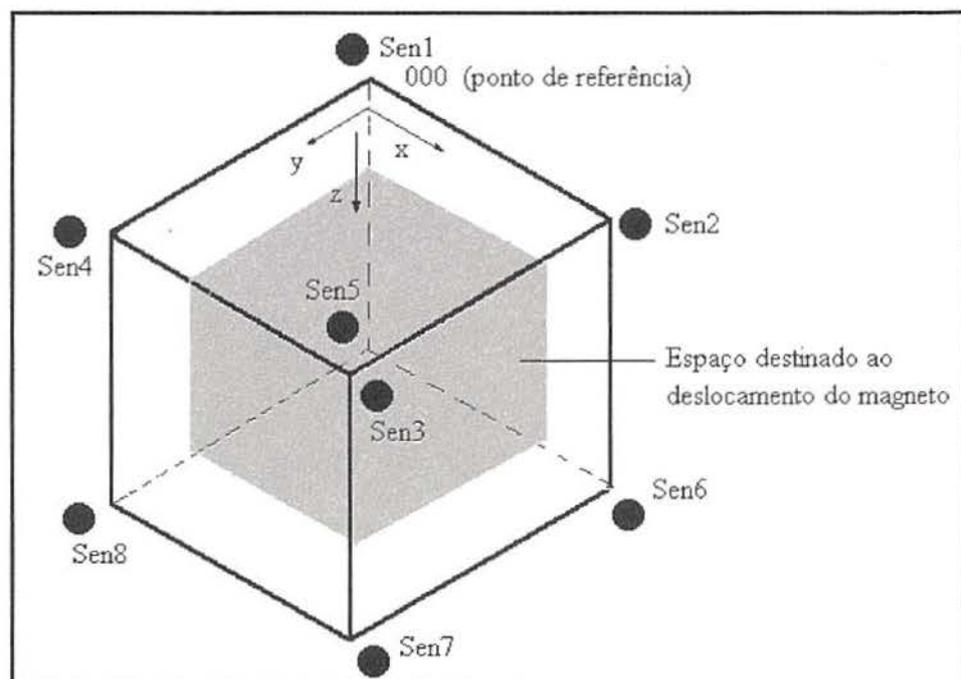


Fig 5.1 - Disposição dos 8 sensores e o volume útil apresentado.

Anexo a este conjunto encontra-se ainda um conversor A/D (conversor analógico digital) de 8 canais e um *software* cuja função é “transformar” oito sinais independentes entre si em três coordenadas que representam os eixos x, y e z do magneto em relação a um ponto de referência (000).

5.1.1 - Sensores

A exemplo do que foi implementado no capítulo 4, os sensores serão considerados ideais, com suas respostas idênticas e repetitivas através do modelamento de uma determinada função, no caso com a seguinte forma:

$$F(x) = \frac{1}{x} \quad (5.1)$$

O magneto é o responsável pela excitação dos sensores e também é considerado uniforme e puntiforme para garantir todas as condições ideais.

5.1.2 - Amplificadores

São os mesmos utilizados no capítulo 4, descritos no ítem 4.1.2, apenas a quantidade é diferente, neste caso é utilizado um amplificador para cada sensor, sendo então oito no total.

5.1.3 - Interface A/D

O conversor utilizado é o mesmo do capítulo 4, (ítem 4.1.3), a única diferença é que neste caso, são utilizados 8 canais.

5.1.4) *Software*

A busca do ponto é muito parecida com o caso 2D, porém a quantidade de dados é muito maior, de modo que o processamento torna-se muito mais lento e o consumo de memória do microcomputador muito maior, e além disto os problemas em posições intermediárias (fronteiras) entre dois elementos agora são agravados, visto que o elemento de volume¹ em questão é um cubo e este possui 6 faces e oito arestas, isto significa que a probabilidade de pontos existirem em zonas de transição entre duas ou mais posições definidas é maior

que no caso 2D. Independente disto, o software também é baseado na varredura de elementos de volume como pode ser observado pelo fluxograma:

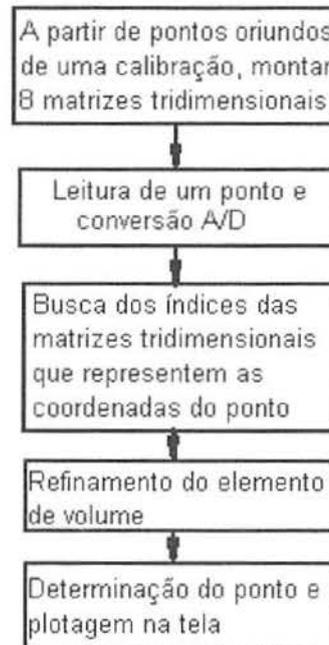


Fig 5.2 - Fluxograma do sistema Rast_3D.

A função do primeiro bloco é organizar os dados de calibração de maneira que possam ser processados pelo *software*. Os dados que eram armazenados em um vetor para cada sensor são arranjados em matrizes tridimensionais, cujos índices representam as coordenadas da posição do magneto. Uma observação importante deste bloco é que a quantidade dos dados é muito grande de modo que muita memória precisa ser alocada.

O segundo bloco faz a leitura do ponto e a conversão de um valor analógico para digital, nos oito canais referentes aos oito sensores.

O terceiro bloco faz a busca (varredura) através das matrizes previamente organizadas. Nesta etapa o programa localiza o elemento de volume que engloba o ponto em questão. Deve ser observado que é preciso implementar rotinas de redundância em situações de fronteira onde dois

¹Elemento de volume é definido como sendo o menor volume determinado pelo sistema, delimitado por oito valores lidos pelos sensores (na calibração).

elementos de volume podem apresentar as mesmas características, porém é preciso lembrar que o objetivo desta etapa é reconstruir um volume, com pontos mapeados partindo de apenas oito pontos (os vértices do cubo).

O bloco de refinamento consiste em interpolar um elemento de volume, definido por oito pontos de calibração, determinados no bloco anterior, fazendo uma matriz idêntica a original dos sensores e buscar dentro desta nova matriz um ponto que represente uma posição mais próxima do magneto em relação aos sensores. Devido a quantidade de dados envolvida, também foi preciso limitar em 10 o número de pontos a serem interpolados, empobrecendo a resolução do sistema.

O último bloco faz a plotagem do ponto na tela em três vistas (frontal, lateral e superior). Dessa maneira são impressos na tela do computador 3 pontos simultâneos em três planos distintos que representam a verdadeira localização do magneto dentro do volume definido.

De uma visão geral, o sistema é calibrado através de padrões de distâncias; os dados lidos pelo conversor A/D são armazenados e arranjados de modo a representar uma posição (coordenadas). É feita então a leitura de um ponto dentro do espaço limite e como primeiro passo, é cercado um elemento de volume definido pelos oito pontos mais próximos da posição real do magneto, posteriormente é feita uma interpolação, que serve como um refinamento da busca do ponto, sendo este o resultado aceito como definitivo pelo sistema.

5.2 - Simulações

As simulações feitas neste capítulo vão primeiro seguir um modelo ideal dos sensores, ou seja, os pontos gerados são uniformes, comportados e estarão livres de ruídos de qualquer natureza. Posteriormente a exemplo do que foi feito no capítulo 4 serão introduzidos ruídos de *offset* e sessenta hertz.

5.2.1 - Calibração do sistema

Os pontos gerados para simular a resposta dos sensores seguem a equação $V_0 \propto \frac{1}{r}$ com um ganho de 100; cuja forma pode ser vista na fig 4.4.

5.2.2 - Simulando um deslocamento retilíneo

Considerando que a trajetória seja diagonal basta fazer as coordenadas $x = y = z$ e introduzir esta condição na equação da resposta dos sensores :

$$\Rightarrow \frac{100}{r} = \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \Leftrightarrow x = y = z = k \Leftrightarrow R = \frac{100}{\sqrt{3k^2}} \equiv \frac{100}{k\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

Para visualizar esta resposta considerando que será feita análise para cada plano observe a fig. 4.5.

Implementando esta equação no sistema, (uma para cada sensor), sob as condições ideais, obten-se a resposta que pode ser vista na fig. 5.3.

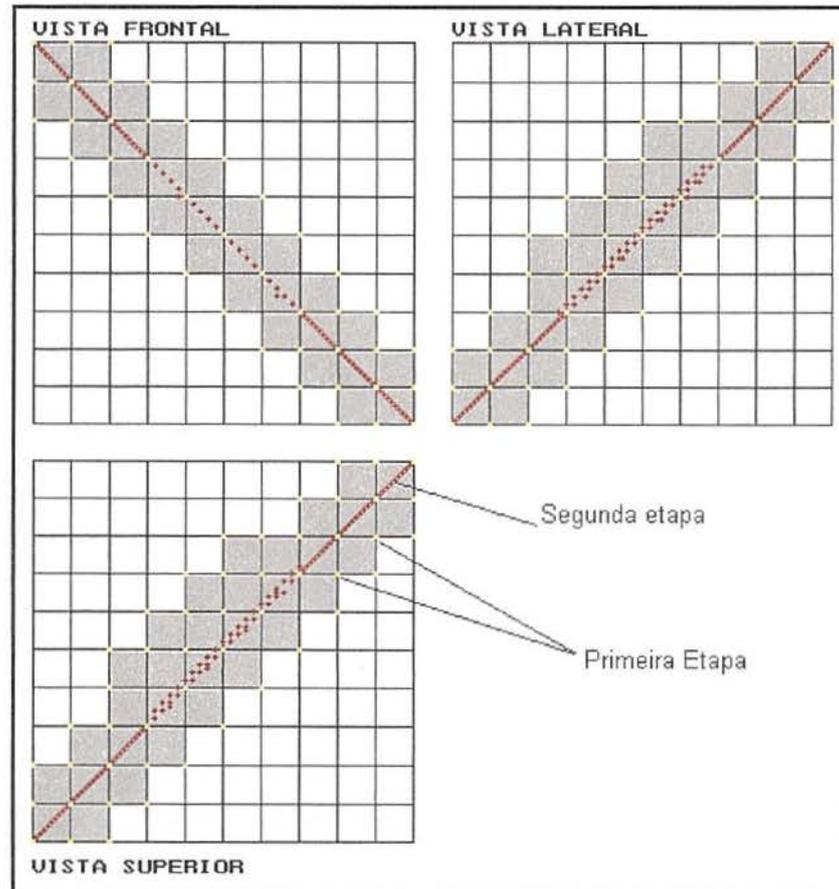


Fig 5.3 - Resposta do sistema para um deslocamento diagonal $x=y=z$.

Na fig. 5.3, as duas etapas do software podem ser bem caracterizadas; a primeira demarcada pelos pontos nos vértices dos elementos (em amarelo), determinando qual elemento de volume deve ser efetivamente refinado para se aproximar o máximo possível do ponto (pode se observar que em muitos casos, a região interpolada tem mais que um elemento). A segunda etapa pode se distinguir pelo ponto em vermelho (o resultado da interpolação), que no caso é uma trajetória real (conjunto de vários pontos) fazendo uma reta. ²NOTA

² NOTA - Para gerar um ponto em vermelho são necessários quatro pontos amarelos (por plano), que são os vértices do cubo imaginário.

5.2.3 - Simulando um deslocamento senoidal-retilíneo

Deslocamento senoidal-retilíneo é definido como sendo um movimento senoidal em um plano apenas, nos outros dois, este mesmo movimento é retilíneo.

Para explicar esta trajetória basta fazer:

$$\begin{cases} y = cte + \sin(x) \\ z = cte \end{cases} \quad (5.3)$$

Inserindo estas condições dentro da equação de resposta dos sensores (5.1) com um ganho de 100 obtem-se :

$$\Rightarrow \frac{100}{r} = \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \Leftrightarrow \frac{100}{\sqrt{x^2 + (cte + \sin(x))^2 + cte^2}} \quad (5.4)$$

O resultado pode ser visto na fig 5.4:

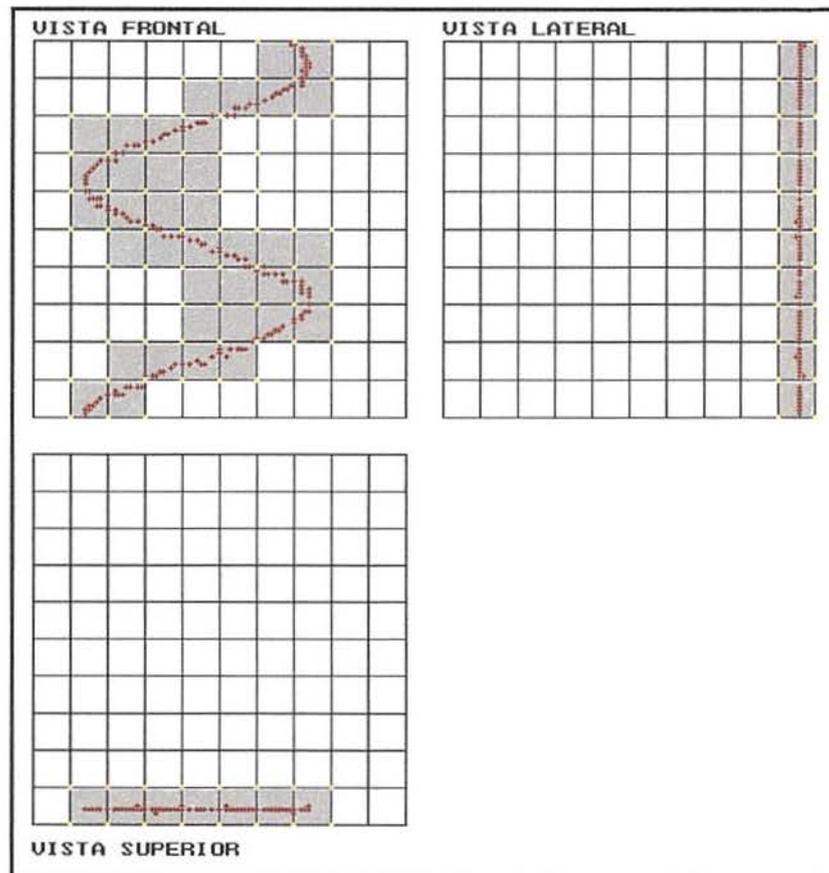


Fig 5.4-Resposta do sistema para uma trajetória senoidal-retilínea.

Para um deslocamento senoidal em dois planos (deslocamento senoidal na direção diagonal) pode-se fazer:

$$\begin{cases} y = x \\ z = \sin(x) \end{cases} \quad (5.5)$$

e inserindo na equação de resposta dos sensores

$$\frac{100}{r} = \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{100}{\sqrt{2x^2 + \sin(x)^2}} \quad (5.6)$$

O resultado está na fig 5.5:

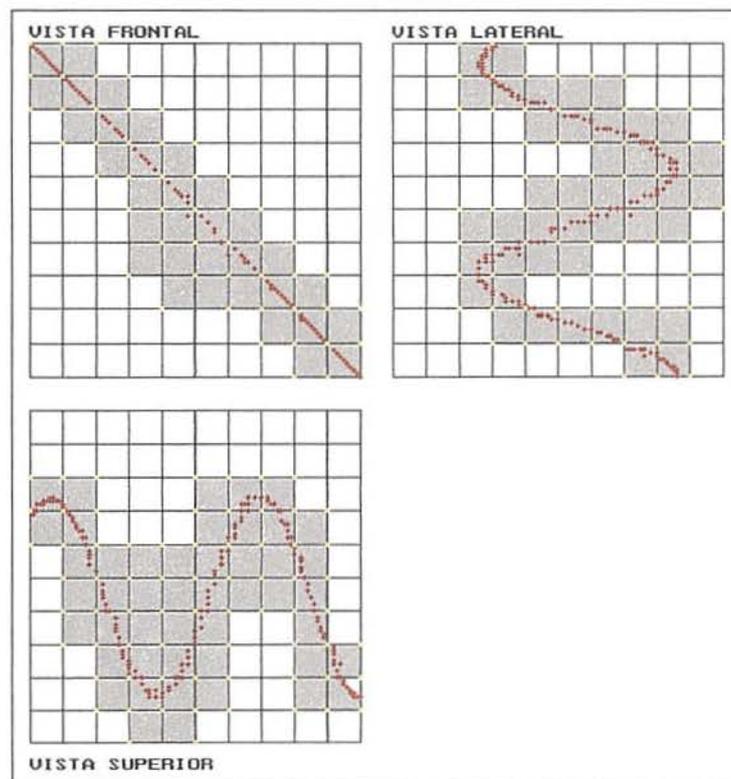


Fig 5.5 - Simulação de uma trajetória senoidal-retilínea $y=x$ $z=\sin(x)$.

Fazendo agora uma variação do tipo:

$$\begin{cases} z = ct \\ y = ct + a \cdot \cos(\omega) \\ x = ct + a \cdot \sin(\omega) \end{cases} \quad (5.7)$$

e substituído em:

$$\frac{100}{r} = \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{100}{\sqrt{cte^2 + (cte + a \sin(w))^2 + (cte + a \cos(w))^2}} \quad (5.8)$$

Tem-se uma trajetória espiral, no plano xy (fig. 5.6).

