

e 1

Universidade de São Paulo
Instituto de Física

MAGNETOMETRIA COM FILMES FINOS
DE PERMALLOY

Ramon Valls Martin



Dissertação apresentada ao
Instituto de Física da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Ciências

Defesa em 07/03/88

SBI-IFUSP



305M810T1274

São Paulo
1988

H. Aguiar
C. G. ...
Frank P. Mills

530.417

V195 m

M

e.1

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Valls Martin, Ramon

Magnetometria com filmes finos de "permalloy".
São Paulo, 1988.

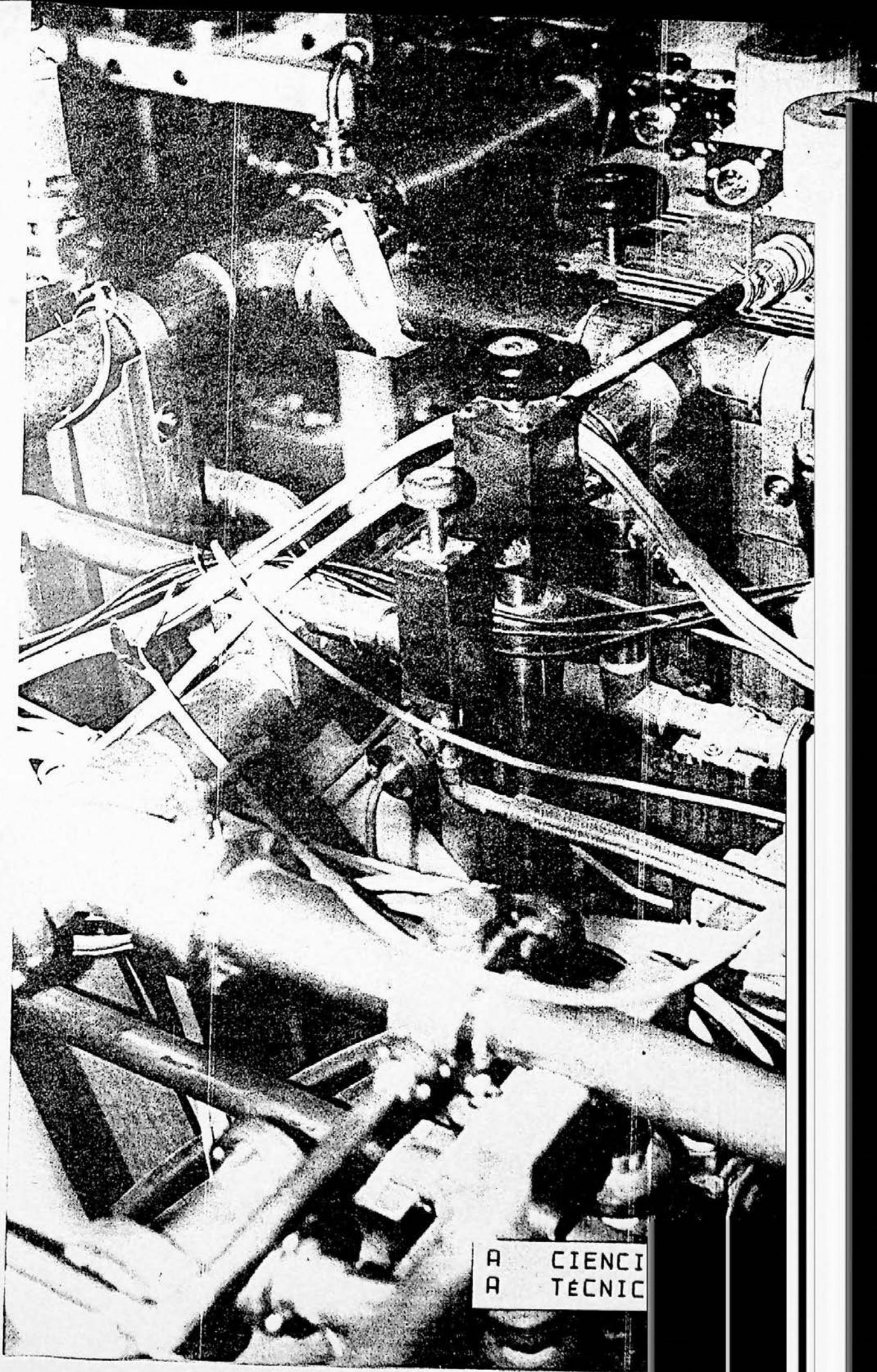
Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo.
Instituto de Física. Departamento de Física dos
Materiais e Mecânica.

Área de Concentração: Física do Estado Sólido

Orientador: Prof. Dr. Nei Fernandes de Oliveira Jr.

Unitermos: 1.Magnetometria; 2.Filmes magnéticos;
3.Magnetômetros; 4.Sensores de campo magnético.

USP/IF/SBI - 07/88



A CIENCIA
A TÉCNICA

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus sinceros agradecimento a todos aqueles que contribuíram para que este trabalho fosse executado, em especial a eficiente equipe técnica do Departamento de Física dos Materiais e Mecânica, que tanto colaborou na construção dos equipamentos utilizados.

Também agradeço muito a orientação e críticas do professor Nei Fernandes de Oliveira Jr, outro grande responsável pela execução deste trabalho.

Dedico este trabalho a todos que dele participaram e àqueles que tenham algum interesse no que será discutido.

I N D I C E

ABSTRACT.....	(i)
RESUMO.....	(ii)
CAPÍTULO 1 - MAGNETOMETRIA	
1.1 MEDIDAS DE CAMPOS MAGNETICOS.....	01
1.2 MAGNETÔMETROS.....	02
1.3 FILMES FINOS.....	02
1.4 HISTORICO.....	03
CAPÍTULO 2 - PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS FILMES FINOS	
2.1 INTRODUÇÃO.....	05
2.2 O FILME IDEAL.....	05
2.3 O FILME REAL.....	07
2.4 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO FILME.....	11
CAPÍTULO 3 - ESPECIFICAÇÃO DO FILME FINO	
3.1 INTRODUÇÃO.....	14
3.2 O SENSOR INDUTIVO.....	14
3.3 PARÂMETROS DO FILME.....	16
CAPÍTULO 4 - ESTUDO PRELIMINAR PARA A OBTENÇÃO DO FILME	
4.1 INTRODUÇÃO.....	19
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	19
4.3 CONDIÇÕES DE EVAPORAÇÃO.....	22
4.4 EFEITOS DE BORDA.....	23
CAPÍTULO 5 - EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO DO FILME	
5.1 INTRODUÇÃO.....	25
5.2 A EVAPORADORA.....	25
5.3 SISTEMA DE ALTO-VÁCUO.....	32
5.4 DETALHES CONSTRUTIVOS E OBSERVAÇÕES.....	34
5.5 PROCEDIMENTOS PARA A EVAPORAÇÃO.....	45
CAPÍTULO 6 - EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES	
6.1 INTRODUÇÃO.....	47
6.2 TRAÇADOR DE CURVAS B X H.....	47
6.3 DETALHES CONSTRUTIVOS.....	50
6.4 MÉTODOS DE MEDIDA DOS PARÂMETROS DO FILME.....	57
6.5 RESULTADOS OBTIDOS.....	63
CAPÍTULO 7 - O TRANSDUTOR INDUTIVO	
7.1 INTRODUÇÃO.....	67
7.2 DESCRIÇÃO DO TRANSDUTOR INDUTIVO.....	67
7.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSDUTOR INDUTIVO.....	68
7.4 CARACTERÍSTICAS DO TRANSDUTOR.....	76
7.5 SENSORES CONSTRUÍDOS.....	77
CAPÍTULO 8 - O MAGNETÔMETRO INDUTIVO DUAL	
8.1 INTRODUÇÃO.....	79
8.2 DESCRIÇÃO DOS MAGNETÔMETROS.....	80
8.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	81
8.4 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS.....	83
8.5 OS PROTÓTIPOS DO MAGNETÔMETRO INDUTIVO.....	89
8.6 REALIMENTAÇÃO E RUÍDO.....	106
8.7 O MAGNETÔMETRO CHAVEADO.....	107
CAPÍTULO 9 - MAGNETÔMETROS RESISTIVOS	
9.1 INTRODUÇÃO.....	110
9.2 MAGNETORESISTÊNCIA.....	110

9.3	TRANSDUTORES RESISTIVOS.....	112
9.4	O MAGNETÔMETRO RESISTIVO.....	114
9.5	RUÍDO/RESOLUÇÃO.....	119
9.6	CAMPO DESMAGNETIZANTE.....	120
9.7	ESPECIFICAÇÃO DOS FIMES MAGNETORESISTIVOS...	122
9.8	PROTÓTIPOS DO MAGNETÔMETRO RESISTIVO.....	122
9.9	PROTÓTIPO ALIMENTADO COM PULSOS.....	126
9.10	MINIATURIZAÇÃO.....	129
CAPÍTULO 10	- COMENTÁRIOS FINAIS	
10.1	COMENTÁRIOS GERAIS.....	132
10.2	COMENTÁRIOS ESPECÍFICOS.....	133
APÊNDICES	136
A.1.1	- O MAGNETÔMETRO "FLUX-GATE".....	137
A.1.2	- RUÍDO BARKHAUSEN.....	141
A.4.1	- EVAPORAÇÃO DE LIGAS.....	143
A.7.1	- MEDIDAS DE CAMPOS MAGNÉTICOS UTILIZANDO FILMES FINOS.....	145
A.7.2	- MÉTODOS DE DETECÇÃO DA VARIAÇÃO DE INDUTÂNCIA.....	148
REFERÊNCIAS	BIBLIOGRÁFICAS.....	152

A B S T R A C T

MAGNETOMETRY WITH "PERMALLOY" THIN FILMS

Thin films of Fe - Ni alloys, obtained by evaporation under static magnetic field, show a magnetic uniaxial anisotropy. These films are used to make magnetometers for detection of low intensity magnetic fields, with attractive features: simplicity, energy efficiency and resolution in the nT range. Here we discuss:

- a) The description of a method to obtain and characterize thin films for magnetometry purposes.
- b) The main features of the principal kinds of film magnetometers.
- c) Building and test of prototypes.