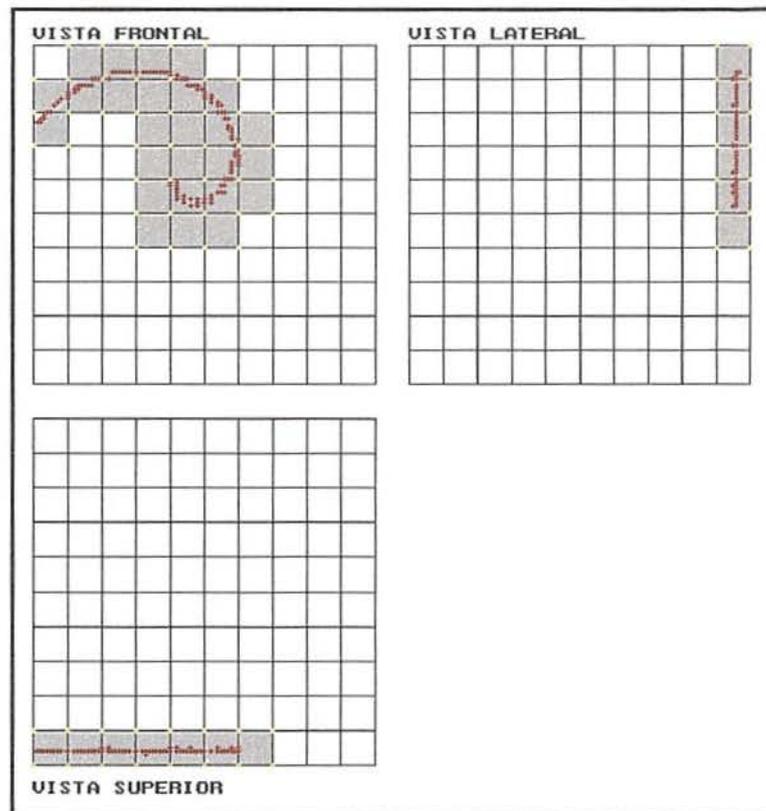


Fig 5.6 - Simulação de uma trajetória espiral em x e y e reta em z.

Fazendo agora

$$\begin{cases} z = cte + a \cdot \cos(w) \\ y = cte + a \cdot \sin(w) \\ x = cte + w \end{cases} \quad (5.9)$$

e substituindo em:

$$\frac{100}{r} = \frac{100}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{100}{\sqrt{(cte + a \cos(w))^2 + (cte + a \sin(w))^2 + (cte + w)^2}} \quad (5.10)$$

colocando estes valores no sistema obtem-se a fig 5.6.

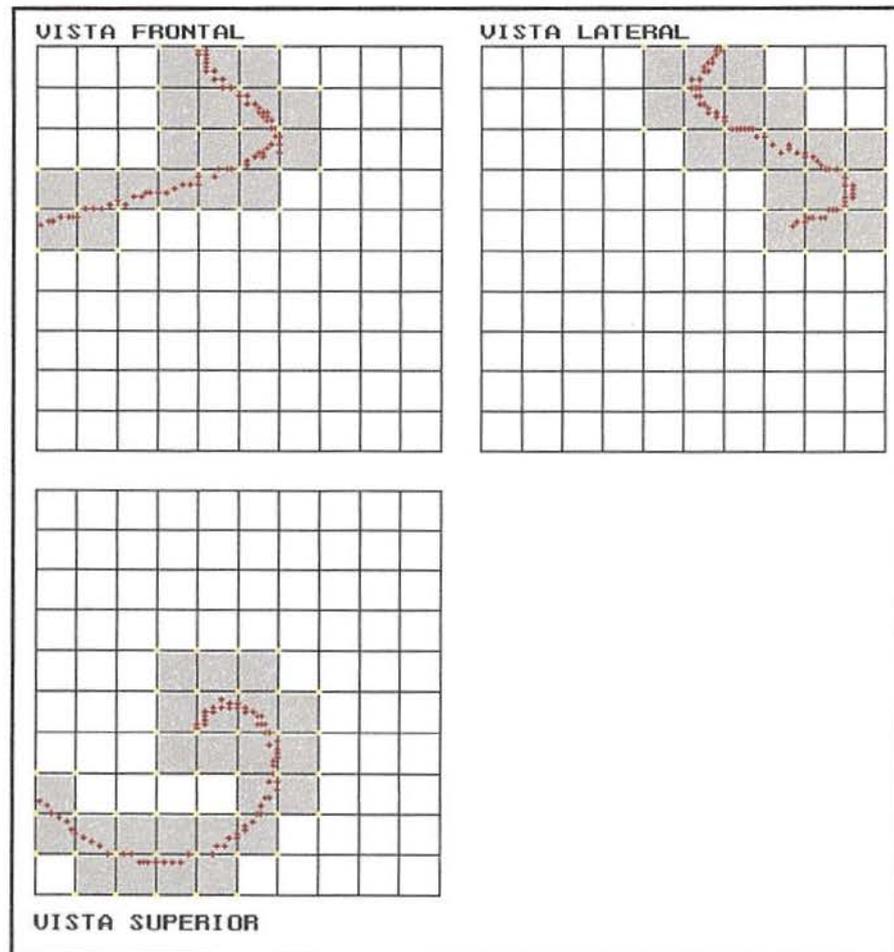


Fig 5.7 - Trajetória espiral em y e z ($y=a \sin(x)$ $z=a \cos(x)$), variação em z de a.n ($n=0,1,1..$) e $a=cte$.

5.2.4 - Simulando ruídos nos sensores

Neste item serão refeitos os ensaios anteriores, introduzindo ruídos de *offset* e indução de 60 Hz que podem vir a surgir no sistema real :

Primeiramente serão introduzidos ruídos de *offset* de 1% do fundo de escala :

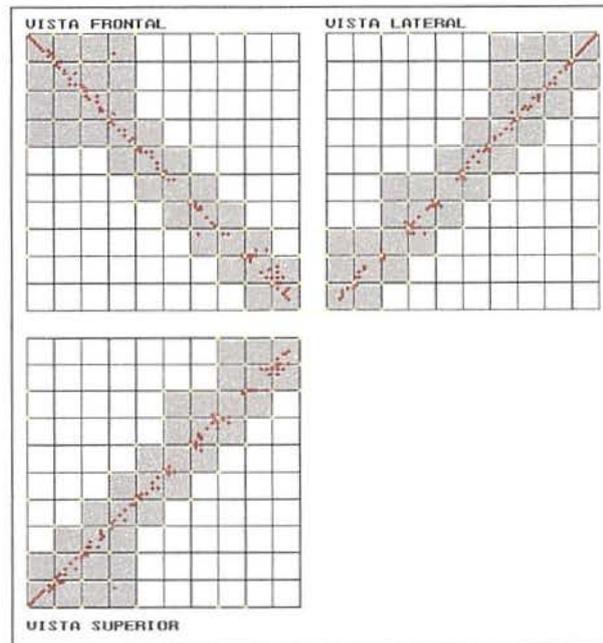


Fig 5.8 - Resposta do sistema para um deslocamento em diagonal com um erro de *offset* de 1% em todos os sensores (o erro é para menos).

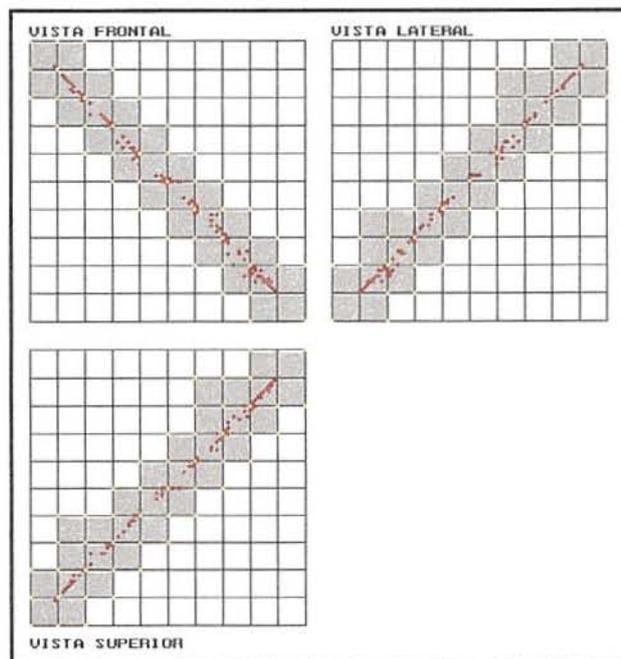


Fig 5.9 - Resposta do sistema para um deslocamento em diagonal com um erro de *offset* de 1% em todos os sensores (o erro é para mais).

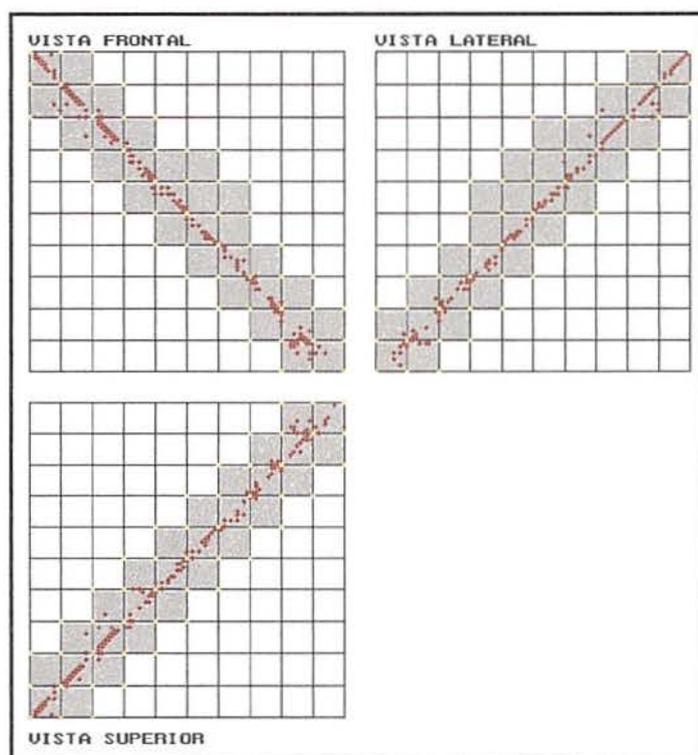


Fig 5.10 - Resposta do sistema para erros aleatórios (de 0 a 1%) em 4 sensores.

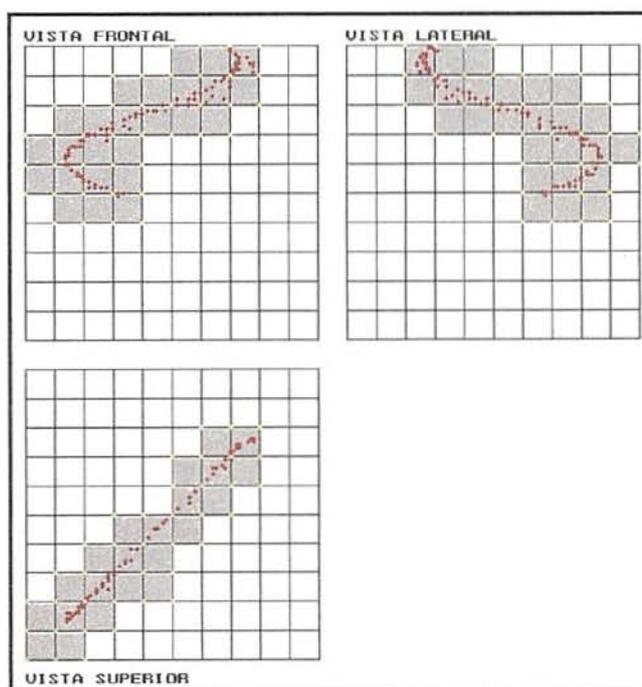


Fig 5.11 - Resposta do sistema para uma trajetória senoidal com erros aleatórios (de 0 a 1%) em 4 sensores.

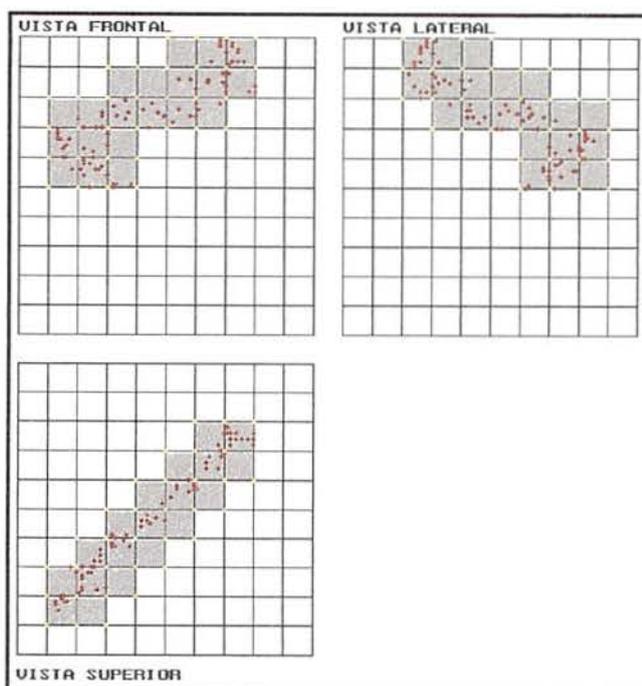


Fig. 5.12 - Resposta do sistema para um erro de 1% em 4 sensores.

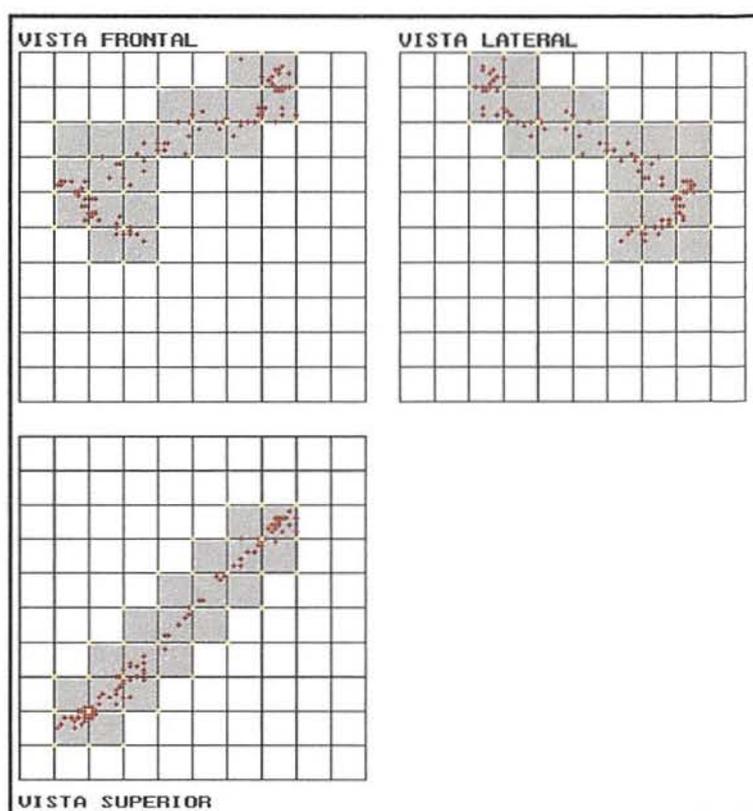


Fig. 5.13 - Resposta do sistema para um erro aleatório (0 a 1%) em todos os sensores.

Da mesma maneira que no capítulo 4 (ítem 4.2.5), aqui também tentou-se substituir os sensores; fazendo com que a resposta ficasse mais suave. O resultado pode ser visto a seguir:

A expressão utilizada como resposta dos sensores é:

$$V_0 = -123.735 + 20.09672x - .277378x^2 \quad (5.9)$$

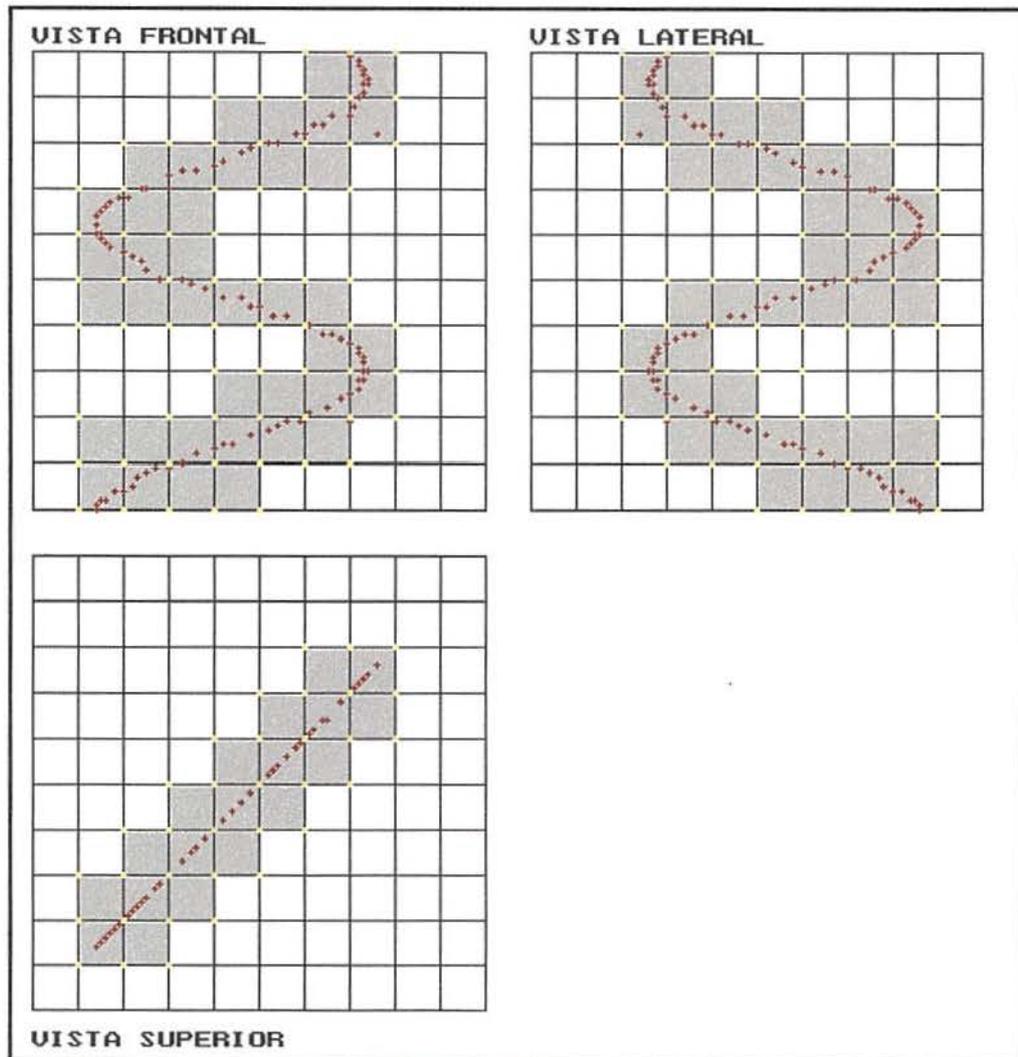


Fig. 5.14 - Sistema implementado com um sensor com 5% de *offset* (em relação ao fundo de escala).

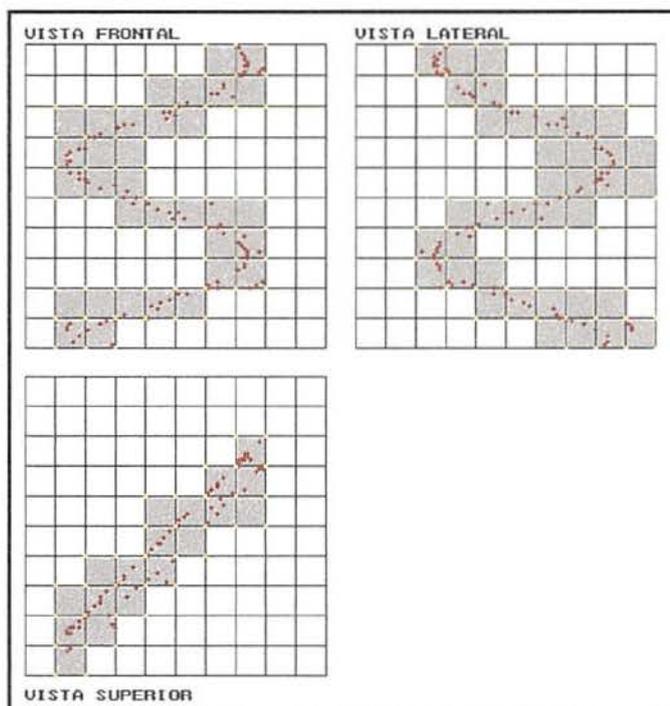


Fig. 5.15 - Sistema implementado com dois sensores com 5% de *offset* (em relação ao fundo de escala).

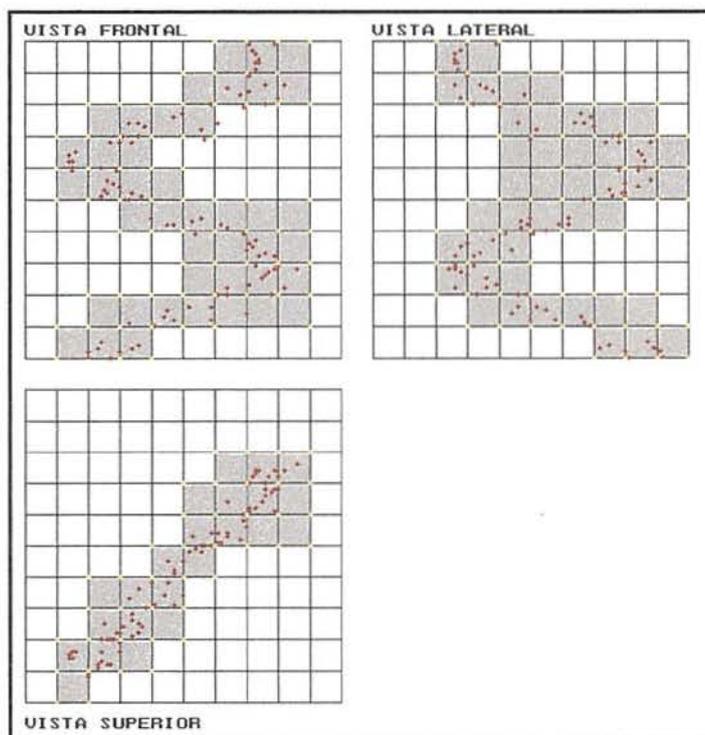


Fig. 5.16 - Sistema implementado com três sensores com 5% de *offset* (em relação ao fundo de escala).

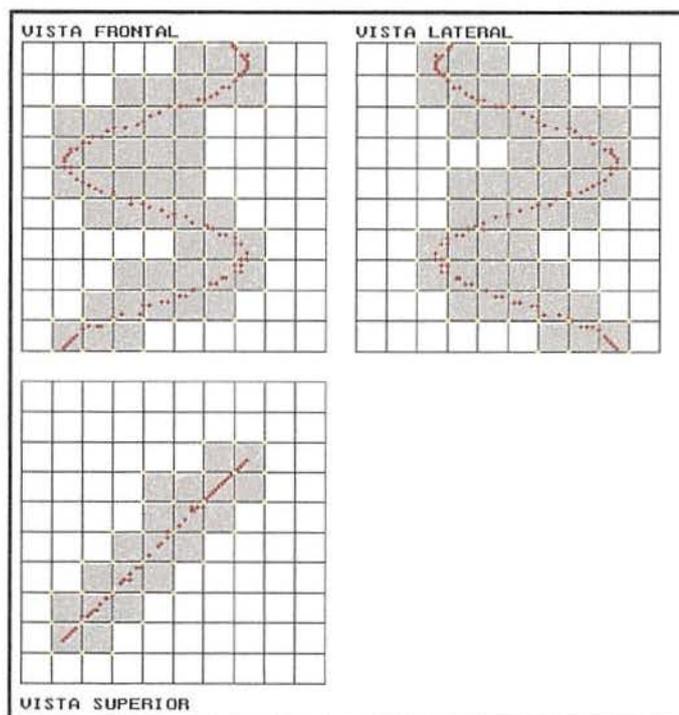


Fig. 5-19 -Resposta do sistema para um ruído de 60 Hz em todos os sensores e amplitude de 1% do fundo de escala.

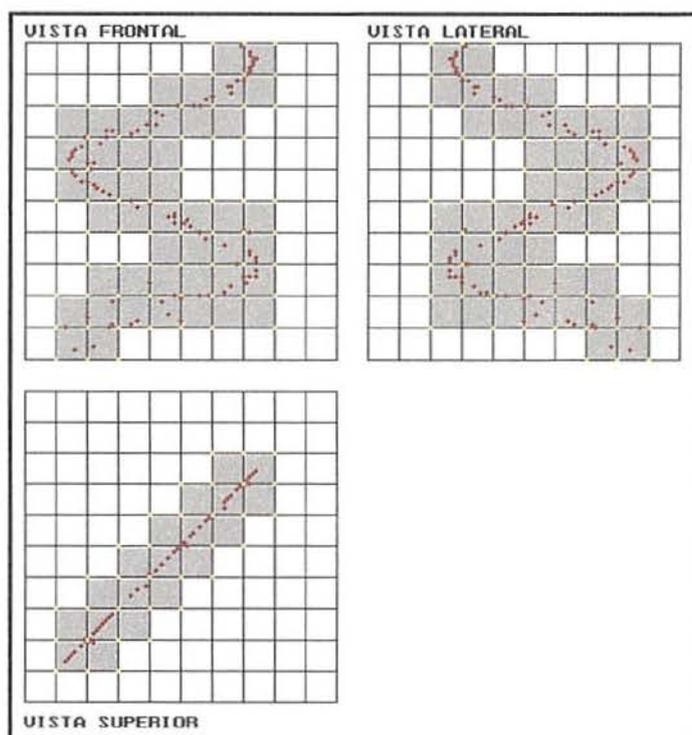


Fig 5.20 - Resposta do sistema para um ruído de 60 Hz e amplitude de 5% do Fundo de escala em três sensores.

Depois dessa análise, conclui-se que é perfeitamente possível implementar o sistema proposto, porém este mostrou-se bastante sensível a quaisquer distúrbios. Pode-se verificar que a intensidade destes distúrbios tem um limite, que quando ultrapassado, o sistema diverge. Dessa maneira devem ser tomadas todas as precauções neste sentido, tanto nos sensores que devem produzir uma resposta repetitiva e confiável, como no condicionamento, que deve reproduzir com fidelidade o sinal dos sensores.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS PRÁTICOS

6.1 - Introdução

Neste capítulo serão mostrados os experimentos relativos às simulações dos capítulos 4 e 5, além de ensaios para determinar a resposta do sensor e do condicionador do mesmo. No caso, foram utilizados sensores do tipo magnetoresistivo; como será visto a seguir para o sistema no plano foram utilizados 4 e no espaço 8.

6.2 - Resposta do Sensor

Para este teste, foram utilizados quatro sensores diferentes e cada um deles foi ensaiado 6 vezes. O curso utilizado foi de 22 mm (medido com um parafuso micrométrico), a saída em tensão pode ser vista na tabela 6.1.

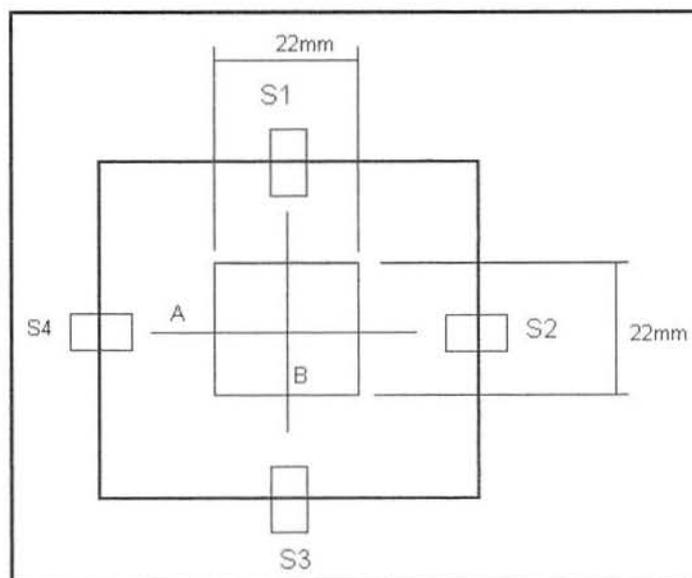


Fig 6.1.- Esquema do sistema utilizado nos ensaios referentes aos sensores (S1,S2,S3 e S4). A e B são as direções de deslocamento do magneto.

É importante ressaltar outros dois componentes do ensaio, primeiro a mesa micrométrica, que tem uma resolução de 0.01 mm na direção do deslocamento, porém erros podem ser inseridos devido a folgas laterais que passam deste valor; e o segundo é o superímã que será o mesmo utilizado nas medidas posteriores. O dispositivo utilizado neste ensaio foi o mesmo utilizado para as medidas no plano e pode ser visto na fig. 6.19 e um esquema das medidas para o sensor pode ser observado na fig. 6.1.

O circuito eletrônico utilizado está descrito em 6.3.3.

MM	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	MÉDIA	DESV P
1	171.160	172.480	172.930	175.050	175.280	175.960	173.810	.596
2	134.970	136.230	136.510	138.530	138.740	139.650	137.438	.540
3	101.690	102.980	103.080	105.290	105.510	106.150	104.117	.524
4	70.970	72.580	73.040	74.640	74.690	75.260	73.530	.442
5	43.170	44.900	44.960	46.510	46.770	47.420	45.622	.410
6	17.970	19.770	19.870	21.180	21.540	21.640	20.328	.333
7	-4.860	-3.160	-3.250	-2.240	-1.650	-1.270	-2.738	.284
8	-26.070	-24.470	-24.220	-23.270	-22.650	-22.710	-23.898	.284
9	-45.470	-43.860	-43.720	-42.670	-42.050	-42.290	-43.343	.272
10	-62.920	-61.360	-61.440	-60.670	-59.780	-59.990	-61.027	.221
11	-79.360	-77.650	-77.610	-76.760	-75.810	-76.200	-77.232	.272
12	-93.960	-92.510	-92.400	-91.760	-90.780	-91.440	-92.142	.200
13	-107.540	-106.350	-106.320	-105.470	-104.280	-104.600	-105.760	.248
14	-119.760	-118.700	-118.620	-117.980	-116.830	-117.070	-118.160	.202
15	-131.350	-130.230	-130.030	-129.330	-128.320	-128.330	-129.598	.232
16	-141.960	-140.860	-140.650	-139.970	-139.040	-138.760	-140.207	.240
17	-151.710	-150.680	-150.440	-149.920	-148.690	-148.670	-150.018	.236
18	-160.790	-159.830	-159.590	-159.120	-157.960	-157.740	-159.172	.225
19	-168.940	-168.230	-167.840	-167.620	-166.330	-166.050	-167.502	.207
20	-176.670	-175.820	-175.500	-175.060	-174.300	-173.990	-175.223	.164
21	-183.230	-182.790	-182.150	-182.170	-181.190	-180.810	-182.057	.141
22	-189.500	-188.980	-188.400	-188.350	-187.340	-187.100	-188.278	.142

Tab. 6.1 - Valores em mV de um ensaio de deslocamento de um ímã em relação ao sensor 1.

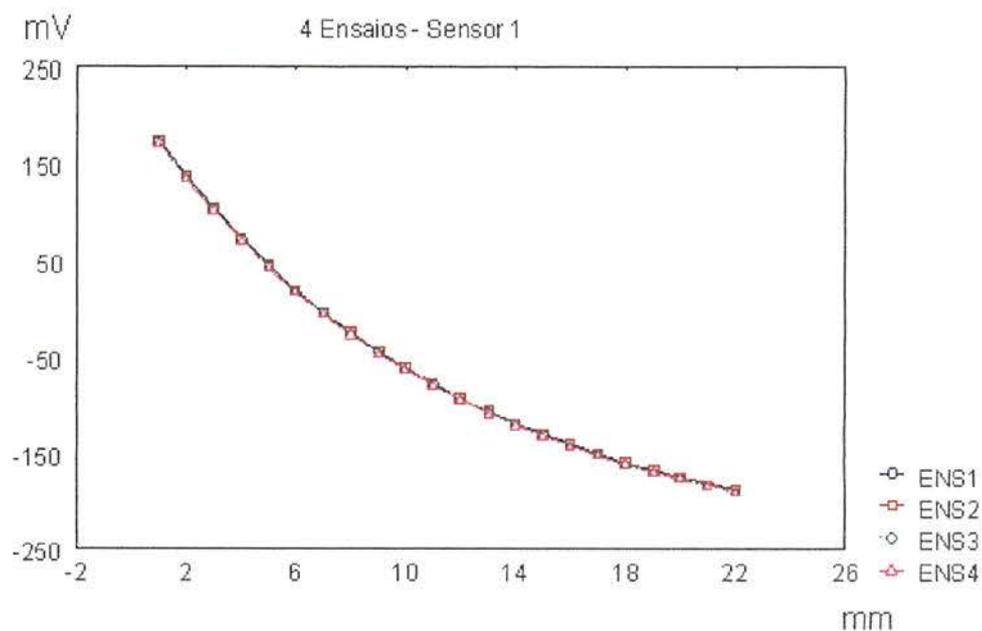


Fig 6.2 - Característica da tensão de saída do sensor 1.