MAGNETOMETRIA COM FILMES FINOS DE PERMALLOY

Filmes finos de ligas de Fe-Ni, obtidos por evaporação sob a ação de um campo magnetico estatico, apresentam uma anisotropia magnetica uniaxial. Estes filmes prestam-se a construção de magnetômetros para a detecção de campos magneticos de pequena intensidade, com características especiais: simplicidade, baixo consumo e resolução na faixa de nT. Nesta monografia apresentamos:

- a) A descrição de um processo simples de obtenção e caracterização de filmes adequados a magnetometria.
- b) A discussão das características dos principais tipos de magnetômetros de filme fino.
- c) Construção e testes de prototipos.



CAPÍTULO 1

MAGNETOMETRIA

1.1 MEDIDAS DE CAMPOS MAGNÉTICOS

A detecção de campos magnéticos de pequena intensidade é de fundamental interesse numa série de aplicações industriais e científicas. Dentro da vasta gama de aplicações, podemos citar alguns exemplos:

Geofísica:

- Medidas de magnetização de minérios.
- Monitoramento de potenciais magnetotélúricos (determinação da estrutura geológica de solos).
- Medidas do campo magnético terrestre (estudo de anomalias e interação com corpos celestes).

Indústria:

- Sensores para controle de processos industriais.
- Sensores de posição.
- Detecção de defeitos em estruturas metálicas.
- Caracterização de materiais magnéticos.

Laboratórios científicos:

- Medidas de susceptibilidade de amostras.
- Mapeamento de campos magnéticos.
- Medidores de fluxo.

Militar:

- Instrumentos de orientação.
- Detecção de navios.

Um sensor de campo magnético (magnetômetro), que se presta a tais aplicações, deve ser capaz de resolver detalhes da ordem de 1τ ($1\tau = 10^{-8} \text{ Oe} = 0.1 \text{ nT}$), dentro da amplitude de variação do campo magnético terrestre ($\approx \pm 1 \text{ Oe}$). Em outras palavras, um sensor deste tipo pode distinguir campos magnéticos, cuja intensidade equivale a uma parte em 100000 do campo terrestre.

1.2 MAGNETÔMETROS

Vários tipos de magnetômetros podem ser implementados. Pastilhas de material semiconductor, através do efeito Hall, permitem a construção de magnetômetros simples, porém com resolução limitada à campos elevados. Magnetômetros baseados em efeitos quânticos observados em anéis supercondutores (SQUID) permitem altas sensibilidades, mas exigem baixíssimas temperaturas de operação, obtidas através de imersão em banho de hélio líquido. Supercondutores de alta temperatura vem sendo intensamente pesquisados e provavelmente teremos, em breve, um SQUID operando em temperaturas mais elevadas (N_2 líquido).

O magnetômetro tradicionalmente utilizado, que atende às especificações das aplicações listadas acima, é conhecido como magnetômetro "flux-gate". Uma breve descrição deste magnetômetro, algumas considerações quanto ao projeto de seu núcleo e quanto às restrições em sua utilização, são fornecidas no apêndice A.1.1.

Atualmente, outra família de magnetômetros vem despertando interesse: magnetômetros de filmes finos.

1.3 FILMES FINOS

Vamos resumir abaixo, algumas peculiaridades, que tornam os filmes finos magnéticos interessantes na confecção de núcleos de sensores de campos magnéticos:

a) Bidimensionalidade e desmagnetização pequena no plano do filme :

Um campo magnético pode ser sempre decomposto em uma componente perpendicular e outra paralela ao filme. Devido à baixíssima relação espessura/comprimento, a componente perpendicular praticamente não produz qualquer magnetização. Ou seja, o campo de desmagnetização praticamente anula a magnetização. Por outro lado e pelo mesmo motivo, a componente paralela ao filme é pouco afetada pela desmagnetização, mesmo para os altíssimos valores de permeabilidade que caracterizam estes filmes.

b) Anisotropia uniaxial:

Como veremos no próximo capítulo, nos filmes finos temos a possibilidade de induzir pequenas anisotropias uniaxiais, permitindo que o filme apresente um comportamento magnético semelhante ao do monodomínio ideal.

c) Resposta rápida:

Num material em bloco, dificilmente poderá haver magnetização, sem movimento de paredes de domínios (processo viscoso). No material disposto na forma de um filme, devido à sua característica bidimensional, podemos ter a magnetização, quase que totalmente devida à mecanismos de rotação de domínios (processo elástico e inerentemente muito mais rápido que o deslocamento de paredes de domínios).

1.4 HISTÓRICO

Filmes finos foram inicialmente utilizados na detecção de pulsos de curta duração (ns), devido a seu tempo de resposta muito rápido. Na década de 60 intensificaram-se as investigações sobre filmes, pois tinha-se a perspectiva de sua ampla utilização como elementos de memória para computadores. No final da década de 60, começaram a surgir algumas patentes de filmes aplicados a dispositivos sensores de campo magnético. O interesse nestes filmes, na área de computação, diminuiu com o advento das memórias semicondutoras de grande capacidade. Os desenvolvimentos continuaram lentamente, com alguma pesquisa em magnetometria, na década de 70. Recentemente, o interesse nestes dispositivos tem-se intensificado, devido à automatização de processos que necessitam sensores eficientes e na área científica, com o grande emprego sistemas de sensoriamento.

Neste trabalho, descrevemos um sistema relativamente simples, capaz de produzir e caracterizar filmes adequados à magnetometria. Este sistema foi projetado e construído no laboratório a partir de componentes existentes ou facilmente adquiríveis, não envolvendo qualquer grande investimento. Um acervo de mais de 50 evaporações realizadas com este equipamento permitiu estabelecer procedimentos e relacionar as propriedades dos filmes obtidos com estes procedimentos.

Com os filmes produzidos, construímos protótipos de dispositivos magnetométricos seguindo idéias patenteadas nos EUA no fim da década de 60 e início da década de 70 e cujos prazos de validade já expiraram ou estão expirando. Nesta monografia, apresentamos um estudo dos princípios básicos de funcionamento destes magnetômetros, discutimos suas propriedades e apresentamos os resultados de testes feitos com os protótipos construídos.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS FILMES FINOS

2.1 INTRODUÇÃO

Filmes magnéticos finos, apresentando anisotropias uniaxiais, têm sido produzidos e estudados há mais de 30, utilizando uma série de materiais, da qual destaca-se o "permalloy". Este foi o material mais investigado durante os estudos para construção de memórias. Trata-se de uma liga, cujos elementos básicos são o Fe e o Ni.

Para a obtenção da anisotropia uniaxial, os filmes são depositados sobre substratos aquecidos na presença de um campo magnético uniforme. Os processos microscópicos, envolvidos na criação desta anisotropia, são complexos e não têm, ainda, uma explicação clara. Neste trabalho, nos restringiremos a alguns aspectos do comportamento magnético macroscópico dos filmes.

2.2 O FILME IDEAL

Através de um modelo simples, composto de apenas dois domínios, faremos uma descrição do mecanismo de magnetização, presente num filme orientado (filme com anisotropia uniaxial). O campo externo pode ser aplicado na direção de fácil magnetização, que passaremos a designar de direção ou eixo fácil, ou na direção ortogonal, chamada de direção ou eixo duro. Por convenção, o eixo fácil corresponderá ao eixo x e o eixo duro, ao y.

No segundo caso, com o campo externo paralelo ao eixo duro, teremos a curva de magnetização ou histerese representada na figura 2.1.

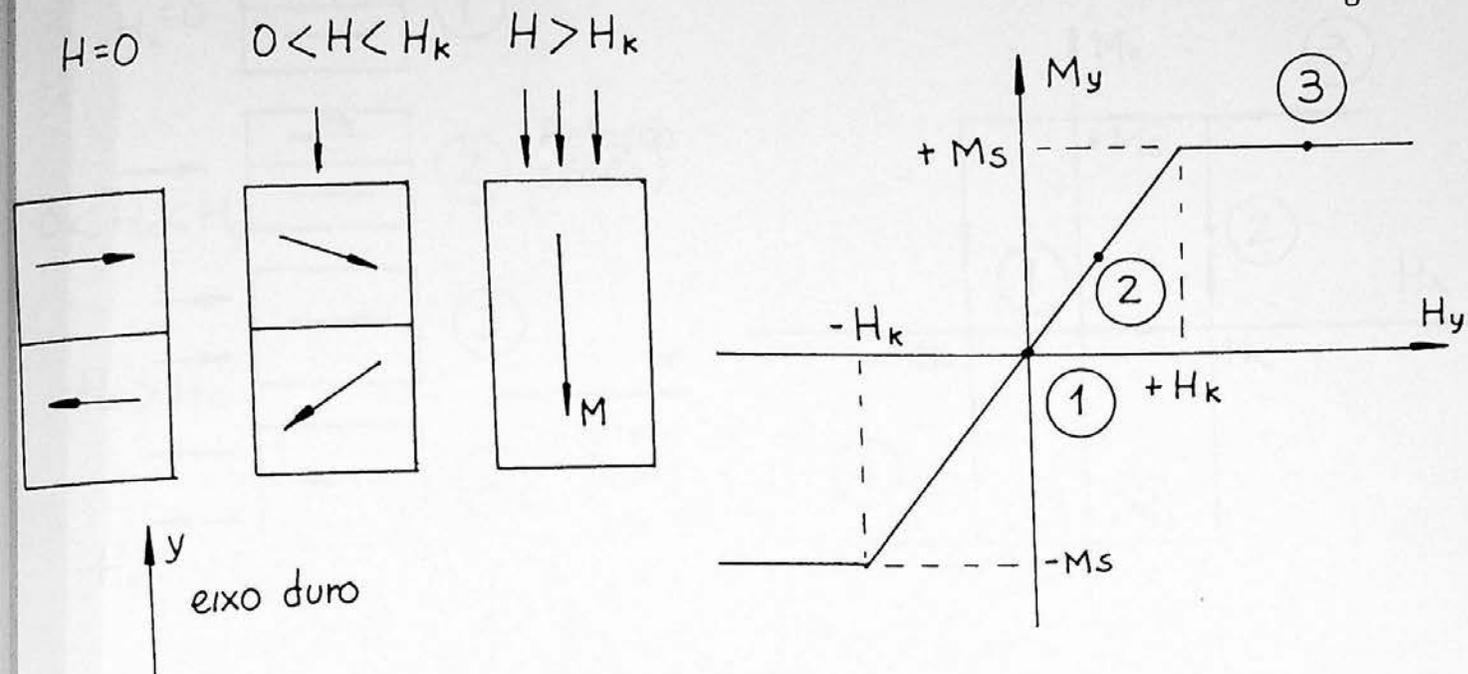


Figura 2.1: Processo de magnetização ao longo do eixo duro.

Inicialmente, o filme encontra-se desmagnetizado na direção dura. Com a aplicação de um campo externo de intensidade crescente nesta direção, os domínios começam a sofrer uma rotação. A magnetização, ao longo da direção dura aumenta linearmente com o campo aplicado, até que os domínios estejam totalmente orientados na direção dura. A amostra está saturada magneticamente e o mínimo campo para obter esta saturação é chamado campo de anisotropia - H_k . A energia envolvida neste processo é chamada de energia de anisotropia e a constante de anisotropia induzida, pode ser definida como:

$$K_u \equiv 2 H_k / M_s$$

2.1

onde M_s é a magnetização de saturação do material.

No primeiro caso, com o campo externo paralelo ao eixo fácil, teremos a curva de magnetização ou histerese representada na figura 2.2.

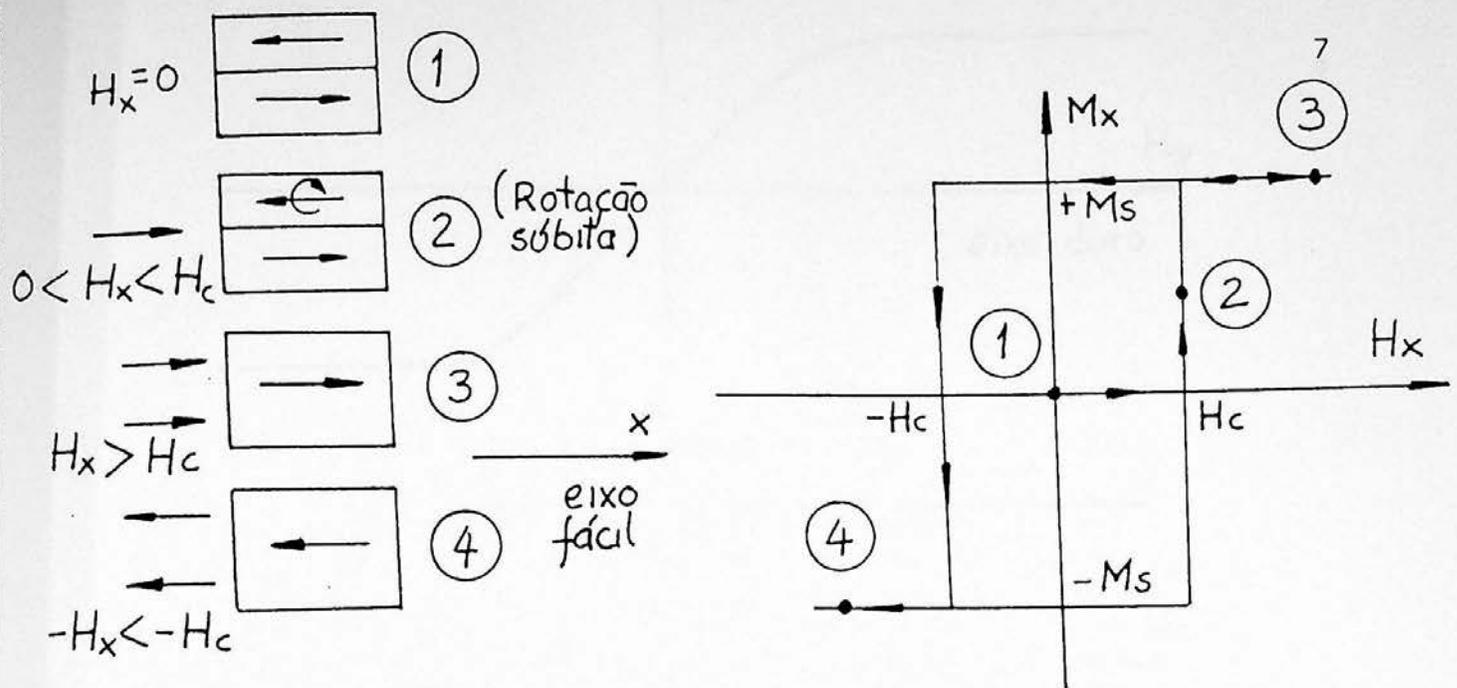


Figura 2.2: Processo de magnetização ao longo do eixo fácil.

Inicialmente o filme está desmagnetizado. Com a aplicação de um campo externo paralelo ao eixo fácil, a configuração inicial dos domínios permanecerá inalterada, até que a intensidade do campo aplicado seja igual ao campo de anisotropia H_k . Esta é uma situação de equilíbrio instável. Qualquer incremento do campo aplicado provoca a súbita rotação ("switching") do domínio orientado contrariamente ao campo, saturando a amostra. O ponto em que a curva de magnetização intercepta o eixo do campo aplicado, é chamado de campo coercivo $-H_c$. No caso desta amostra ideal, temos naturalmente, que: $H_c = H_k$.

2.3 FILME REAL

O comportamento de um filme real em boas condições para utilização em magnetometria, têm comportamento semelhante ao descrito anteriormente. A característica bidimensional do filme permite a formação de grandes domínios coplanares.

Na direção fácil do filme real, sempre observamos que $H_c < H_k$. Isto ocorre pois no filme real há, além da rotação de domínios, o movimento de paredes e a nucleação de novos domínios. Estes processos facilitam a reversão da magnetização, antes do campo de anisotropia ser atingido (ou seja $H_c < H_k$). Na figura 2.3, temos a curva de magnetização no eixo fácil para um filme real.

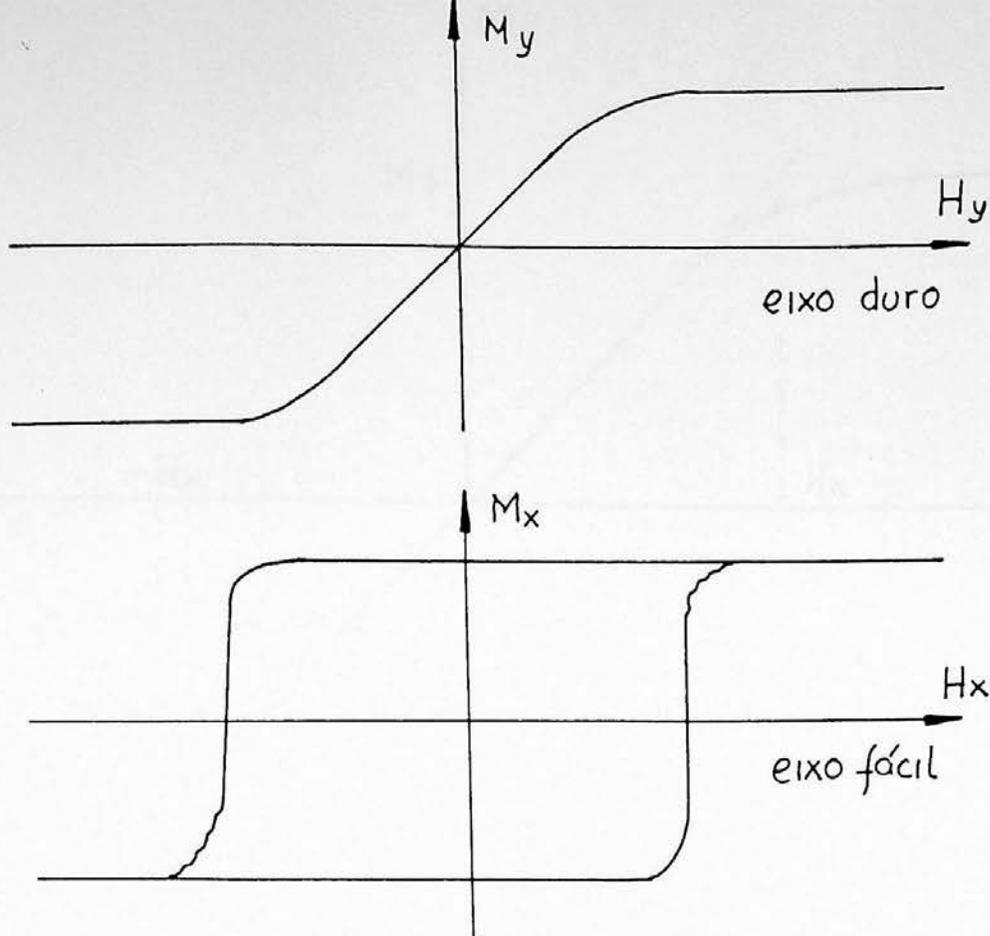


Figura 2.3: Curvas de magnetização de um filme real.