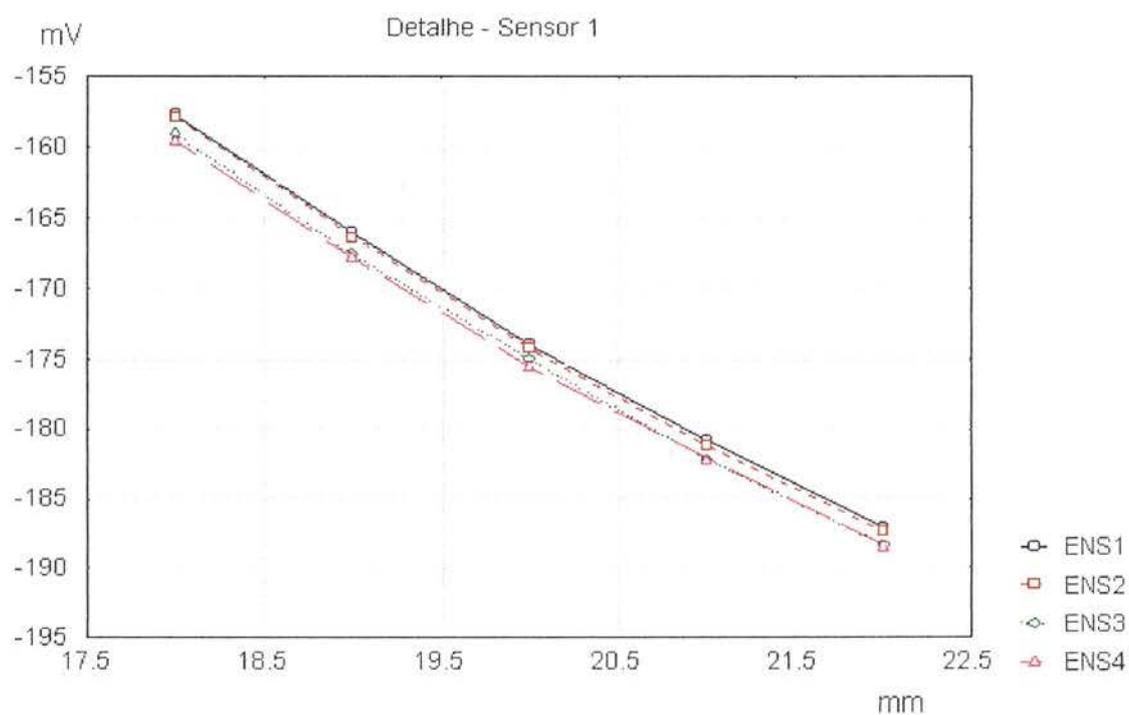


Fig 6.3 - Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 1.

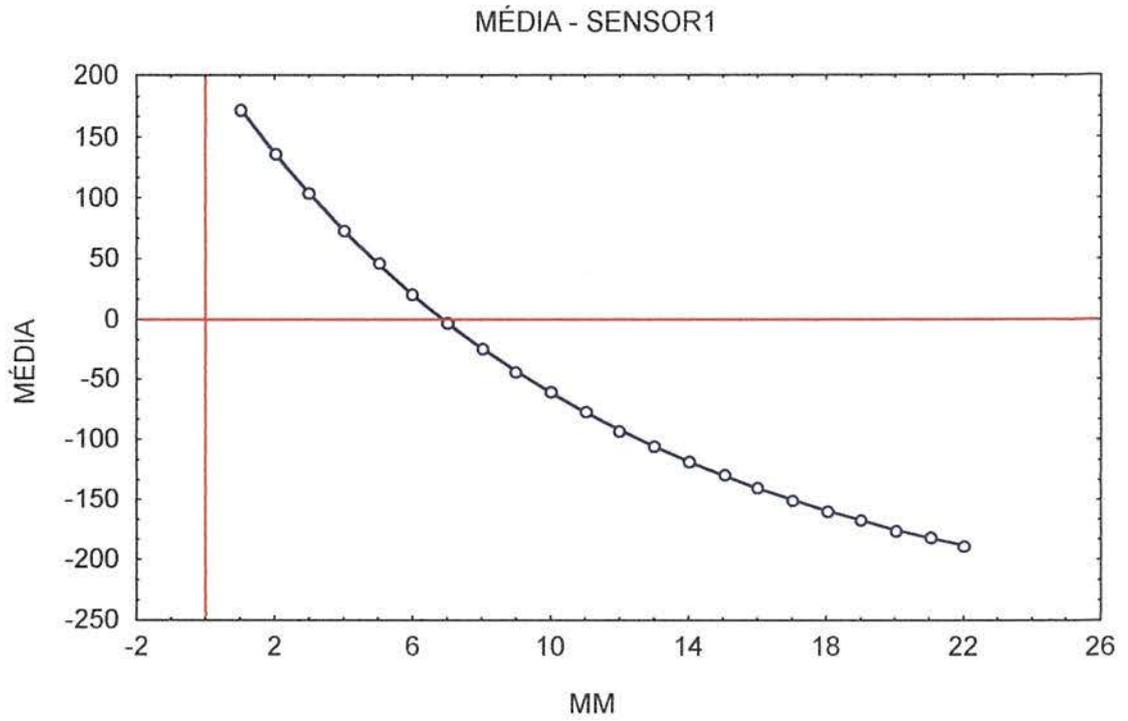


Fig. 6.4 - Característica da média dos ensaios com o sensor1.

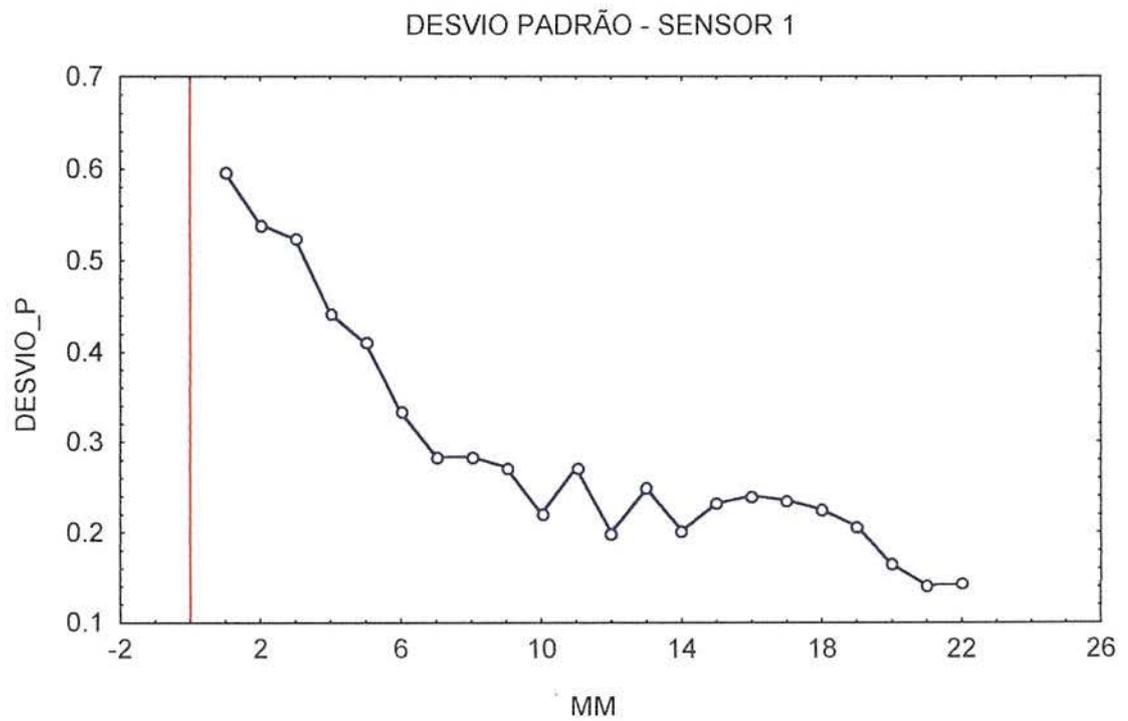


Fig. 6.5 - Desvio padrão da amostra para o sensor1

MM	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	MÉDIA	DESV P
1	-370.480	-369.150	-368.970	-369.150	-367.030	-370.810	-369.265	.299
2	-362.440	-360.960	-361.170	-360.990	-358.910	-362.260	-361.122	.266
3	-353.640	-352.130	-352.670	-352.170	-350.000	-353.430	-352.340	.285
4	-344.150	-342.930	-342.880	-342.870	-340.740	-344.380	-342.992	.279
5	-334.220	-332.670	-332.820	-332.590	-330.850	-333.880	-332.838	.235
6	-323.740	-321.160	-321.870	-321.510	-319.480	-323.190	-321.825	.386
7	-312.420	-310.170	-310.410	-310.080	-308.380	-311.640	-310.517	.326
8	-300.610	-298.600	-297.910	-298.240	-295.640	-299.770	-298.462	.489
9	-287.910	-286.110	-285.600	-285.420	-283.200	-286.860	-285.850	.420
10	-274.000	-271.690	-272.100	-271.580	-269.400	-272.910	-271.947	.395
11	-259.010	-257.520	-257.100	-256.250	-254.360	-257.680	-256.987	.410
12	-243.020	-241.180	-241.170	-240.240	-238.340	-241.040	-240.832	.388
13	-226.340	-224.660	-223.800	-223.050	-221.250	-223.680	-223.797	.476
14	-207.710	-205.680	-205.450	-204.820	-202.190	-205.380	-205.205	.528
15	-188.120	-185.850	-185.500	-185.120	-182.470	-185.010	-185.345	.547
16	-166.820	-165.060	-164.360	-163.950	-161.440	-163.320	-164.158	.536
17	-144.160	-142.600	-141.690	-140.920	-138.980	-140.210	-141.427	.555
18	-119.580	-117.800	-116.760	-116.720	-114.490	-114.990	-116.723	.577
19	-92.970	-91.720	-90.140	-90.620	-88.320	-88.120	-90.315	.598
20	-64.300	-62.960	-61.510	-61.150	-60.190	-59.170	-61.547	.574
21	-33.860	-32.690	-30.500	-30.650	-28.850	-28.000	-30.758	.823
22	-0.380	0.250	2.970	2.970	4.880	5.310	2.667	.906

Tab 6.2 - Valores em mV de um ensaio de deslocamento de um ímã em relação ao sensor 4.

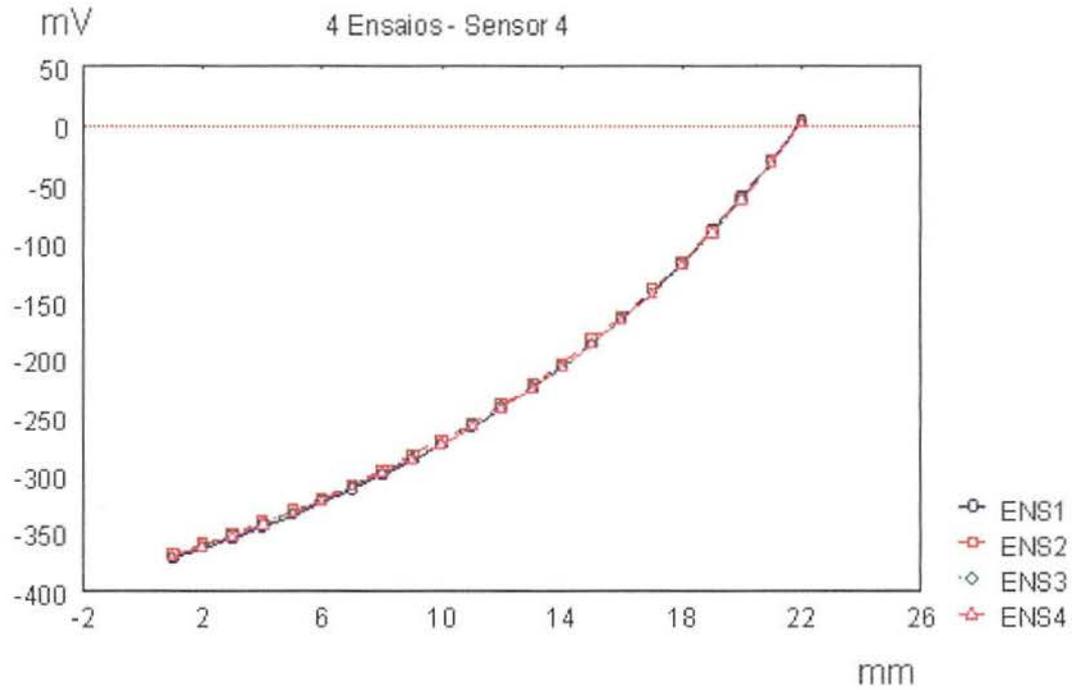


Fig. 6.6 - Característica da tensão de saída do sensor 4.

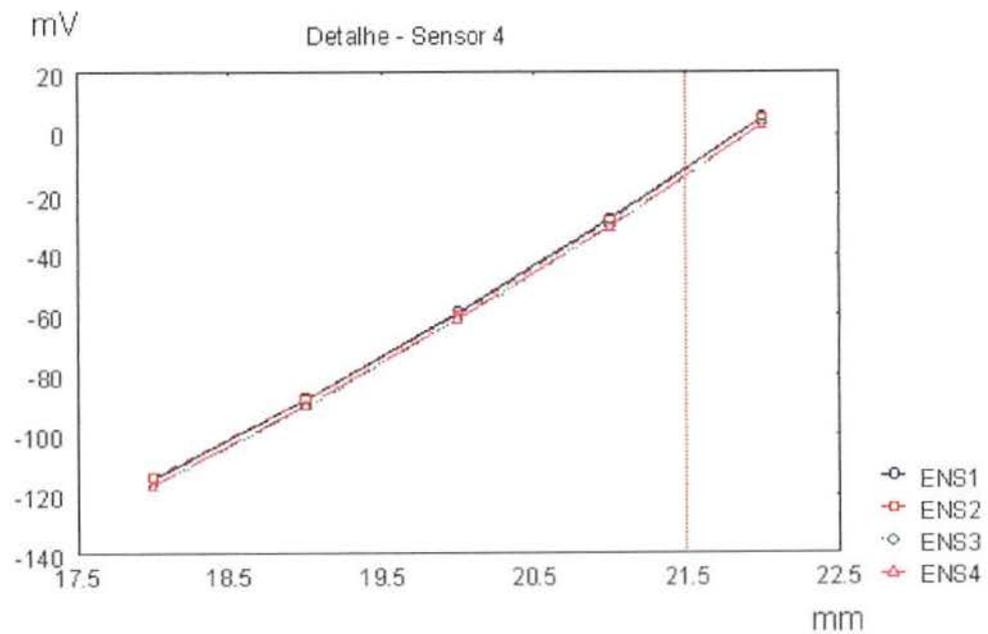


Fig 6.7 - Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 4.

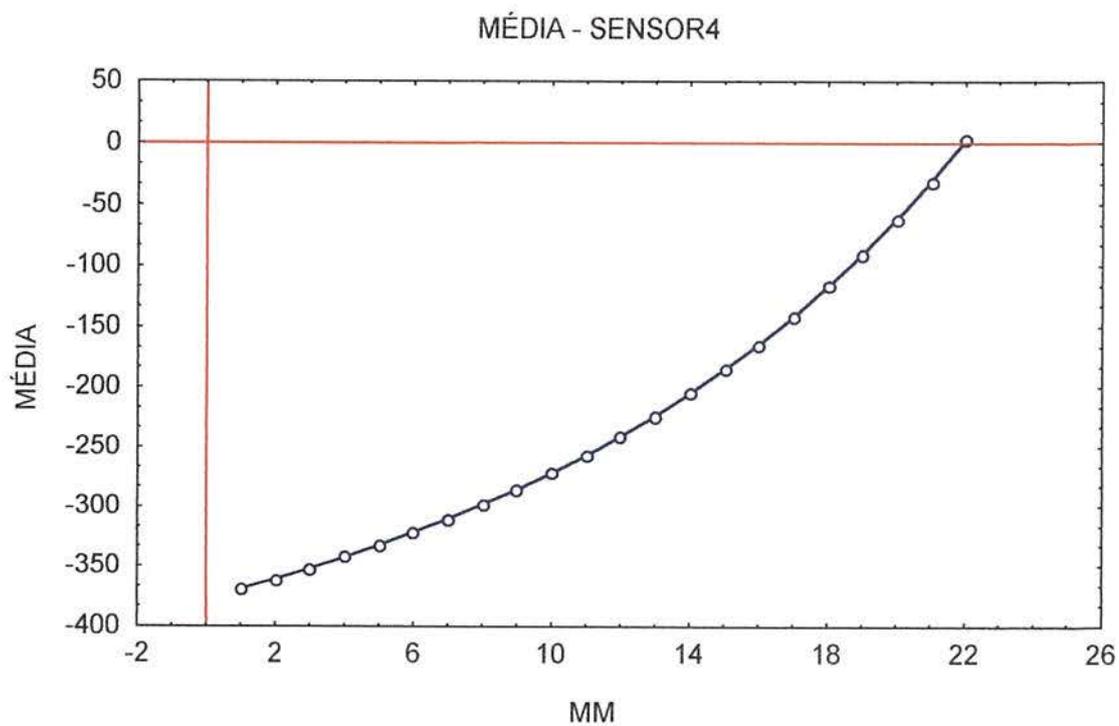


Fig. 6.8 - Característica da média dos ensaios com o sensor4.