Na direção dura, observamos que a curva de magnetização é linear apenas em sua região central (figura 2.4). A amostra é saturada com campos muito maiores que o campo de anisotropia da amostra ideal. O arredondamento dos cantos da curva indicam a existência de regiões do filme (principalmente nas suas bordas), em que a magnetização tem modos diferentes da simples rotação de domínios.

A partir deste ponto, quando nos referirmos ao campo de anisotropia de uma amostra real, estaremos utilizando o valor do campo de anisotropia obtido por extrapolação linear das curvas de magnetização (figura 2.4). Esta aproximação é razoável, quando trabalhamos com um dispositivo que opere próximo da região linear da curva.

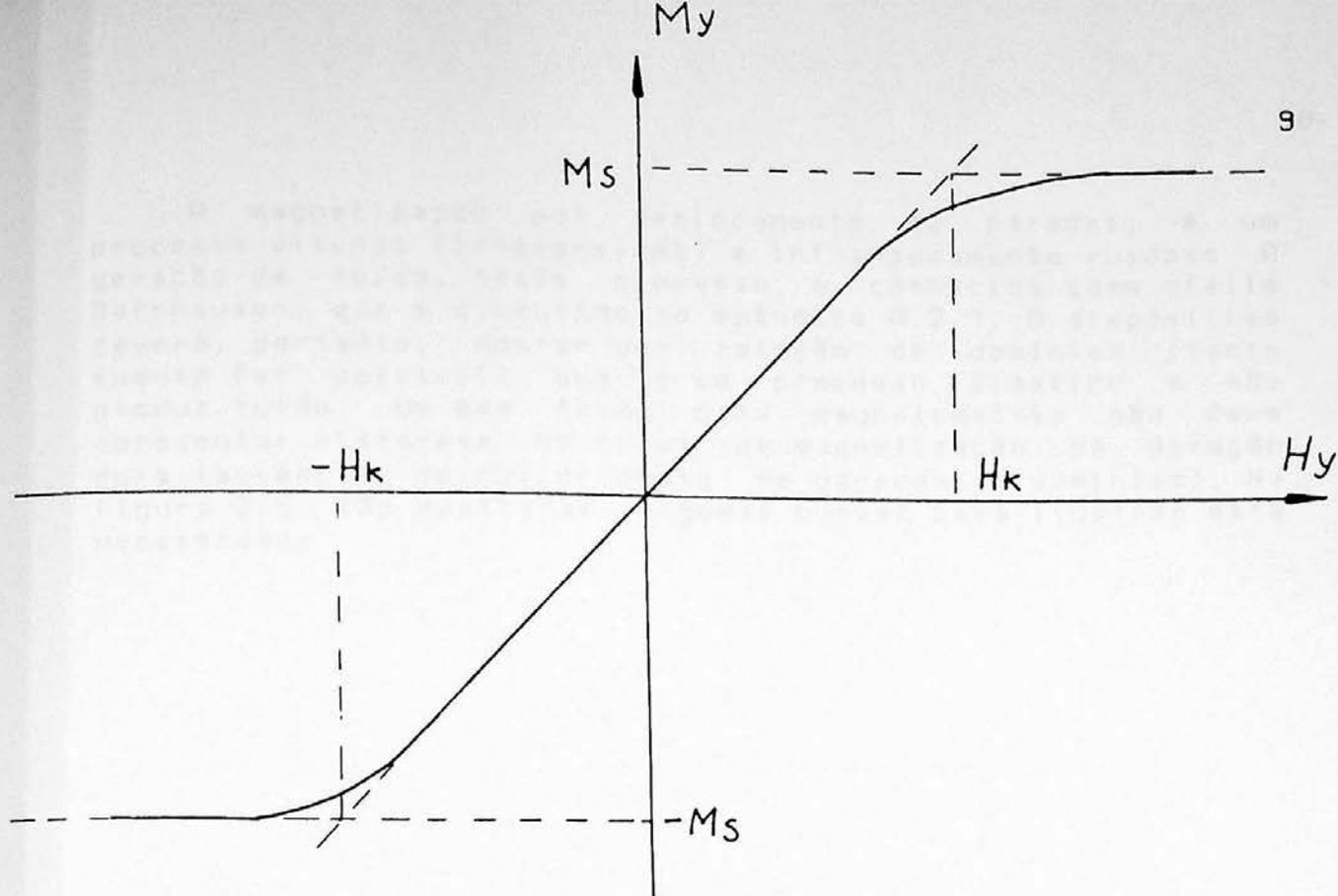


Figura 2.4: Curva de magnetização na direção dura de um filme real.

Em computação, para o armazenamento da informação digital, é utilizada a curva de magnetização no eixo fácil, pois esta apresenta grande histerese. Enquanto a curva na direção dura não apresenta aplicação em memórias digitais, esta é a direção de interesse para a magnetometria.

Para a detecção de campos magnéticos de pequena intensidade (resolução de campos da ordem de $\tau = 10^{-5} \text{Oe}$), um dos problemas fundamentais é a geração de ruído no núcleo sensor. O mecanismo, através do qual transformaremos o campo desconhecido num sinal utilizável, deve apresentar o menor ruído intrínseco possível. A primeira etapa na detecção de um campo magnético, é a interação deste, com o núcleo do sensor. Desta interação, resulta uma alteração do seu estado de magnetização, que fornecerá a informação sobre o campo medido.

A magnetização por deslocamento de paredes, é um processo viscoso (irreversível) e intrinsecamente ruidoso. A geração de ruído, neste processo, é conhecida como efeito Barkhausen, que é discutido no apêndice A.2.1. O dispositivo deverá, portanto, operar por rotação de domínios (tanto quanto for possível), que é um processo elástico e não produz ruído. Um bom filme para magnetometria não deve apresentar histerese na curva de magnetização da direção dura (ausência de deslocamento de paredes de domínios). Na figura 2.5 são mostradas algumas curvas para ilustrar esta necessidade.

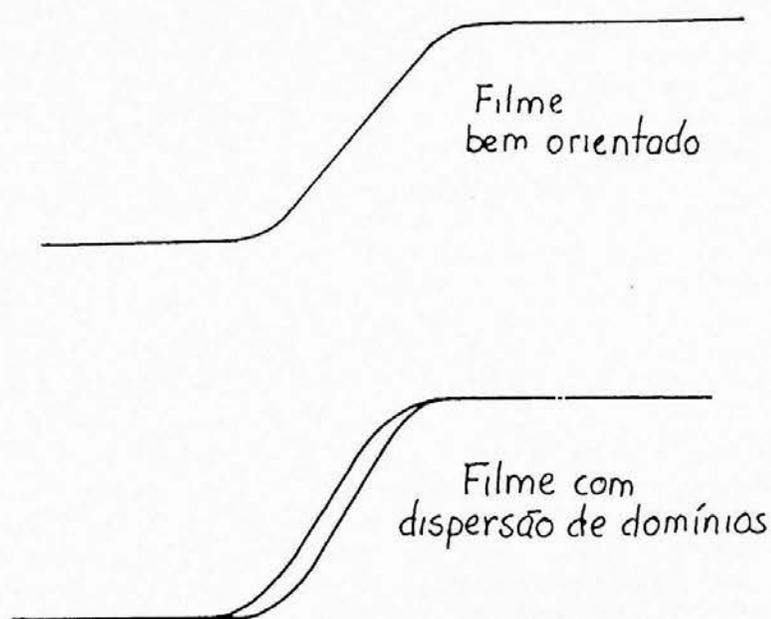


Figura 2.5: Curvas de magnetização no eixo duro: a) Filme adequado a magnetometria; b) Filme inadequado com histerese no eixo duro.

2.4 MODELAGEM DO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO DO FILME

O comportamento magnético do filme orientado aproxima-se bastante do monodomínio magnético. Baseados nisto, trataremos o filme através de um modelo simplificado, que Descreve as propriedades de um monodomínio. Assumimos uma energia da forma:

$$E_u = K_u \cdot \text{sen}^2\theta \quad 2.2$$

onde θ é o ângulo entre a direção do vetor de magnetização e a direção fácil

Esta expressão é fenomenológica. Trata-se apenas do primeiro termo (aproximação) de uma expansão em série de potências de $\text{sen}^2\theta$ (devem existir pontos de mínima energia para $\theta = 2\pi(n+1/4)$, $n \in \mathbb{N}$). Apenas o primeiro termo da expansão é suficiente para descrever o fenômeno satisfatoriamente (modelo simplificado).

A energia total do monodomínio sob a ação de um campo externo é dada por:

$$\begin{aligned} E &= K_u \cdot \text{sen}^2\theta - \vec{H} \cdot \vec{M} \\ E &= K_u \cdot \text{sen}^2\theta - H_x \cdot M_x \cdot \cos\theta - H_y \cdot M_y \cdot \text{sen}\theta \end{aligned} \quad 2.3$$

Aqui estamos assumindo, que os efeitos de desmagnetização são de molde a anular o efeito da componente do campo perpendicular ao filme e, por outro lado, não afetar a magnetização no plano do filme. Ao longo de todo este trabalho, estaremos considerando apenas as componentes do campo magnético aplicado no plano do filme. Além disso, confundiremos o campo interno com o campo aplicado, desprezando a correção de desmagnetização.

Derivando a energia em relação ao ângulo de magnetização (θ), utilizando a relação 2.1 e normalizando as componente do campo aplicado H_x, H_y em relação à H_k ,

$$\bar{H}_x = H_x/H_k \text{ e } \bar{H}_y = H_y/H_k ;$$

temos a conhecida relação de Stoner-Wohlfarth:

$$\text{sen}\theta \cdot \cos\theta + \bar{H}_x \cdot \text{sen}\theta - \bar{H}_y \cdot \cos\theta = 0 \quad 2.4$$

A solução da equação acima, fornece os ângulos de magnetização estável. Sua solução pode ser feita graficamente ou numericamente. Os ângulos de magnetização estável, obtidos numericamente, são plotados na figura 2.5.

A componente da magnetização sobre o eixo fácil: $M_x = M_s \cdot \cos\theta$, e a componente sobre o eixo duro: $M_y = M_s \cdot \sin\theta$ em função dos campos aplicados, são mostradas através de soluções numéricas na figura 2.6.

Fazendo $H_x = 0$ na figura 2.7.a e $H_y = 0$ na figura 2.7.b, temos as curvas de magnetização, anteriormente mostradas para o filme ideal.

A figura 2.7.b mostra o comportamento do material, da maneira que seria observada por um sensor, cuja bobina estivesse acoplada ao eixo duro. Notamos que a permeabilidade (inclinação das curvas de magnetização) da amostra muda de acordo com a magnitude do campo aplicado ao eixo fácil. Este é um modo de operação possível para a implementação de um sensor de campo magnético (mudança da permeabilidade do filme através do mecanismo de rotação de domínios). O sensor consiste, então, basicamente de uma bobina sensora acoplada ao eixo duro e o campo a ser medido, aplicado ao longo do eixo fácil.

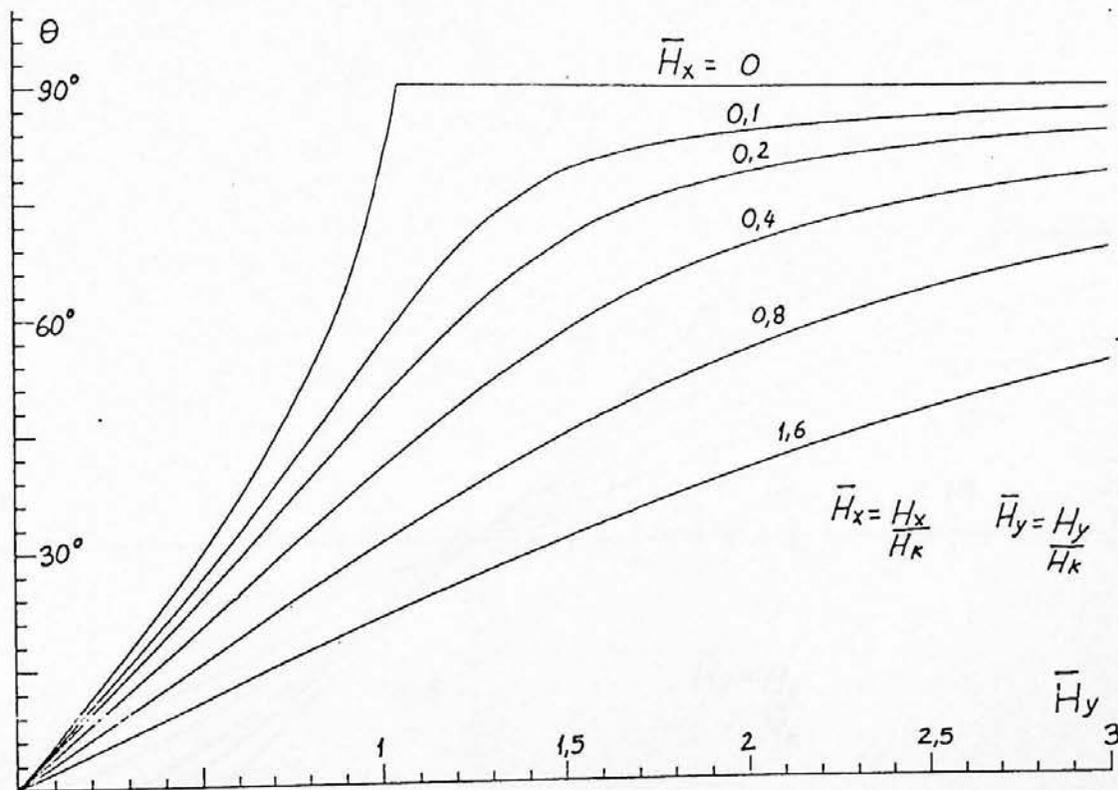


Figura 2.6: Ângulos de magnetização estável.

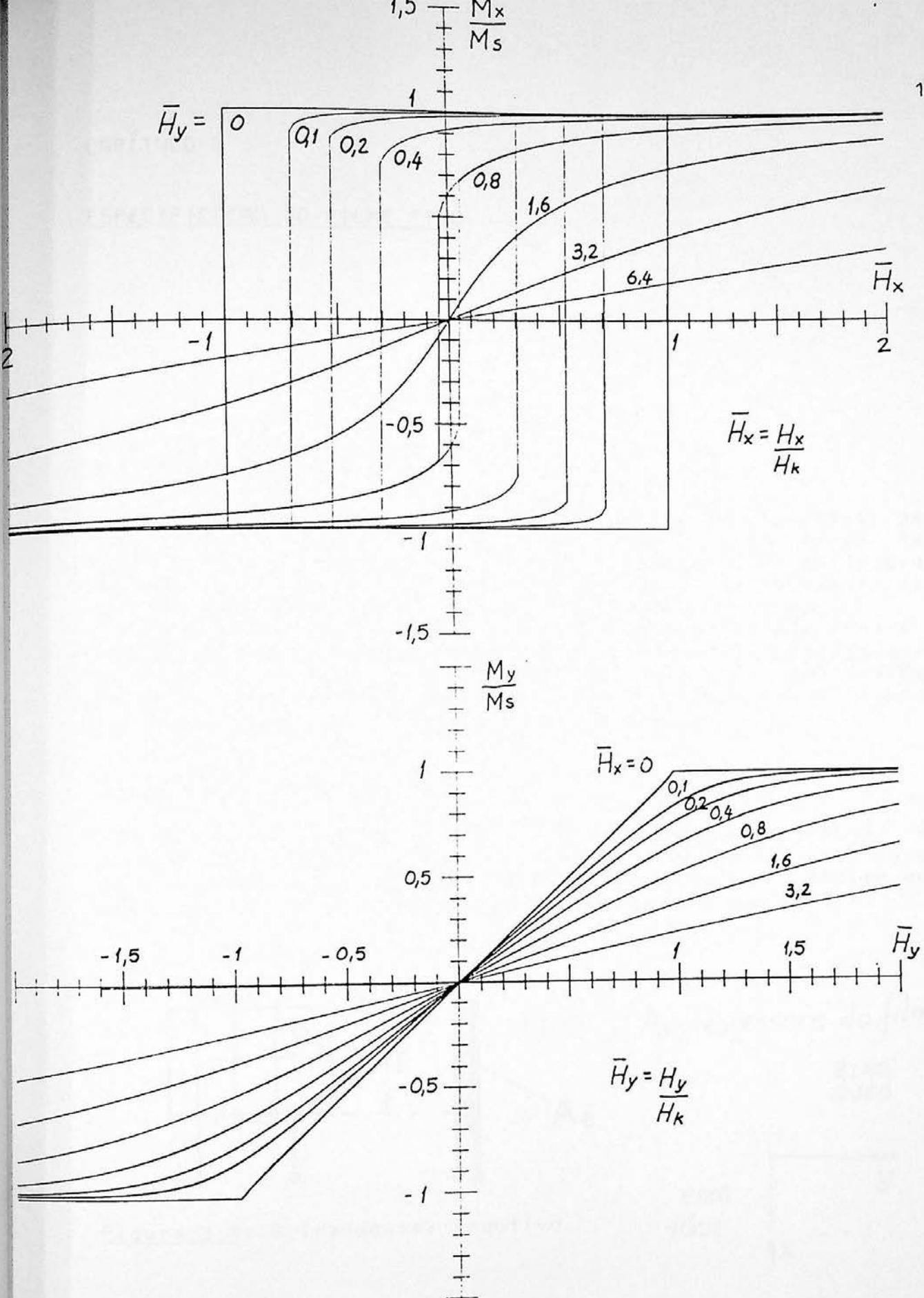


Figura 2.7: Componentes da magnetização em função dos campos aplicados: a) No eixo fácil - M_x ; b) No eixo duro - M_y .