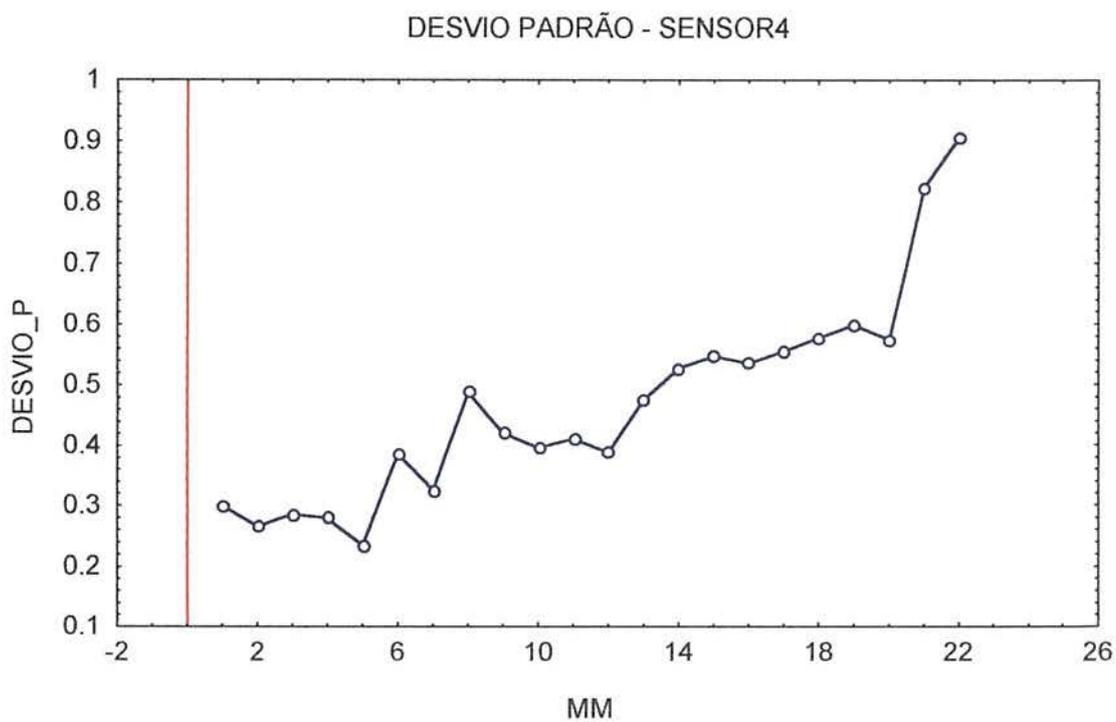


Fig. 6.9 - Desvio padrão da amostra para o sensor4.

MM	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	MÉDIA	DESV P
1	84.680	82.020	81.590	81.610	83.150	84.350	82.900	.316
2	55.510	53.680	53.480	53.490	54.080	55.770	54.335	.179
3	27.930	26.540	24.180	26.230	27.320	28.040	26.707	.343
4	3.230	1.600	-0.260	0.910	1.480	2.190	1.525	.231
5	-20.990	-22.350	-23.11	-23.240	-22.740	-22.220	-22.442	.111
6	-43.330	-45.220	-46.200	-45.790	-44.650	-43.450	-44.773	.237
7	-64.790	-67.100	-67.360	-68.160	-66.440	-65.440	-66.548	.263
8	-85.610	-88.100	-87.440	-87.520	-86.670	-85.420	-86.793	.199
9	-104.690	-106.820	-106.340	-106.600	-105.370	-105.440	-105.877	.116
10	-122.730	-124.320	-124.770	-124.280	-123.720	-122.920	-123.790	.112
11	-139.540	-141.620	-141.720	-141.180	-140.540	-139.510	-140.685	.163
12	-155.840	-157.640	-157.730	-157.200	-156.490	-155.400	-156.717	.156
13	-170.490	-172.530	-172.760	-171.850	-171.330	-169.860	-171.470	.217
14	-183.930	-186.490	-187.310	-185.880	-185.080	-184.170	-185.477	.294
15	-196.450	-199.110	-199.240	-198.050	-197.310	-196.740	-197.817	.235
16	-208.400	-210.920	-210.390	-209.750	-208.360	-208.490	-209.385	.211
17	-220.220	-222.040	-221.150	-220.410	-219.760	-219.000	-220.430	.188
18	-229.390	-231.870	-231.070	-230.280	-229.260	-229.490	-230.227	.186
19	-238.820	-240.900	-240.440	-239.350	-238.920	-238.660	-239.515	.146
20	-247.470	-249.590	-249.540	-247.750	-247.350	-247.450	-248.192	.192
21	-255.640	-257.920	-257.510	-256.000	-255.590	-255.130	-256.298	.216
22	-263.650	-265.740	-265.750	-264.020	-263.450	-263.360	-264.328	.209

Tab. 6.3 - Valores em mV de um ensaio de deslocamento de um ímã em relação ao sensor 2.

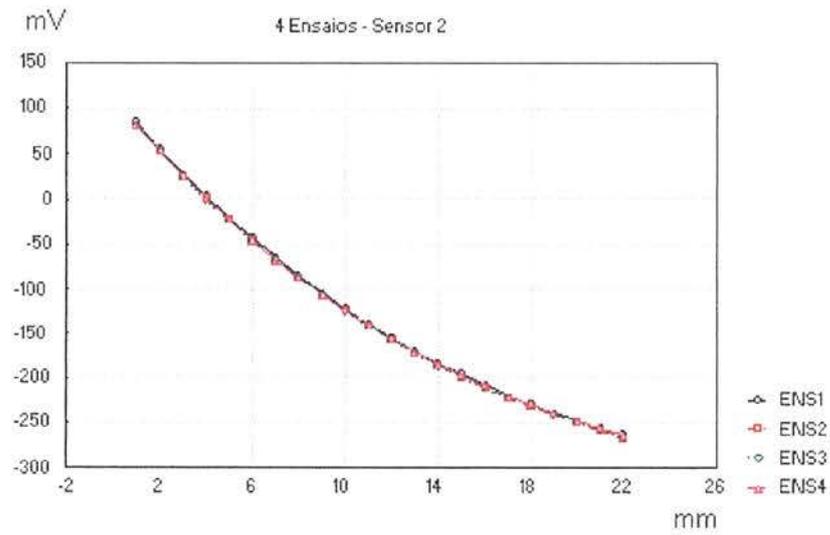


Fig. 6.10 - Característica da tensão de saída do sensor 2.

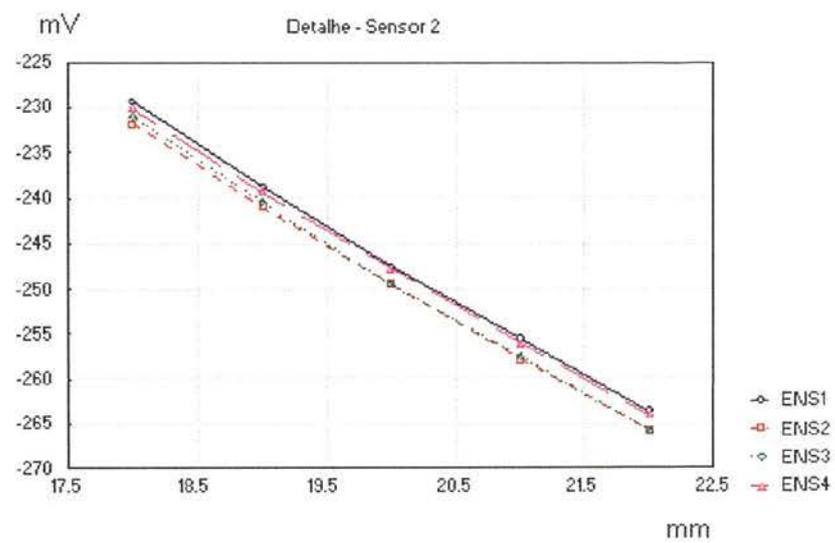


Fig 6.11 - Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 2.

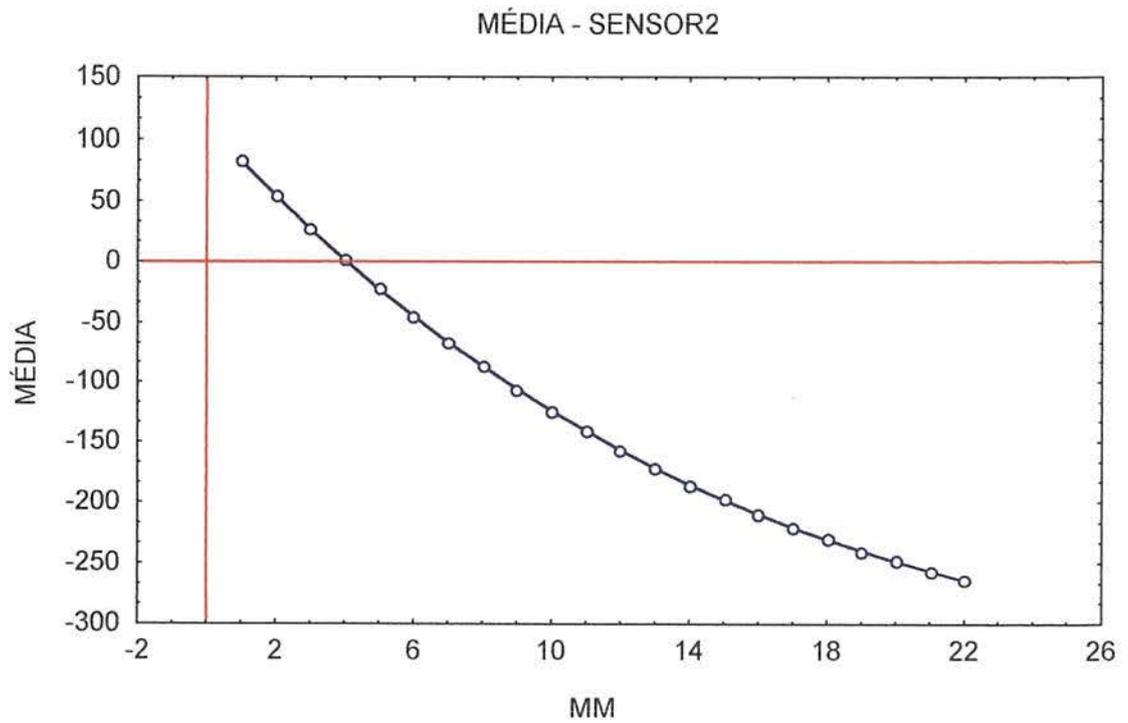


Fig. 6.12 - Característica da média dos ensaios com o sensor2.

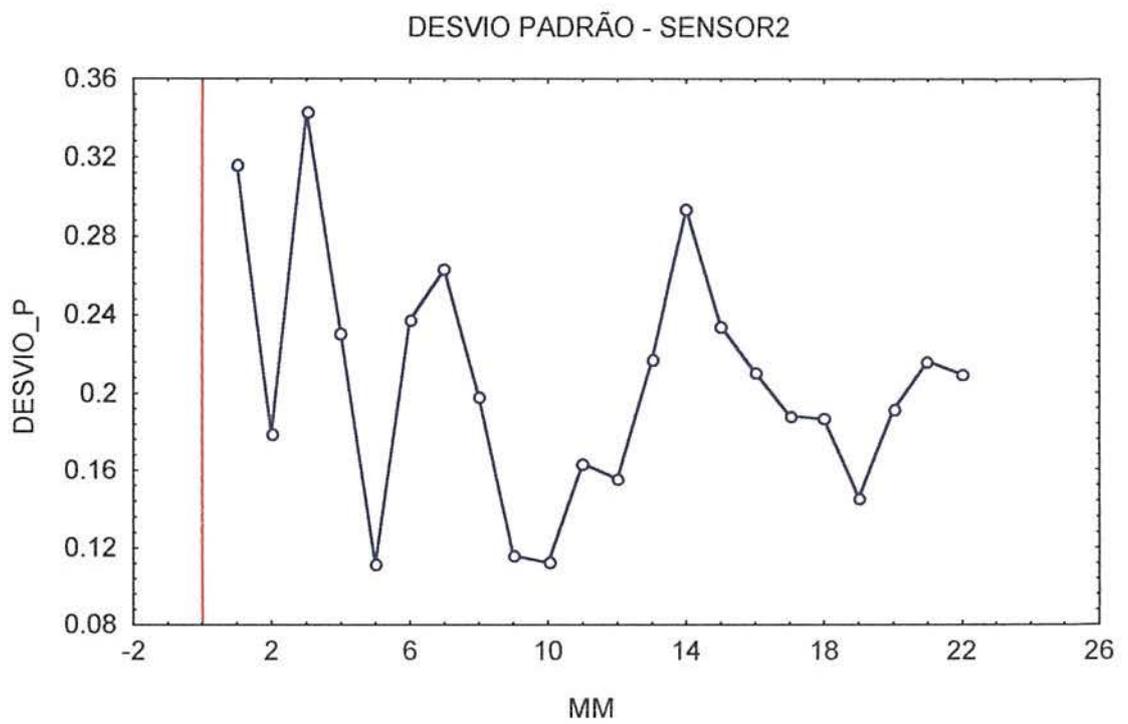


Fig. 6.13 - Desvio padrão da amostra para o sensor2.

MM	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	ENSAIO	MÉDIA	DESV P
1	192.530	190.220	190.560	191.860	193.380	194.420	192.162	.438
2	182.430	181.200	180.770	181.880	183.380	184.420	182.347	.313
3	171.660	170.800	169.940	171.330	173.020	173.900	171.775	.353
4	160.560	159.840	158.890	160.030	161.630	162.060	160.502	.232
5	148.500	148.010	147.510	147.630	149.380	150.010	148.507	.168
6	136.220	135.610	134.930	135.740	137.910	138.460	136.478	.325
7	123.690	122.620	122.260	122.530	124.950	125.140	123.532	.269
8	109.500	108.370	108.830	109.060	111.600	111.740	109.850	.354
9	95.610	94.810	94.770	95.420	97.730	97.250	95.932	.265
10	80.600	80.020	79.530	80.860	82.710	83.020	81.123	.340
11	65.020	64.090	63.300	64.830	66.720	67.060	65.170	.359
12	47.890	47.010	46.540	47.880	49.540	50.700	48.260	.413
13	29.790	28.700	28.330	29.880	31.360	32.900	30.160	.488
14	10.690	9.490	8.490	10.230	12.210	13.260	10.728	.513
15	-10.110	-11.250	-11.060	-9.530	-8.090	-7.020	-9.510	.467
16	-31.930	-32.810	-32.610	-31.200	-30.290	-29.280	-31.353	.316
17	-55.540	-56.010	-55.310	-54.110	-54.090	-51.760	-54.470	.395
18	-79.060	-80.520	-79.220	-78.270	-77.750	-76.110	-78.488	.375
19	-104.940	-105.910	-104.980	-103.680	-104.140	-101.560	-104.202	.377
20	-132.400	-132.930	-132.910	-131.400	-131.320	-129.270	-131.705	.320
21	-162.280	-162.580	-162.070	-160.240	-160.850	-158.140	-161.027	.469
22	-193.090	-193.640	-193.470	-191.180	-191.690	-189.330	-192.067	.464

Tab. 6.3 - Valores em mV de um ensaio de deslocamento de um ímã em relação ao sensor 3.

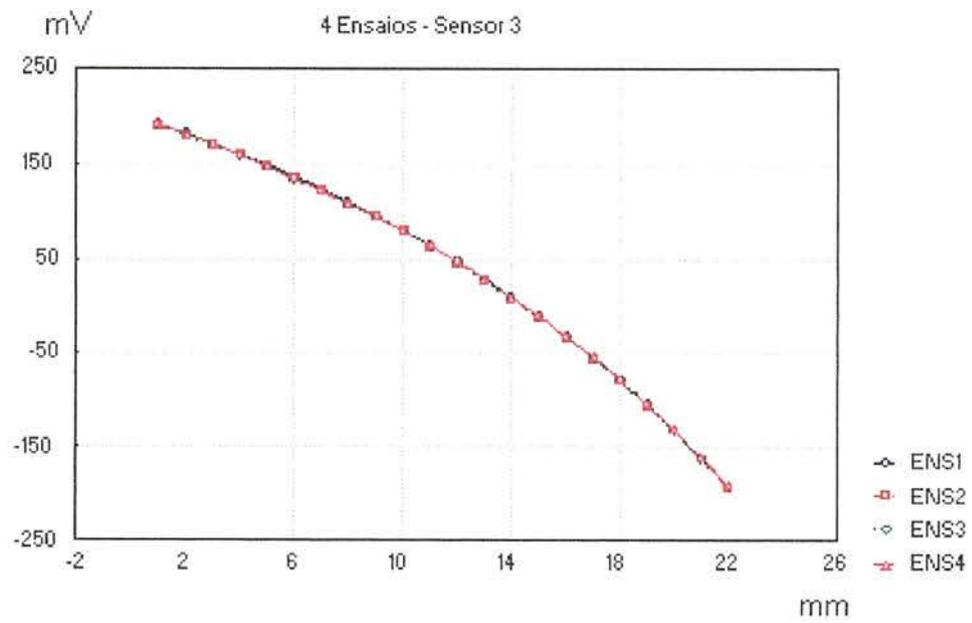


Fig. 6.14 - Característica da tensão de saída do sensor 3.