CAPÍTULO 3

ESPECIFICAÇÃO DO FILME FINO3.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, vimos que um filme, utilizável na construção de magnetômetros, deve possuir uma curva de magnetização na direção dura sem histerese. A histerese nesta curva indica a presença indesejável de movimento de paredes de domínios, durante a magnetização do filme.

Neste capítulo, vamos procurar informações adicionais, que permitam obter as características magnéticas desejáveis do filme utilizado em magnetometria. Para isto, adotaremos um tipo específico de transdutor: o sensor de campo magnético indutivo, que descrevemos a seguir.

3.1 O SENSOR INDUTIVO

O sensor indutivo, de interesse neste trabalho, é composto basicamente de um enrolamento acoplado ao eixo duro de um conjunto de filmes (o filme funciona como núcleo de uma bobina). Esta configuração é mostrada na figura 3.1.

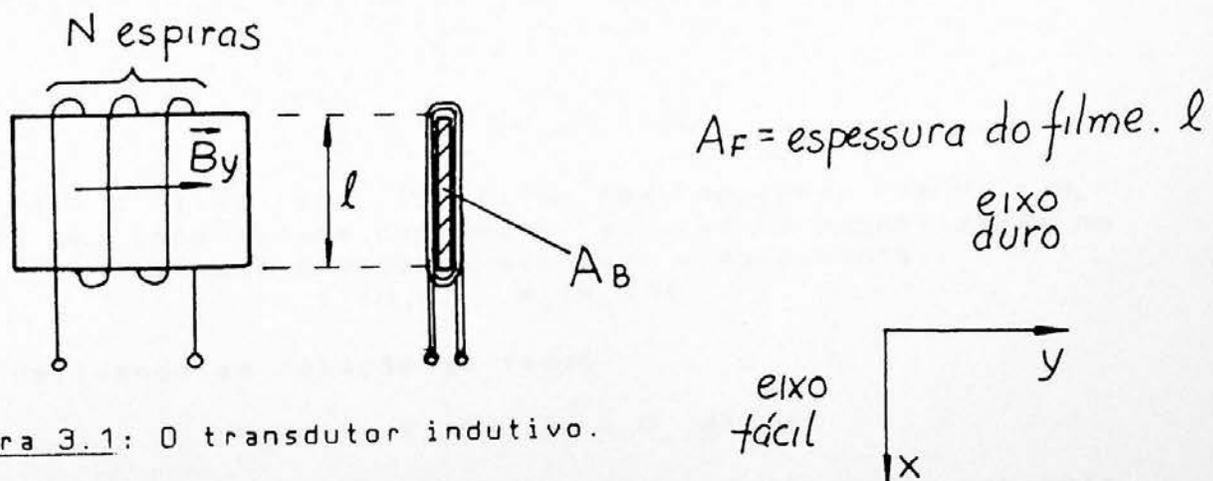


Figura 3.1: O transdutor indutivo.

Como vimos anteriormente, se aplicamos um campo na direção fácil (eixo x), haverá uma mudança na permeabilidade do núcleo na direção dura (eixo y), conforme a figura 2.7.b. Medindo, através da bobina, a indutância do conjunto, teremos uma dependência desta com o campo aplicado na direção fácil.

Para possibilitar a extração do sinal do sensor, um pequeno campo (produzido pela própria bobina) excita o núcleo alternadamente. O núcleo induz, então, na bobina um sinal, que é função do campo ambiente a ser medido. A excitação é feita na direção dura e o sinal obtido será uma voltagem alternada, cuja amplitude é função da componente H_x do campo ambiente.

Vamos determinar os parâmetros envolvidos na geração do sinal de saída (ϵ) do sensor indutivo:

Pela Lei de indução de Faraday:

$$\epsilon = -d\theta/dt \quad \text{e} \quad \theta = \int_{A_b} B_y dA \quad (\text{fluxo magnético})$$

Considerando que a área da seção transversal da bobina (A_b) seja constante e tomando o valor eficaz médio de B ao longo de toda a bobina:

$$\theta = \int_{A_b} B_y dA \approx B_y A_b$$

$$\epsilon = -A_b \cdot dB_y/dt$$

como $B_y = H_y + M_y$

$$\epsilon = -A_b \cdot dH_y/dt - A_f \cdot dM_y/dt \quad 3.1$$

Onde: A_b = área da seção transversal da bobina
 A_f = área da seção transversal do filme.

Definindo a susceptibilidade no eixo duro:

$$X_y(H_x) = dM_y(H_x)/dH_x$$

Para o filme ideal (ou filme real operando com $H_y \ll H_x$) campos de intensidade pequena), a curva de magnetização no eixo duro é linear e podemos escrever simplesmente:

$$X_y(H_x) = M_y(H_x)/H_y$$

Derivando em relação ao tempo:

$$dM_y/dt = X_y \cdot dH_y/dt + H_y \cdot dX_y/dt$$

Se H_x é a componente no eixo fácil de um campo ambiente estático, então:

$$dM_y/dt = X_y \cdot dH_y/dt$$

Substituindo em 3.1:

$$\epsilon = -A_r \cdot dH_x/dt - A_r \cdot (X_y \cdot dH_x/dt) \quad 3.2$$

O primeiro termo de 3.2 refere-se ao sinal induzido, mesmo com a bobina sem núcleo e o segundo, é a contribuição da magnetização dos filmes.

A sensibilidade do sensor pode ser obtida por:

$$d\epsilon/dH_x = -A_r \cdot dH_x/dt \cdot dX_y/dH_x$$

A máxima sensibilidade ocorre para pequenos campos aplicados na direção fácil ($H_x \approx 0$), nesta situação:

$$(d\epsilon/dH_x)_{max} = -A_r \cdot X_{ymax} \cdot dH_x/dt$$

$$(d\epsilon/dH_x)_{max} = -A_r \cdot M_s/H_k \cdot dH_x/dt \quad 3.3$$

A relação 3.3 indica os principais parâmetros, cuja escolha adequada de valores, permite maximizar a sensibilidade do nosso sensor. Faremos, a seguir algumas considerações sobre estes parâmetros:

3.3 PARÂMETROS DO FILME

a) M_s - Magnetização de saturação

Quanto maior é a magnetização de saturação do material, maior será o sinal induzido. No material magnético, a magnetização de saturação depende essencialmente dos íons magnéticos que o compõe: $M_s = \sum N_i \mu_i$; onde N_i é o número de íons da espécie i , cujo momento magnético é μ_i . Por motivos que ficarão claros mais adiante, os filmes utilizados neste trabalho são filmes de Fe-Ni, com composição próxima à composição de magnetostricção nula ($Fe_{10}Ni_{90}$). Por isso, a magnetização de saturação será sempre próxima a $M_s \approx 10000G$.

b) H_k - Campo de anisotropia

A anisotropia do filme é necessária para definir as direções de magnetização fácil e dura, e determinar o tipo de comportamento descrito anteriormente. Entretanto, do ponto de vista da sensibilidade em relação a H_x , deve-se procurar o menor H_k compatível com a necessidade de orientar o filme.

c) A_r - Secção transversal do filme

A sensibilidade do sensor é proporcional à área da secção transversal do filme (espessura do filme, mantendo as outras dimensões constantes). A espessura ideal de utilização será definida pela minimização de ruído gerado por domínios formados fora do alinhamento uniaxial predominante. Em filmes muito espessos pode haver a nucleação de domínios orientados em direcções diferentes daquelas que determinam o plano do filme. O filme espesso passa a ter um comportamento mais semelhante ao do material em bloco e movimentos de paredes de domínios serão mais frequentes durante o processo de magnetização.

O mecanismo de geração de ruído é bastante complexo. Dependendo da espessura do filme, poderemos ter diferentes tipos de paredes de domínios: Néel (até 400Å), Bloch (acima de 1000Å) e nas espessuras intermediárias um tipo especial de paredes semelhante a uma espinha de peixe [3.1].

Uma situação de compromisso entre a maximização da sensibilidade e a produção de ruído (maximização da relação sinal/ruído) é obtida para filmes cuja espessura situa-se em torno de 1000Å, segundo estudos realizados pelos primeiros pesquisadores que se empenharam no desenvolvimento dos magnetômetros de filmes finos.

d) dH/dt - Velocidade de magnetização

O termo dH/dt indica que a sensibilidade será proporcional à frequência do campo de excitação aplicado ao sensor. Não podemos aumentar ilimitadamente a frequência de operação do sensor, porque os mecanismos de magnetização têm tempos característicos limitados e o aumento de frequência aumenta as perdas no filme (ação de correntes parasitas induzidas).

O movimento de paredes de domínios é bastante lento (processo viscoso), em relação à rotação de domínios, apresentando tempos de reversão de magnetização da ordem de μs . A frequência de operação de um dispositivo operando nestas condições está limitada à centenas de kHz. Para o mecanismo de rotação, os tempos típicos são muito menores, podendo chegar a ns.

Um ponto interessante de operação para dispositivos que possuem bobinas, cujo núcleo é composto por um material magnético, ocorre quando o fator de qualidade Q^* do conjunto filme+enrolamento é maximizado. Nesta situação, há a máxima transferência de energia (eficiência do sensor) entre o núcleo (filme) e o enrolamento. Na figura 3.2 temos o comportamento deste fator em função da frequência de operação. Quanto maior é a frequência, maiores são as perdas devido às correntes induzidas: fator Q_r diminui para o filme (segundo uma característica $1/f$ frequência) [3.2].

Para o enrolamento as perdas praticamente são constantes com a frequência, pois a resistência elétrica do fio é constante. A energia reativa aumenta com a frequência, logo o fator Q_v aumenta para o enrolamento. O ponto de operação, para filmes e bobinas de apenas uma camada de espiras, onde há a compatibilização, está situado na faixa de rádio-frequência compreendida entre 10 e 20MHz.

* O fator de qualidade Q é a relação entre a energia reativa - E_r (energia acumulada reversível) e a energia dissipada por processos irreversíveis - E_d :

Para o enrolamento: $Q_v = E_r / E_d$

$E_d = R \cdot I^2 \cdot t$ e $E_r = 2\pi \cdot L \cdot f \cdot I^2 \cdot t$

$\Rightarrow Q_v = 2\pi \cdot f \cdot L / R$

(expressão para frequência de operação baixa, onde o efeito capacitivo do enrolamento é desprezado).

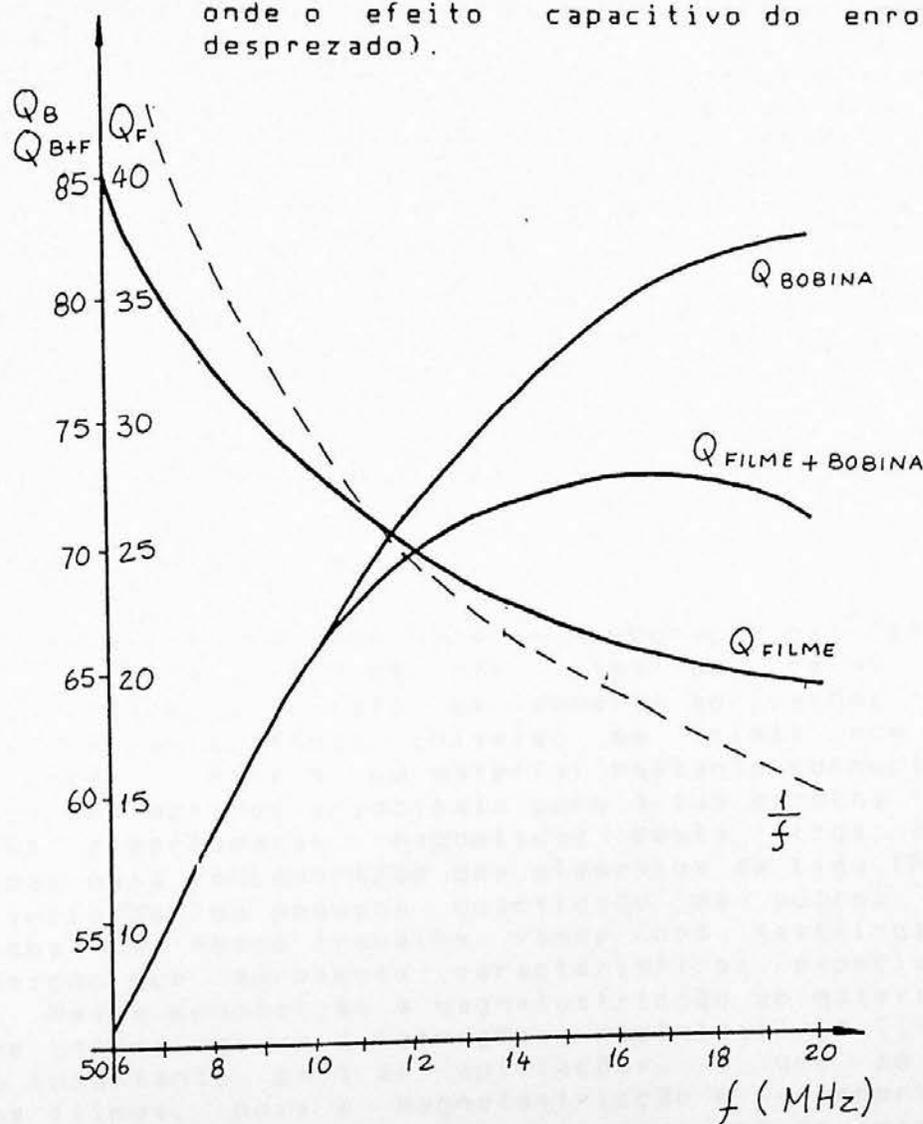


Figura 3.2: Fator Q do filme e do enrolamento em função da frequência de operação [3.2].

CAPITULO 4

ESTUDO PRELIMINAR PARA A OBTENÇÃO DO FILME FINO

4.1 INTRODUÇÃO

Os intensos estudos realizados durante a época em que se dava grande ênfase na aplicação de filmes magnéticos à memórias de computadores, fornecem muitas informações úteis à obtenção destes filmes. Vamos procurar listar algumas destas informações, o que dará um caráter nitidamente bibliográfico a este capítulo.

O filme fino pode ser obtido por vários processos, por exemplo: evaporação em alto-vácuo, sputtering, deposição explosiva ("flash-evaporation"), eletrodeposição. Optamos pela evaporação em alto-vácuo, pois é um dos processos mais conhecidos e utilizados, além de ser simples e de possível implementação no nosso laboratório.

Vamos, agora, analisar (de maneira sucinta) as principais causas, que determinam as características magnéticas dos filmes:

- Composição química;
- Condições de evaporação.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O material adotado para a elaboração dos filmes foi o permalloy. Trata-se de uma liga de Fe-Ni de alta permeabilidade, utilizada em inúmeras aplicações. Permite a indução da anisotropia uniaxial em filmes com relativa facilidade. Este é um material bastante conhecido, sendo este um dos motivos principais para a sua escolha.

As propriedades magnéticas desta liga são muito afetadas pela concentração dos elementos da liga (Fe e Ni) e pela inclusão de pequena quantidade de outros elementos químicos. Em nosso trabalho vamos nos restringir a uma composição que apresenta características especiais: Fe₈₀Ni₂₀. Nesta composição a magnetostricção do material é nula (filme insensível à deformações mecânicas) [4.1]. Isto é muito importante para as aplicações, a que se destinam nossos filmes, pois a magnetostricção é a propriedade que relaciona as deformações dimensionais com as propriedades magnéticas do material. Esforços mecânicos, atuando sobre filme magnetostrictivos, podem destruir as suas características magnéticas desejáveis. A aplicação de

tensões mecânicas provoca a sobreposição de anisotropias indesejáveis à anisotropia uniaxial do filme. Filmes muito magnetostrictivos não apresentam curvas de magnetização bem definidas, exibindo a indesejável histerese na curva do eixo duro.

Tensões mecânicas elevadas podem estar presentes no filme. Estas tensões surgem durante a construção mecânica do sensor, no processo de crescimento do filme e principalmente devido a coeficientes de dilatação térmica diferentes para o filme e para o substrato. Essa diferença entre os coeficientes de dilatação é importante, pois o filme é depositado sobre um substrato que geralmente está numa elevada temperatura. O sensor pode, também, sofrer mudanças de temperatura durante sua operação, o que prejudicaria seu desempenho, caso utilizássemos filmes magnetostrictivos.

Uma das grandes motivações para o emprego desta liga na produção de filmes é a possibilidade de evaporar o filme diretamente da liga. Isto acontece pois o Fe e o Ni apresentam taxas de evaporação semelhantes, podendo ser evaporados a partir de um único cadinho. Experimentalmente observa-se que há uma pequena diferença entre a composição química do vapor (aproximadamente igual à composição do filme depositado) e a composição da liga presente no cadinho. Os filmes são ligeiramente mais ricos em Fe em relação ao cadinho, pois a volatilidade deste elemento é ligeiramente maior que a do Ni (na temperatura de operação do cadinho). Para entender o processo envolvido fazemos algumas considerações sobre evaporação de ligas no apêndice A.4.1. Para conseguirmos o filme com reduzida magnetostrictão, devemos aumentar a porcentagem de Ni no cadinho. A composição de partida é obtida empiricamente, pois depende das características particulares do equipamento em que o filme é produzido (distribuição de temperaturas no cadinho, geometria da evaporadora).

Muita atenção deve ser dada à composição química do filme pois este é um dos fatores fundamentais na obtenção de filmes com boas características para magnetometria.

Filmes com composição diferente da composição de magnetostrictão nula apresentam um outro inconveniente: um aumento da dispersão de domínios (figura 4.1). Apesar da anisotropia de cada domínio ser uniaxial, há uma distribuição angular de domínios em torno de uma direção predominante, conhecida como dispersão angular (α). Esta dispersão está intimamente relacionada com a magnetostrictão: dispersão mais intensa ocorre em filmes mais magnetostrictivos. Num dispositivo que utiliza filmes que apresentam grande dispersão de domínios, há uma maior probabilidade de ocorrência de movimento de paredes de domínios e este é um dispositivo ruidoso.