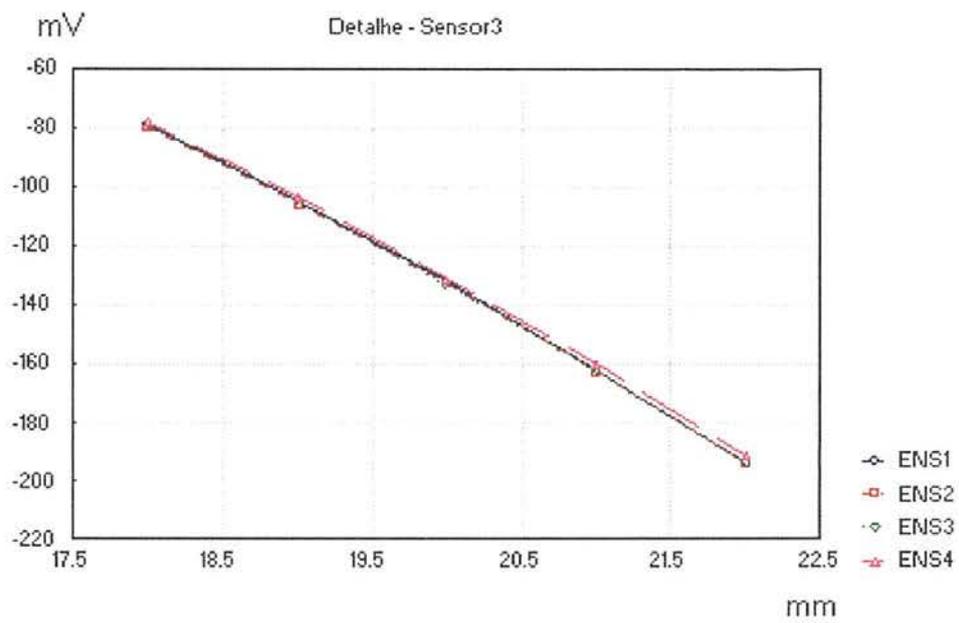


Fig 6.15 - Detalhe da tensão de saída (resposta) do sensor 3.

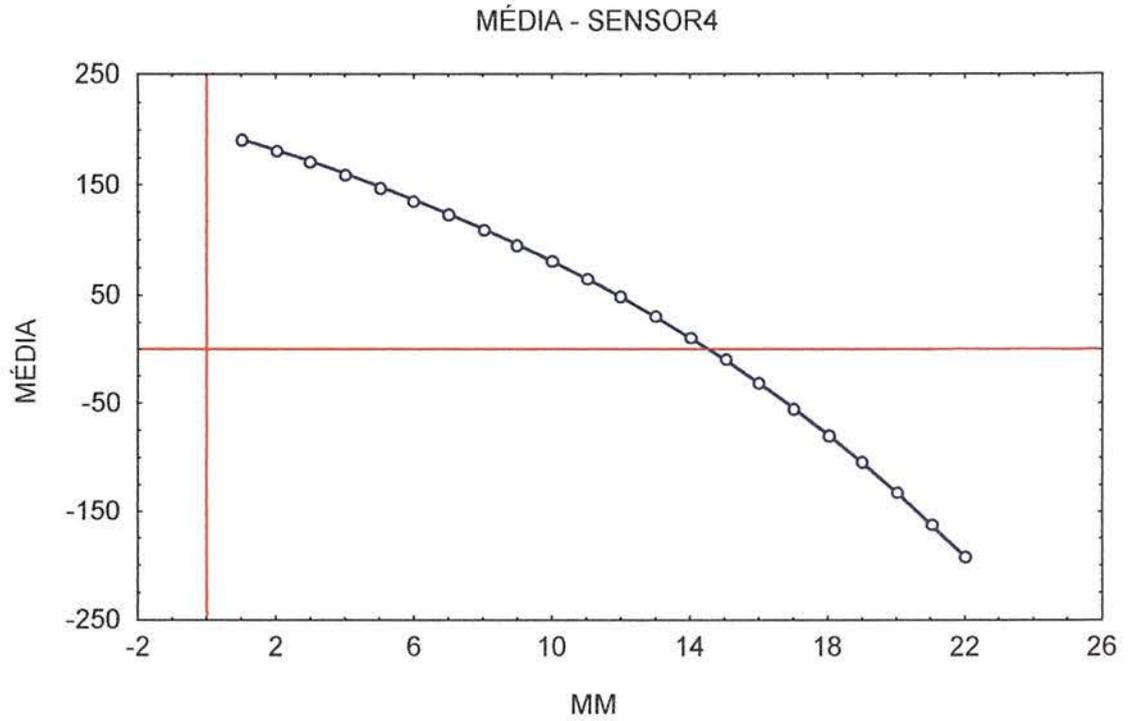


Fig 6.16 - Característica da média dos ensaios com o sensor3.

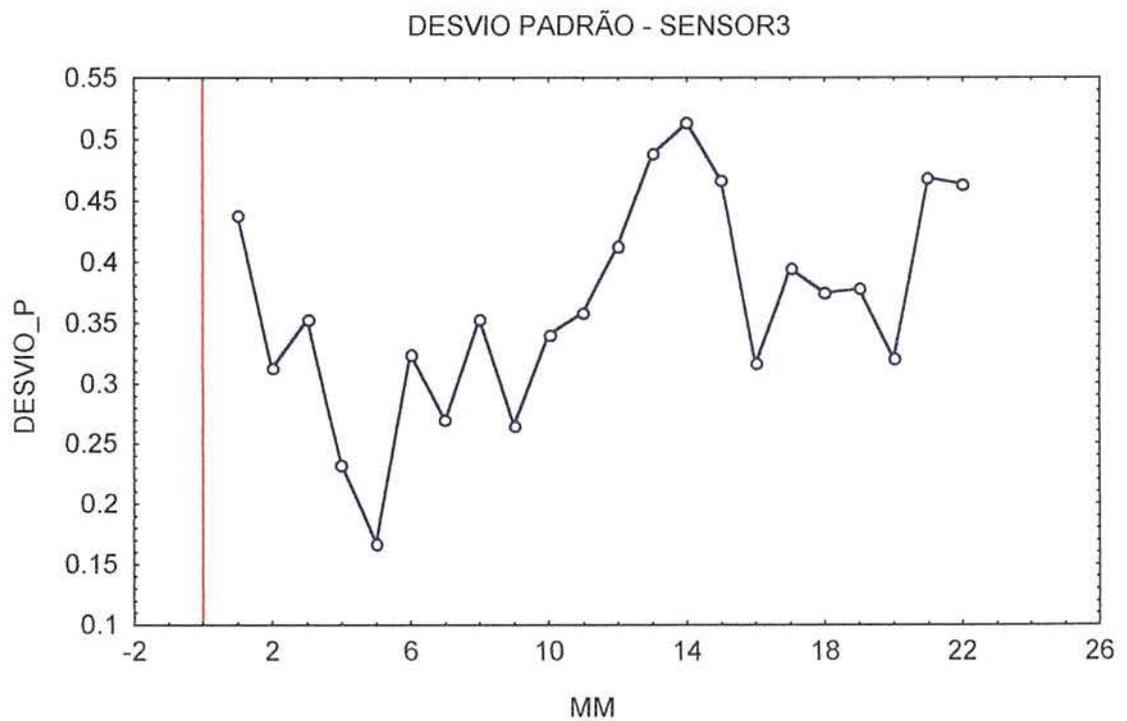


Fig. 6.17 - Desvio padrão da amostra para o sensor3.

6.3 - Sistema

O sistema físico é composto de quatro ou oito sensores (depende se a medida for no plano ou no espaço) do tipo magneto-resistivo (Phillips KMZ10B) cujo princípio e características foram apresentados no capítulo três; um superímã que tem a função de excitar estes sensores; um circuito de condicionamento do sinal de saída dos sensores; um conversor A/D com 12 bits de resolução (Novus - 10 Hz de freq de amostragem) e por fim um microcomputador pessoal PC 486 (fig 6.18).



Fig. 6.18 - Diagrama em blocos do sistema.

6.3.1) Funcionamento

A fig 6.18 esquematiza o sistema de uma forma bem simplificada . Assim, pode-se abordar cada um desses blocos mais detalhadamente :

6.3.2) Disposição dos sensores MR

O fator determinante da disposição dos sensores, bem como da superfície a ser monitorada são os dispositivos que estão disponíveis para a calibração do sistema. No caso do deslocamento do plano, dispõe-se de dois parafusos micrométricos, que apesar de oferecerem boa qualidade às as medições, restringem a área de trabalho útil a 22 x 22 mm, uma vez que este é o curso máximo que pode ser desenvolvido com este instrumento.

Cada um destes parafusos micrométricos é adaptado a um dispositivo que permite a variação de uma superfície num único sentido (fig 6.19). Estas duas superfícies são fixadas perpendicularmente uma em relação a outra, de modo a obter-se uma varredura muito confiável da superfície em questão (salvo as folgas laterais), com a resolução oferecida pelo parafuso micrométrico (0.01 mm). Sobre este dispositivo que tem a função de uma mesa de deslocamento 2D ainda é fixado um superímã, de modo que uma pequena variação em um dos parafusos da mesa seja percebida pelos quatro sensores que estão dispostos nos vértices de um quadrado imaginário formado pela máxima superfície varrida mais uma distância mínima necessária para não ocorrer uma flipagem¹ dos sensores, numa situação onde o superímã se encontra muito próximo a um dos sensores.

No caso da medida do deslocamento no espaço, a calibração é feita com este mesmo sistema, com mais um eixo de liberdade (perpendicular aos dois existentes). E na ponta deste terceiro eixo, se localiza então o magneto.

¹A flipagem é um fenômeno de saturação que ocorre no sensor MR, quando o campo externo se torna maior que o campo de pré magnetização ($H_y > H^y$).

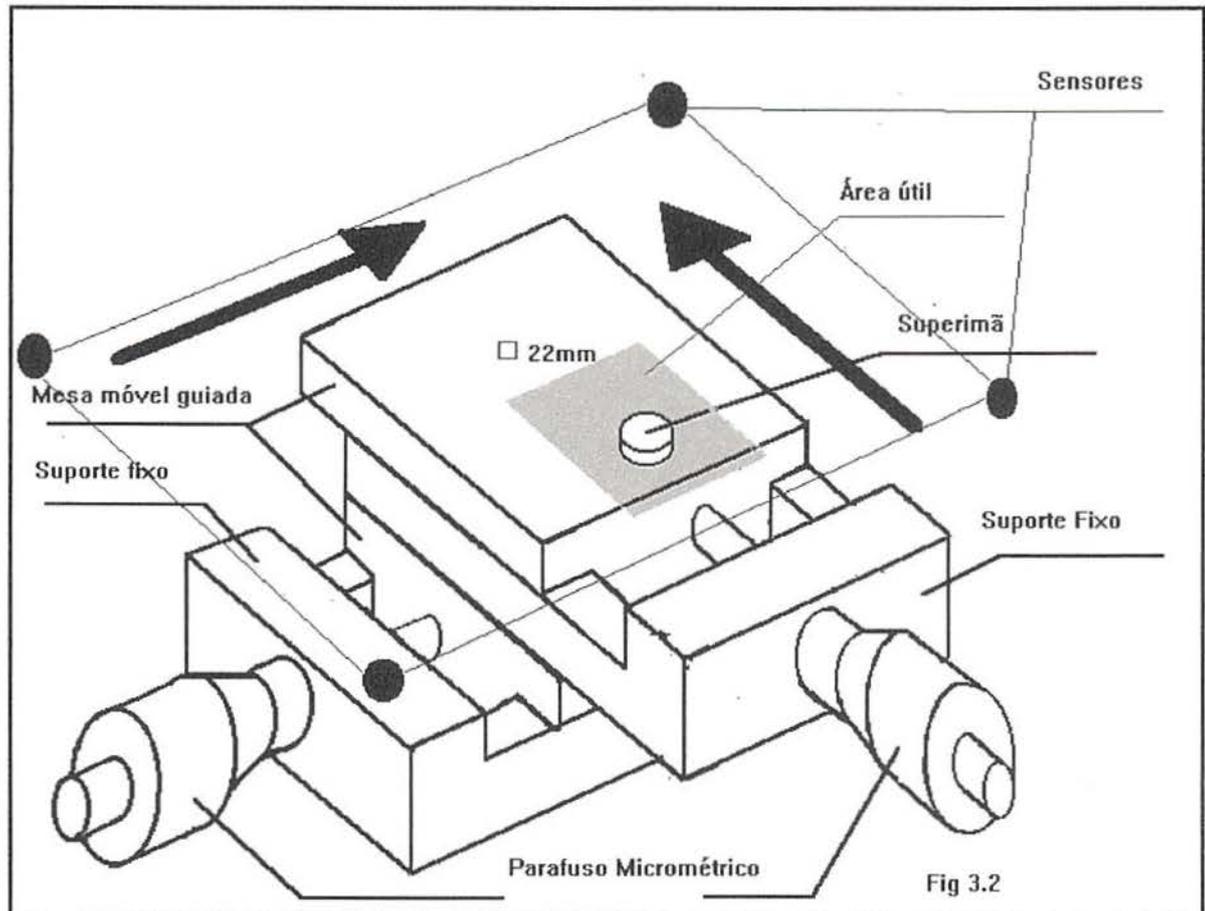


Fig. 6.19 - Arranjo utilizado para calibrar o sistema para medição de deslocamento no plano.

6.3.3) Circuito de condicionamento

Cabe lembrar que o sensor escolhido é um sensor magnetoresistivo, e este tipo de sensor apresenta uma ponte de *wheatstone* internamente, de modo que o circuito mais indicado nestes casos é um “Amplificador de Instrumentação²” para cada sensor. A alimentação dos sensores foi feita por tensão (poderia ter-se optado por corrente). No caso, utilizou-se uma fonte simétrica de +2,5 V e -2,5 V (implementada com um regulador de Tensão do tipo LM317 no caso positivo e Lm337 no caso negativo)

² Amplificadores de Instrumentação - Constituem-se de uma configuração de três Amplificadores Operacionais. Esta configuração possui como característica principal alta impedância de entrada (depende do Ampl. Oper. utilizado). Este arranjo permite também a mudança do ganho (que pode ser muito alto) através de um único resistor. Outra característica importante é que se os ganhos forem corretamente distribuídos nas duas etapas (nao inversora e diferencial) pode-se minimizar efeitos de CMRR (commum Mode Rejection Ratio - dando um ganho maior na primeira etapa - nao inversora, visto que esta tem CMRR igual a zero). Para maiores detalhes - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS - Pertence Jr.

O ponto mais crítico do circuito é a questão da estabilidade térmica. É necessário garantir um tempo mínimo válido para a mesma calibração. Outro ponto a ser observado é de que os ganhos dos quatro amplificadores (um para cada sensor) não são necessariamente iguais, uma vez que cada sensor tem sua própria resposta. Visto que a entrada do conversor A/D é de 400 mV tentou-se implementar da melhor forma possível o amplificador, de modo que observando a posição mais crítica do magneto em relação a cada um dos sensores (esta é a situação onde o magneto se encontra o mais próximo do sensor possível) fosse calculado um ganho tal que o sistema forneça 400mV na saída, e na situação oposta onde a distância entre o sensor e o magneto é máxima -400 mV.

Além dos amplificadores, como pode-se observar na fig 6.20, ainda existe um circuito de filtro "passa baixas" que corta todas as frequências acima de 30 Hz.

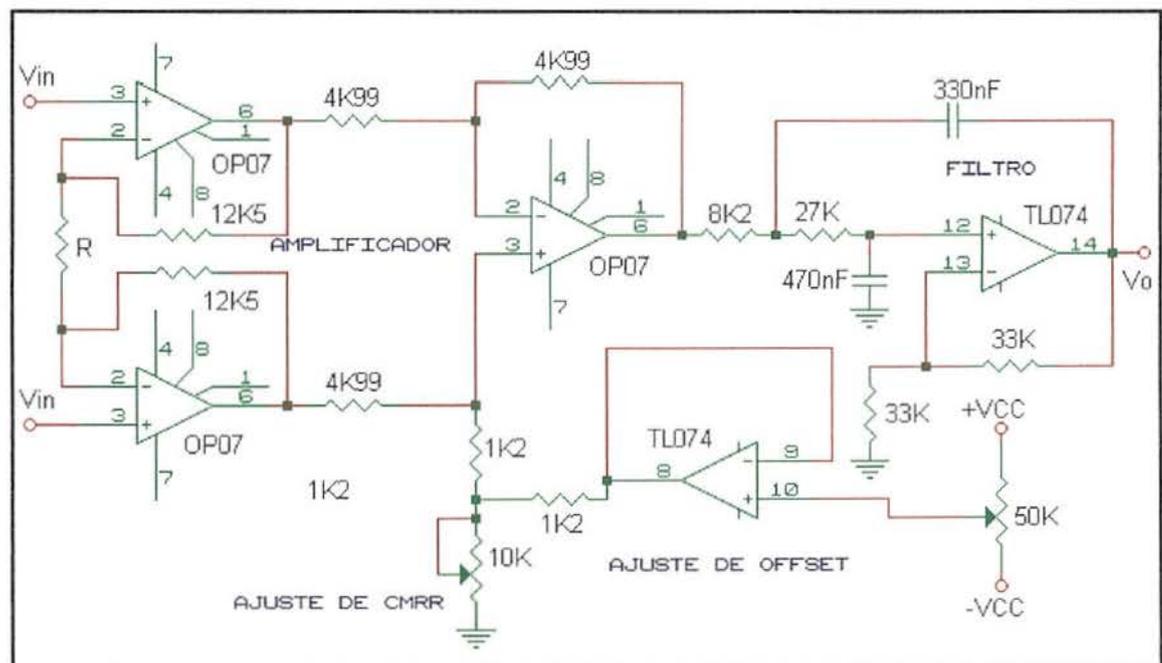


Fig. 6.20 - Circuito utilizado no condicionamento do sinal dos sensores. As entradas V_{in} do circuito são ligadas aos terminais de saída dos sensores magnetoresistivos.

6.3.4) Conversor Analógico Digital A/D

Na verdade não existe uma preocupação muito grande em relação a esta parte do *hardware*, uma vez que espera-se as maiores limitações no *software*.

Como o enfoque mais importante é a confiabilidade dos dados, optou-se pelo conversor A/D mais estável que se tinha em mãos. No caso um conversor de 12 bits , 10 Hz de taxa de aquisição (Novus) e com oito canais de entrada.

6.3.5) Microcomputador

Este ítem leva em conta o *software* que vai processar os dados vindos do conversor A/D para convertê-los em um ponto dentro de uma área na tela do microcomputador, que representa a área de trabalho útil do sistema montado, em tempo real, isto é, a medida que o ímã vai se deslocando pela superfície o movimento descrito pelo mesmo vai sendo registrado na tela do computador.

Os algoritmos foram apresentados nos itens 4.1.4 e 5.1.4. São baseados em uma tabela de dados referentes a diversas posições do magneto sobre a área ou o espaço de trabalho, montada em uma calibração que deve anteceder a qualquer ensaio. Esta tabela determina uma “malha” para cada sensor; quanto mais fina esta “malha” (quantos mais pontos fizerem parte da amostra) melhores serão os resultados alcançados na reprodução do movimento na tela.

Primeiramente existe uma rotina (escrita em linguagem C - Anexo I) que transforma quatro ou oito vetores (dados colhidos na calibração do sistema no plano ou no espaço) em matrizes distintas , para que cada sensor tenha sua própria base de dados de referência. Em seguida, o conversor A/D é liberado e uma medida referente a cada sensor é feita; estas medidas são então mandadas sequencialmente para uma rotina que tem a função de “varrer” a matriz de referência do sensor e numa primeira análise determinar quais os índices desta matriz (uma célula da malha) que incluem o ponto medido.

Concluída esta etapa, existe uma outra rotina que é responsável pela filtragem de todos os grupos de índices gerados, esta rotina faz uma análise estatística de quantas vezes ocorreu coincidências de índices da matriz, gerando apenas uma célula (um grupo de índices na matriz $M_{i,j}$ que são i e

$j, i+1$ e $j, i+1$ e $j, i+1$ e $j+1$ que representam um plano no caso 2D, ou três planos no caso 3D) nesta etapa é interessante observar que naturalmente os sensores que tiverem as respostas mais fiéis em relação à posição do magneto (sinal mais intenso à medida que o magneto se aproxima do sensor) são os que vão decidir se o ponto deve ser plotado naquelas coordenadas, uma vez que o par de sensores que estiver mais afastado tende a produzir uma resposta menos confiável.

Depois de passar por este processamento, tem-se certeza de que o ponto se encontra dentro de um volume ou uma área fechada e conhecida (por exemplo, se a calibração foi feita com um passo ou uma célula de 1 mm tem-se certeza de que o ponto medido se encontra dentro de uma área de 1mm quadrado ou um volume de 1 mm cúbico). Tendo estes pontos de referência, existem condições de afinar esta resposta, por isso os vértices são passados (índices da matriz) para uma rotina de interpolação para gerar uma nova matriz com os dados obtidos na primeira etapa do processo (vértices do elemento de área ou volume) do mesmo tamanho à matriz de referência (para efeitos de simplificação), e essa matriz, passa pelo mesmo processo descrito anteriormente, caracterizando um refinamento da resposta.

Numa etapa final são disponíveis os índices de uma matriz (matriz interpolada) que representam a menor área dentro da superfície de trabalho útil (pontos que serão plotados). Por fim, no intuito de minimizar os erros, faz-se uma média de n medidas, antes de definitivamente plotar o resultado.

6.4 - Resultados práticos das medidas de deslocamento no plano

Seguem a seguir telas (capturadas) de medidas realizadas no LMM (Laboratório de medições mecânicas), sob as melhores condições possíveis (longe de ruídos gerados por motores, fontes chaveadas, oscilações mecânicas, etc). Todas as trajetórias são retilíneas, visto que o parafuso se desloca dessa maneira.

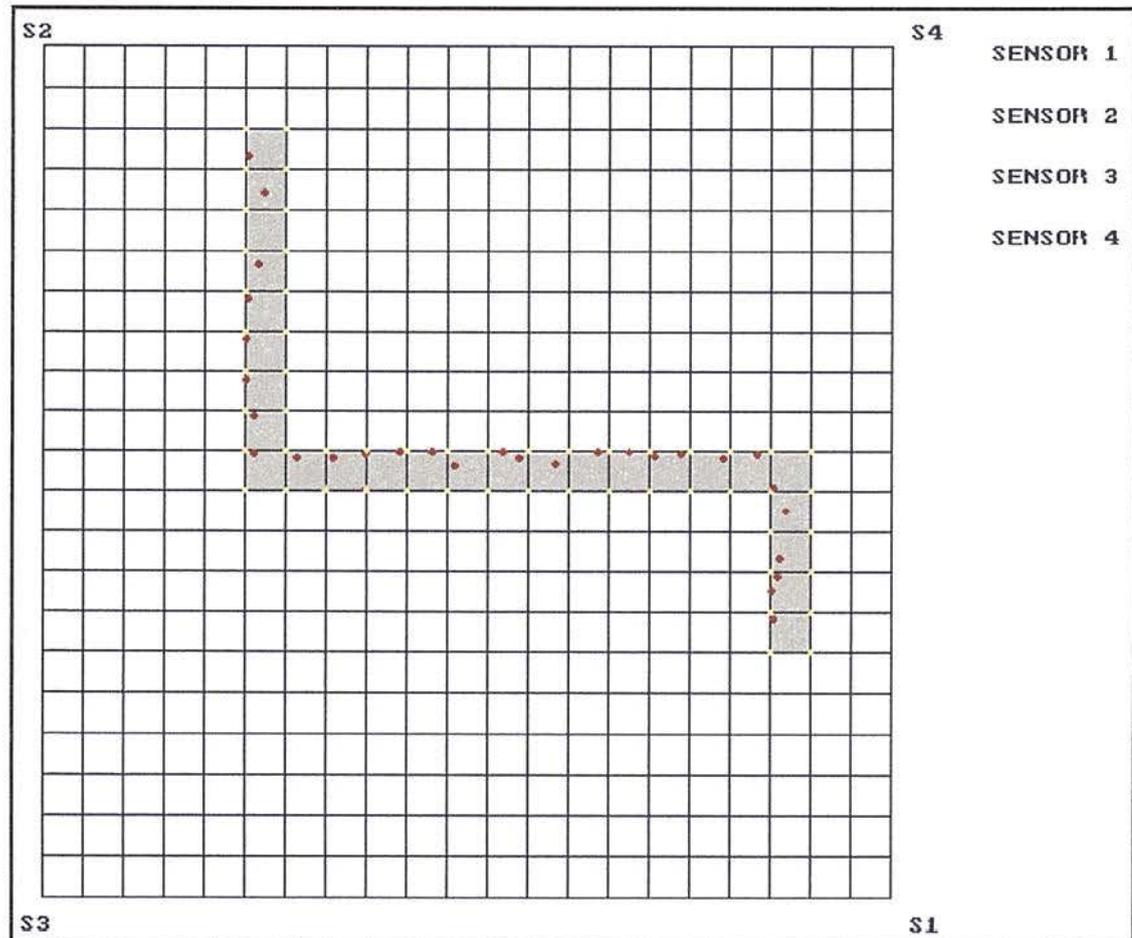


Fig. 6.21 - Resposta de um ensaio de deslocamento no plano; os pontos em amarelo representam a primeira aproximação, e os pontos em vermelho representam a posição do magneto na superfície (no total esta superfície mede 22 x 22 mm).

Pode se observar na fig. 6.21 que cada intersecção de retas (horizontal e vertical) representa 1 ponto real (lido na calibração), e a distância entre dois pontos na mesma reta é de 1 mm.

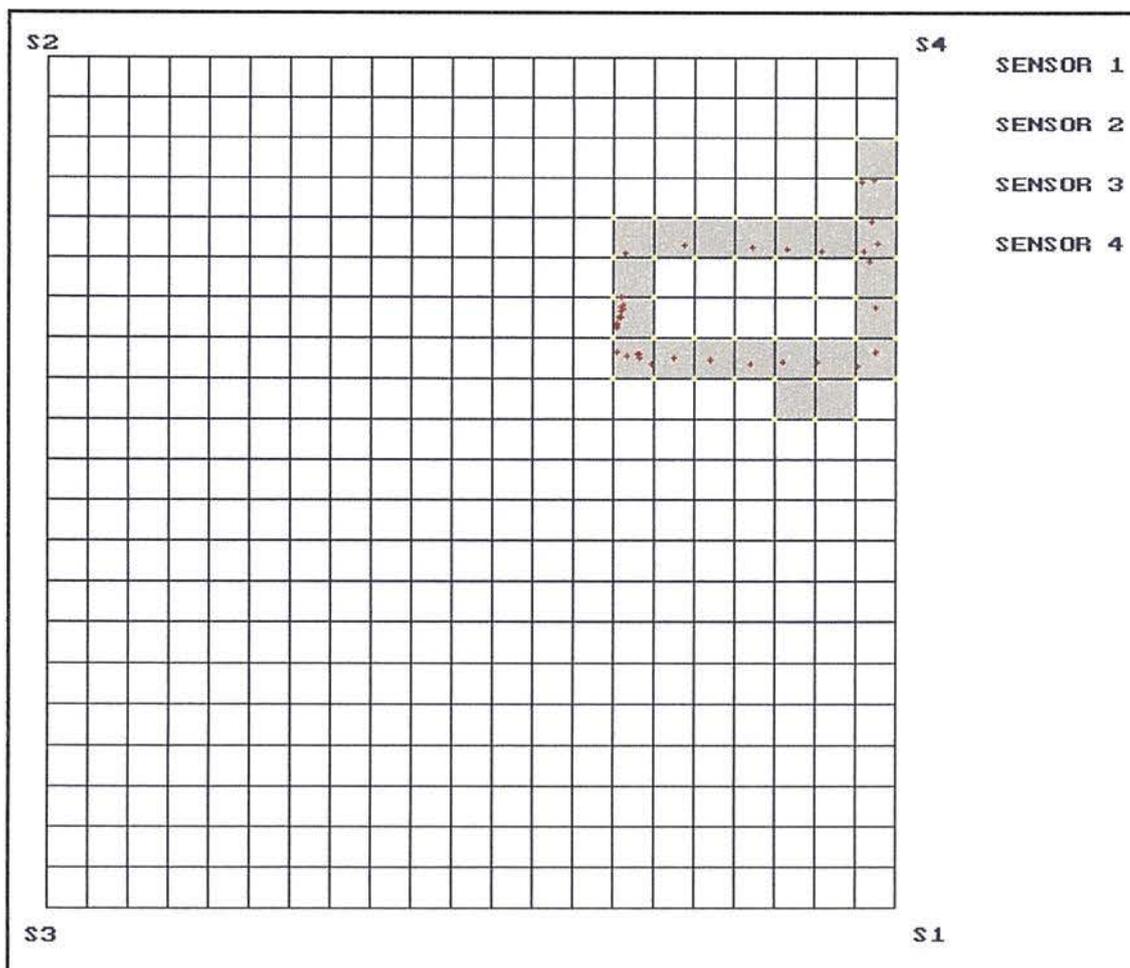


Fig. 6.23 - Resposta de uma trajetória aleatória, sendo que a posição real (no parafuso micrométrico que não varia) é sempre no centro do elemento de área (0.5 mm).

6.5 - Medidas de deslocamento no espaço

Abaixo seguem telas capturadas do *software* que reastreia o ponto no espaço, essas medidas foram feitas no Laboratório de Medições Mecânicas (LMM - UFRGS), sob as melhores condições possíveis (análogos ao item 6.4).

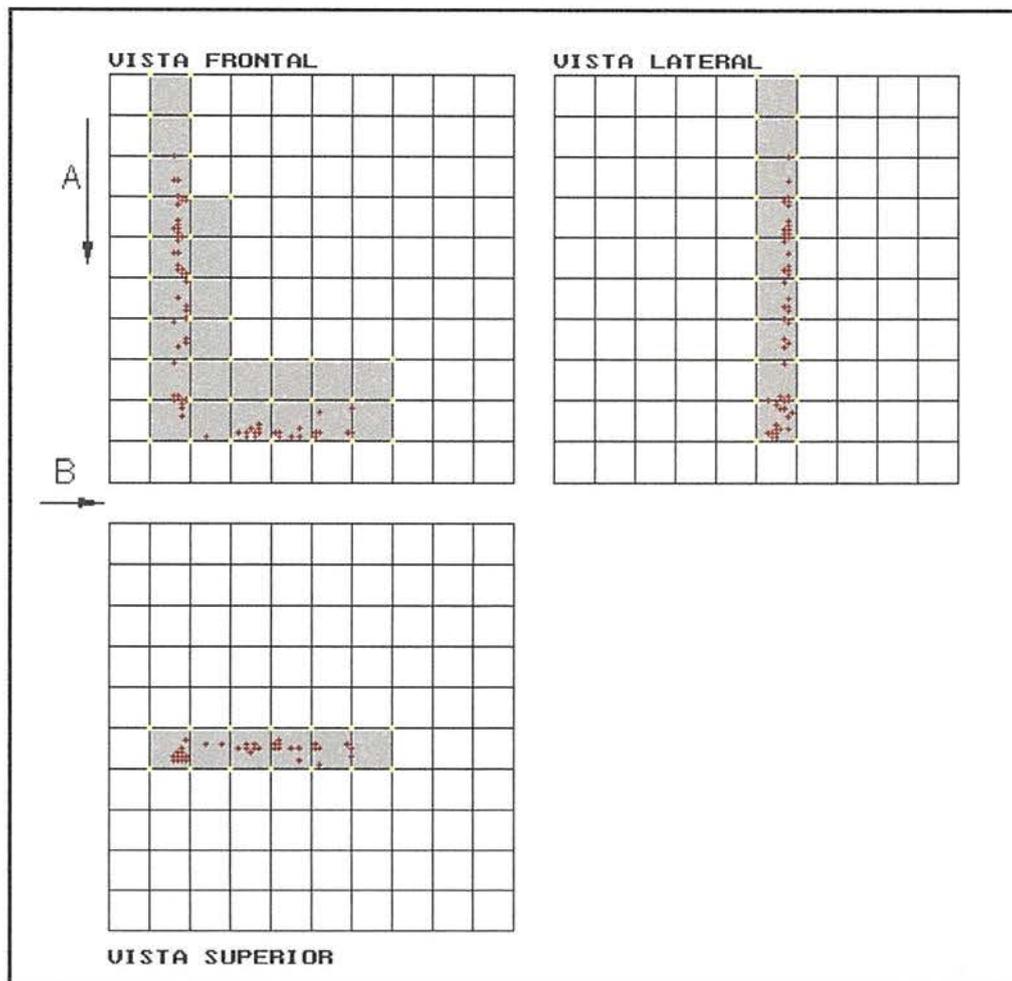


Fig. 6.24 - Resposta do sistema para um movimento primeiramente na direção A e depois para B.

Na fig. 6.24 pode ser vista a resposta do sistema para uma trajetória primeiramente na direção A e depois na direção B. Como era previsto (na

simulação), o sistema seria bem mais sensível a erros inerentes ao sistema (indução de 60 Hz, *drift* de temperatura, etc), porém a trajetória ainda assim pode ser identificada e o erro máximo (na maiorias dos casos) restringido ao elemento de área.

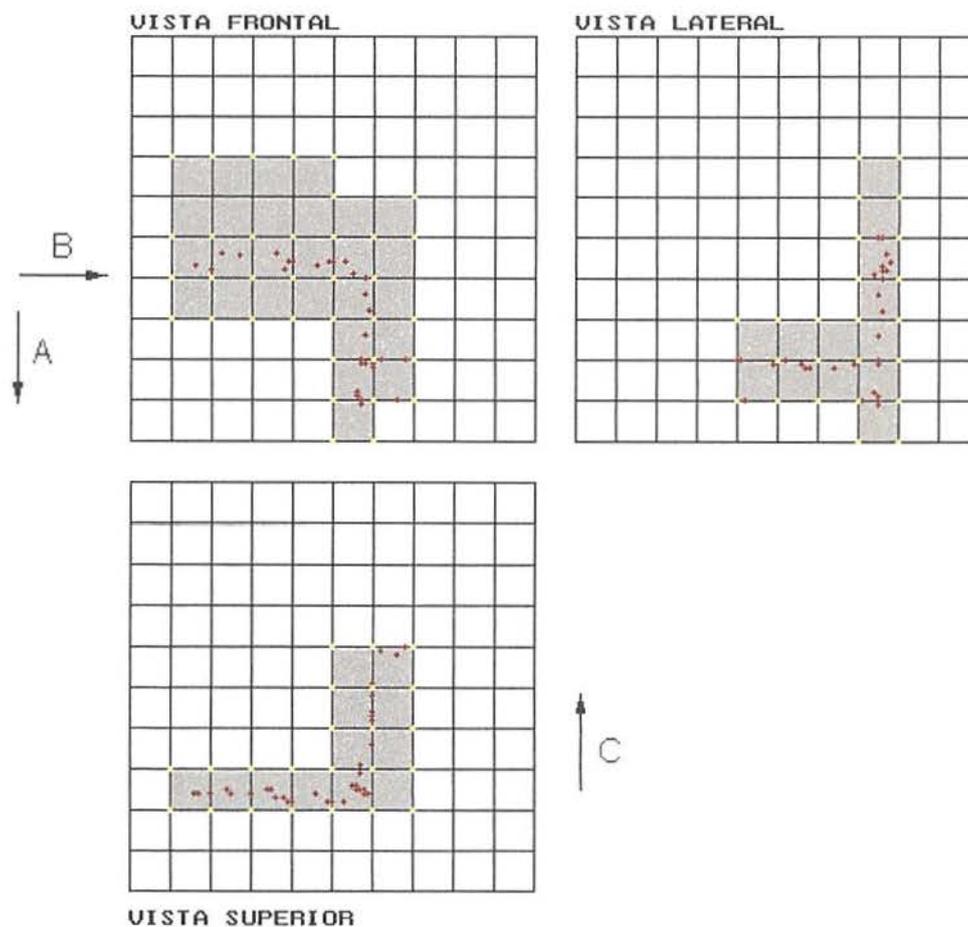


Fig 6.25 - Deslocamento em três direções, A, B e C.

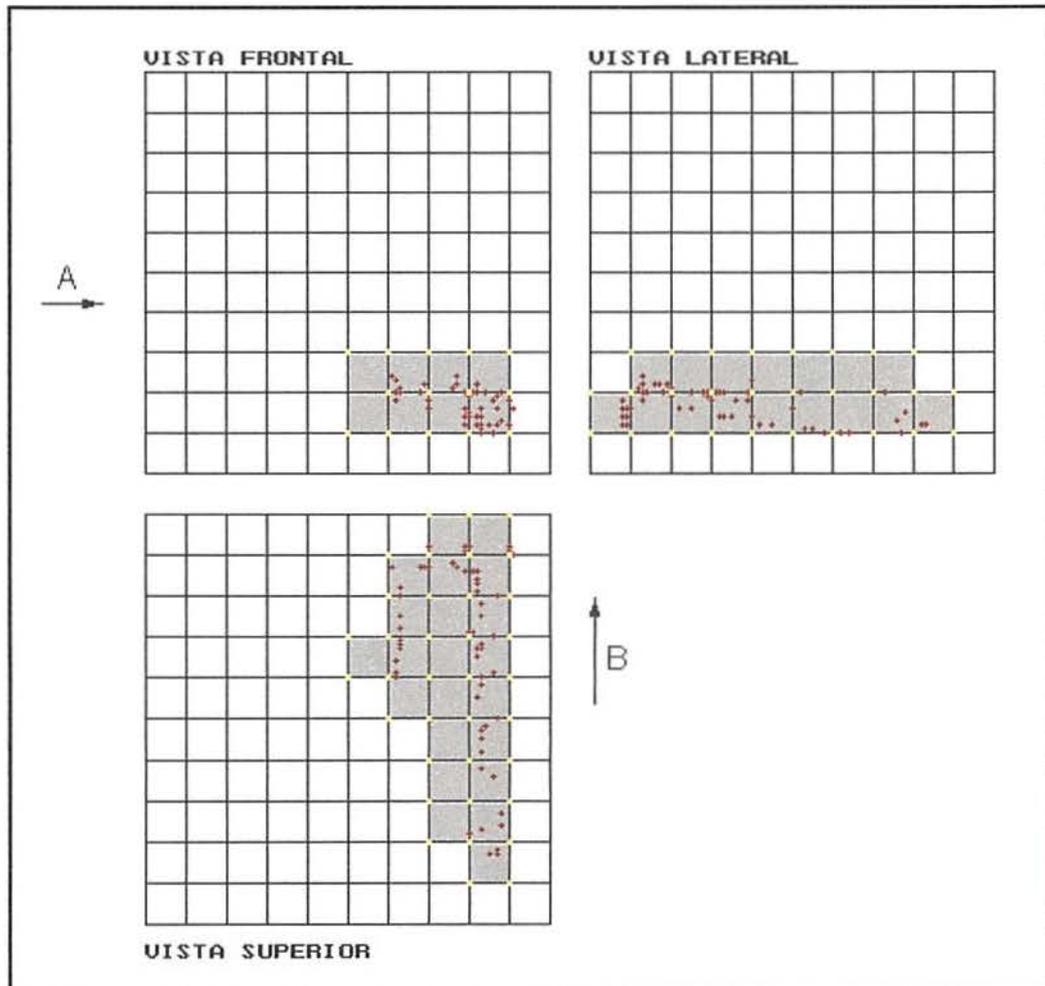


Fig. 6.26 - Deslocamento em duas direções , A e B.

6.6 - Análise

Nos ensaios práticos, pode-se observar que as trajetórias não são nítidas, como eram nas simulações; porém é preciso lembrar que as situações, na prática não são ideais, por exemplo, é preciso levar em conta fatores como, ruídos magnéticos, *drift* térmico, e principalmente as folgas mecânicas, inseridas nos instrumentos de calibração. Uma vez que todos os resultados são dependentes dos pontos adquiridos nesta etapa, era esperado que este seria um fator muito crítico (uma diferença de décimos em uma direção pode influenciar todos os sensores). Apesar destes resultados, apresentarem um certo erro, é preciso levar em conta, que estes dados estão "crus", ou seja, ainda é possível tratá-los e descartar dados que não válidos. Uma das sugestões (capítulo 7) é justamente implementar uma rotina que faça este procedimento: Uma vez que sabe-se que uma trajetória não deve possuir descontinuidade, pode ser estipulado que um ponto só é válido se entre o mesmo e seu antecedente existir uma distância menor ou igual a l (sendo este um parâmetro a ser fornecido). Dessa maneira tem-se implementado um filtro gráfico.

Os resultados vistos nos capítulos 4 e 5, constituem a razão do desenvolvimento deste projeto até aqui, e ainda apontam para possíveis melhoramentos do mesmo, cujas sugestões são dadas no capítulo 7.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 - Análise dos resultados

Os resultados obtidos, tanto no caso do deslocamento no plano, como para o deslocamento no espaço, foram bastante satisfatórios. As simulações permitiram prever de antemão o comportamento do sistema e de uma maneira geral, pôde-se comprovar com a parte experimental.

No caso do sistema *Rast_2D*, pode-se observar que os erros acontecem de forma aleatória dentro de uma certa faixa; esta faixa é limitada no próprio tamanho do elemento, ou seja, se o ponto estiver dentro de um elemento, seu erro máximo é de 1mm (no caso). No caso do *Rast_3D*, como quantidade de pontos de referência diminui, a resolução do sistema também cai. Neste caso o número de interações feitas pelo *software* aumenta muito em relação ao caso 2D, conseqüentemente a velocidade de resposta diminui consideravelmente, sendo esta uma preocupação muito importante a ser relevada nos melhoramentos do sistema.

Enfim, dentro de um limite de tolerância, o sistema proposto pode ser aplicado a várias situações que requerem medidas sem contato, tornando-se portanto mais uma opção, bastante flexível, para o estudo de aplicações de sensores magnéticos a medidas de deslocamento.

7.2 - Sugestões para melhoramentos do sistema

Várias mudanças podem ser implementadas, no intuito de melhorar o sistema, dentre elas pode-se citar:

- a) Repetição de ensaios realizados com sensores de outras naturezas (Hall, Fluxgates, etc), para avaliar respostas do mesmo sistema, com intercâmbio de sensores.
- b) Aumentar a velocidade de resposta do sistema, para isso é necessário modificar o *software*, ao invés de varrer toda a matriz de pontos para procurar a posição correta do magneto, pode-se fazer isto apenas uma vez, e depois uma busca apenas dos elementos vizinhos, no caso 2D 4 elementos de área; e no caso 3D, 8 elementos de volumes. Isto é possível, desde que seja levado em conta o fato de que a busca é de uma trajetória e não de um ponto aleatório, dessa maneira, depois de determinar um ponto, basta varrer apenas nas redondezas deste ponto para encontrar o próximo.
- c) Na calibração, utilizar uma mesa de deslocamento 3D comercial (para garantir que erros não sejam inseridos nesta etapa).
- d) Implementar outras disposições dos sensores, e através de comparações determinar a que melhor se comporta.
- e) Alimentar os sensores com corrente ao invés de tensão.
- f) Avaliar o comportamento do sistema para quantidades maiores e menores de pontos de referência, e também determinar de quanto em quanto tempo é necessário realizar uma nova calibração. Observando se o curva do sensor sofre mudanças com o tempo, ou se apenas muda o nível de *offset*.
- g) Implementar um software capaz de mostrar a trajetória para o caso 3D em vista perspectiva.

- h) Ao invés de determinar o ponto através de pontos de referência, buscar uma solução analítica, baseada na curva de resposta dos sensores, sabendo que estes tem uma saída radial (existem diferentes posições para o mesmo valor de tensão - equipotenciais).
- i) Avaliar a resposta do sistema como um todo, em aplicações como um *mouse* sem fio no caso do sistema *Rast_2D* e um gnatógrafo (ver cap2) para o caso do *Rast_3D* (ou outras aplicações aqui citadas ou não).
- j) Utilizar um conversor A/D mais rápido.

BIBLIOGRAFIA

- [AWS88] AWSCHALON D. D., ROZEN J. R., KETCHEN M. B., GALLGNER W. J., KLEINNASSER A. W., SANDSTRON R. L., BUMBLE B., 1988, Appl. Phys. Lett. 53 2108.
- [DIB86] DIBBERN, G., **Magnetic Field Sensors Using the Magnetoresistive Effect**, Sensors and actuators, 10(1986) pg 127 - 140.
- [EVE66] EVERETT, J. E. and OSEMEIKHIAN, **Spherical coils for uniform magnetic films**, Department of geophysisc, University of Cambridge. J. SCI. INSTRUM., 1966 VOL 43 pg. 470-474.
- [GAL91] GALLOP, J., **Squids, the Josephson Effects and Measurement (Squids)**, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex TW111 OLW, UK, Meas. Sci. Technol 2 (1991) pg 485-496.
- [GAL76] Galvanomagnetic Devices, Databook - Siemens (1976/77)
- [GOR72] GORDON, Daniel I., BROWN, Robert E., **Recent Advances in Fluxgate Magnetometry (Fluxgate)** IEEE Transactions on Magnetism, Vol. Mag-8, No.1, March 1972 pg 76-82.
- [HAN77] HANNAM, A. G., SCOTT, J. D., COU, R. E. De, **A Computer - Based System For The Simultaneous Measurement Of Muscle Activity And Jaw Movement During Mastication In Man**, Archs oral Biol. Vol. 22, pp 17 to 23. Faculty of Dentistry, University of British Columbia, Vancouver V6T 1W5, British Columbia, Canada
- [HAR89] HARADA, K., SUNOUCHI, Y., SKAMOTO, H. **A New Magnetometer using a Small Ring Core And Mos-Fets**, Transactions on magnetism, Vol. 25, No 5, September 1989, Department of Electronics, Kyushu University, 36, Fukuoka 812, Japan-pg 3399-3401
- [HIL85] HILBERT, C., CLARKE, J., 1985 J. Low Temp. Phys. 61 263-80

- [IMA91] IMAIZUMI, T., J. Acoustical Soc. Jpn.
47, 357, 1991
- [JAN75] JANKELSON, Bernard, SWAIN, Carroll W.,
CRANE, Patrick F., RADKE, John C.,
**Kinesiometric instrumentation: a new
technology**, JADA, Vol. 90, April, 1975 pg 834-840.
- [JEM84] JEMT, T., OLSSON K., **Computer - based
analysis of the single chewing cycle during
mastication in repeated registrations.**
University of Goteborg , University of Odontology,
Goteborg , Sweden. J. of Prosthetic Denstistry vol
53 n 3 ,1984
- [LAN88] LANCASTER ,D., **A solid state digital compass
(Fluxgate)**, Eletronics Now, dezembro 1988.
- [LEM76a] LEMMER J., LEWIN A., RENSBURG, L. B. VAN,
The measurement of jaw movement.Part I,
Johannesburg 2001, South Africa, J. Prosth. Dent.
Aug., 1976 pg 211-218
- [LEM76b] LEMMER J., LEWIN A., RENSBURG, L. B. VAN,
The measurement of jaw movement.Part II,
Johannesburg 2001, South Africa, J. Prosth. Dent.
Sep., 1976 pg. 312-318
- [MAK91] MAKHOTKIN, V.E., SHURUKHIN, B. P.,
LOPATIN, P., MARCHUKOV, YU, LEVIN, YU K.,
**Magnetic Field Sensors Based on Amorphous
Ribbons (Amorfos)** , Institute of General
Physics . U.S.S.R . Academy of Sciences. 38
Vaciloc Street. 117942 Moscow (U.S.S.R .) , C
Elsevier Sequoia / Printed in the Netherlands
Sensors and Actuators A. 25 27 (1991) pg 759 -762
- [MCC76] MCCOY, Richard B., SHRYOCK, Edwin
F., LUNDEEN, Harry C., **A method of transferring
mandiblar - movement data to computer
storage.** Bethesda Md. and Ginnesville Fla., 1976.
- [MIC87] MICHELSON P. F., PRICE JC , TABER RC,
Science, 237 150-7, 1987
- [MOH84] MOHRI K., HUMPHREY F. B., YAMASAKI J.,
KINOSHITA F., IEEE Trans. Magn. MAG-20
1409, 1984.

- [MOH87] MOHRI, K., JINNOUCHI, T., KAWANO, K.,
Accurate Mechanocardiogram Sensors Using Amorphous Star-Shaped Core Multivibrator Combined With a Magnet., IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-21, No.5, September 1987 pg. 2212-2214
- [MOH92] MOHRI, K., **Sensormagnetics (Amorfo)**, IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, Vol. 7, No8, August 1992, PG 654-664.
- [NEI86] NEILL, J., HOWELL, T., **Computerized Kinesiography in the study of mastication in dentate subjects.**, United Medical and Dental Schools of Guy's and St. Thomas's Hospitals, London, England, 1986 J. Prosth. Dent pg 629-649.
- [PIE91] PIEHSLINGER, Eva, CELAR, Ales G., CELAR, Robert M., SLAVICEK, Rudolph, **Compterized Axiography : Principles and Metods**, J. of Craniomandibular Practice vol 9 oct, 1991 pg 344-355.
- [POP91] POPEVIC, RS. **Hall Effect Devices** Ed. Adam Hilger (1991)
- [PRI70] PRIMDAHL, F., **The Fluxgate Mechanism, Part I: The Gating Curves of Parallel and Orthogonal Fluxgates (Fluxgate)**, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-6, No2, June 1970 pg. 376-382.
- [PRI79] PRIMDAHL, F., **The Fluxgate Magnetometer**, J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol. 12, pg. 241-252 1979. Plasma Group, Danish Meteorological Institute, Technical University of Denmark,
- [PRI82] PRINDAHL, F. and JENSEN, P Anker Jensen, Danish Space Research Institute, Lundtoftevej 7, DK-2800 Lyngby, Denmark, **Compact spherical coil for fluxgate magnetometer vector feedback (fluxgate)**, J. Phis. E: Sci. Strum., Vol. 15, 1982 pg. 221-226

- [SAN91] SANTOS, José, WARSHAWSKY, Peter,
Learning to reproduce a consistent functional jaw movement., University of Texas Health Science Center, Dental School, San Antonio, Texas; and University of Michigan, School of Dentistry, Ann Arbor, Mich., *The Journal of Prosthetic Dentistry* pg 294-302 1991.
- [SON92] SONODA, Y., **Magnetics Sensors and Medical Bio-Technology, Mesuring Vibrations, Displacements, and Articulatory Movements.** IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, vol. 7 no 9, September, 1992 pg 714-721.
- [TAL91] TALLENTS, ROSS H, GOLDIN BRUCE, CATANIA JOSEPH A., **Error analysis of a Magnetic jaw - tracking Device** *J. Craniomandibular Disord Facial Oral pain* 1991, 5: 51-56
- [YAM90] YAMADA, Yoshiaki, YOSHIDA, Noriaki, KOBAYASHI, Kazuhide, YAMAUCHI, Kiyotaka, **An aplication of magnet and magnetic sensor; measurement system for tooth movement,** IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 37, No. 10, October 1990
- [YAO91] YAO M., NUMATA T., INOKUCHI S., SAKURAI Y. *Dig. 15th annual Conference Magn. Jpn.* 29pC-5 p. 71, 1991.
- [WID79] WIDON A., *J. Low Temp. Phys.* 37 449.