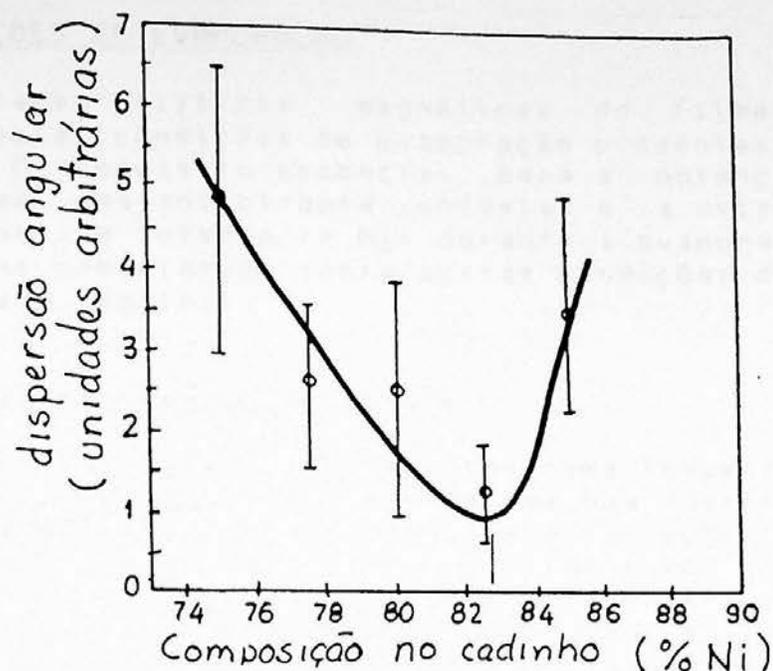


Figura 4.1: Dispersão angular como função da composição da liga no cadinho [4.2].

Quando a evaporação é feita a partir da liga, num único cadinho, as diferentes propriedades do Fe e do Ni, exigem alguns cuidados. Como vimos anteriormente, a composição da liga no cadinho deve ser ligeiramente mais rica em Ni, para que o filme não fique com excesso de Fe. A medida que a evaporação é feita, o teor de Ni no cadinho aumenta, pois a taxa de evaporação do Fe é maior que a do Ni. Este fenômeno provoca a criação de um gradiente de composição no filme depositado (o teor de Fe no filme diminui, a medida que a espessura aumenta).

Uma maneira possível para minimizar o desvio da composição química, consiste em utilizar uma fonte em que seja pequena a relação: massa evaporada para produzir o filme / massa inicial da carga do cadinho. A grande quantidade de material no cadinho garante a manutenção de uma composição razoavelmente constante durante a evaporação.

4.3 CONDIÇÕES DE EVAPORAÇÃO

As características magnéticas do filme são muito afetadas pelas condições de evaporação presentes durante sua obtenção. O requisito essencial para a obtenção de filmes que possuam uma anisotropia uniaxial é a existência de um campo magnético intenso ($> H_K$) durante a evaporação.

Alguns comentários sobre outras condições de evaporação são feitos a seguir::

a) Temperatura do substrato:

O substrato deve ser mantido numa temperatura elevada durante a deposição. Isto permite uma boa aderência do filme no substrato e principalmente fornece condições de controlar as características magnéticas do filme como, por exemplo, o valor de H_K . A dinâmica de nucleação e crescimento do filme está intimamente ligada a temperatura do substrato durante a deposição. Na figura 4.2, temos um exemplo para ilustrar esta dependência. São mostrados resultados obtidos com processos de obtenção semelhantes aqueles por nós adotados. Verificamos que quanto maior a temperatura do substrato, menor será a energia de anisotropia. A temperatura máxima do substrato é limitada pelas restrições técnicas do material de que é composto ($\approx 450^\circ\text{C}$).

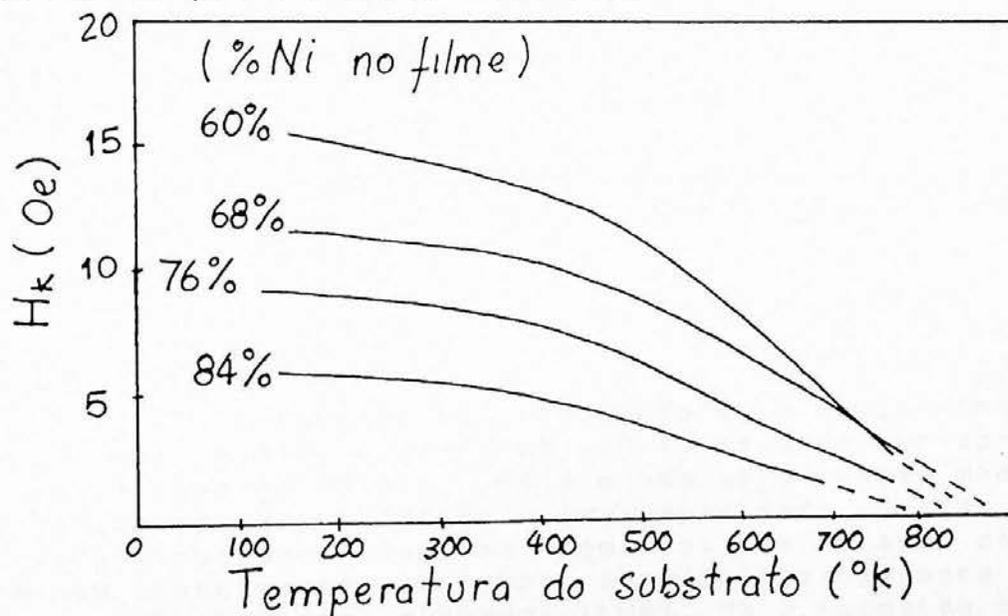


Figura 4.2: Campo de anisotropia em função da temperatura do substrato [4.3].

b) Rugosidade superficial:

O estado da superfície do substrato afeta a estrutura do filme. Se o filme é depositado sobre uma superfície muito rugosa, são criados polos magnéticos. Estes polos originam campos desmagnetizantes intensos, que alterarão localmente as propriedades magnéticas do filme. A distribuição de tensões mecânicas, também não será uniforme e haverá um aumento da dispersão angular num filme magnetostrictivo.

O substrato mais utilizado normalmente é de vidro polido a fogo, por apresentar uma superfície bastante regular. Uma solução prática e barata é a utilização de "cover glass" para laminulas de microscópio.

c) Tratamento térmico:

A principal contribuição para a anisotropia uniaxial do filme ocorre durante o processo de evaporação (alinhamento de imperfeições e nucleação de domínios em torno destas). Um resfriamento rápido pode destruir esta anisotropia, devido as grandes tensões a que fica submetido o filme. Mantendo o filme durante algum tempo na temperatura de evaporação, para que sua estrutura possa se estabilizar, temos uma maior definição na orientação dos domínios. Os processos envolvidos nesta etapa são bastante complexos e ainda não explicados totalmente. Cuidados especiais devem ser tomados com o resfriamento do filme até a temperatura ambiente. Deve ser feito lentamente, para que a estrutura do filme se acomode gradualmente.

Outro fator que determina as propriedades do filme, principalmente quanto a geração de ruído, é ligado a geometria do depósito:

4.4 EFEITO DE BORDA

O corpo elipsóide de revolução é o único, no qual o campo magnetizante é uniforme. O filme pode ser aproximado por um elipsóide oblato. Esta é uma aproximação média, mas não se aplica às bordas do filme depositado. Nestas regiões de descontinuidade, onde os domínios do plano do filme terminam bruscamente, o campo desmagnetizante pode assumir valores extremamente elevados (kOe). Há a formação de polos que induzem a nucleação de novos domínios, chamados de domínios de fechamento (figura 4.3). A distribuição destes domínios é feita de maneira a minimizar a energia magnetostática total da amostra.

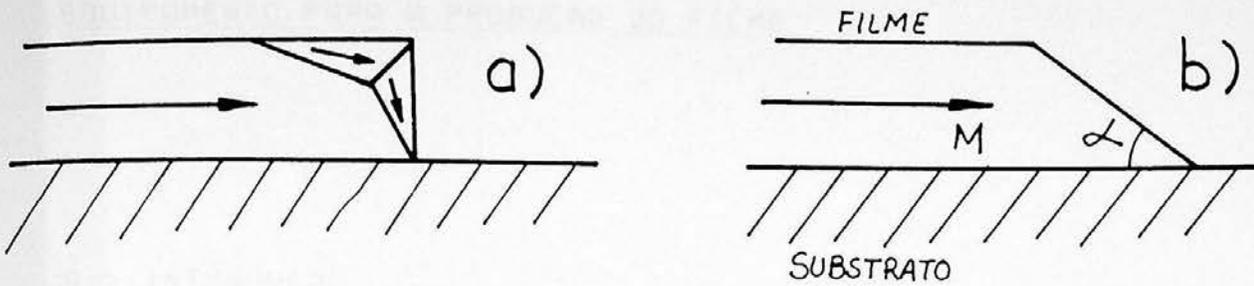


Figura 4.3: Domínios de fechamento: a) Borda a 90°; b) Borda inclinada.

Os domínios de fechamento são uma das principais fontes de ruído no filme. Aparecem também em torno de defeitos (porosidades). Para minimizar o efeito desses domínios fazemos com que as bordas do filme tenham uma suave inclinação. Isto pode ser obtido com a utilização de uma máscara de evaporação separada dos substratos por alguns milímetros.

O ângulo de inclinação das bordas que permite otimizar a relação sinal/ruído está situado em torno de 0.03° [4.4] (figura 4.4).

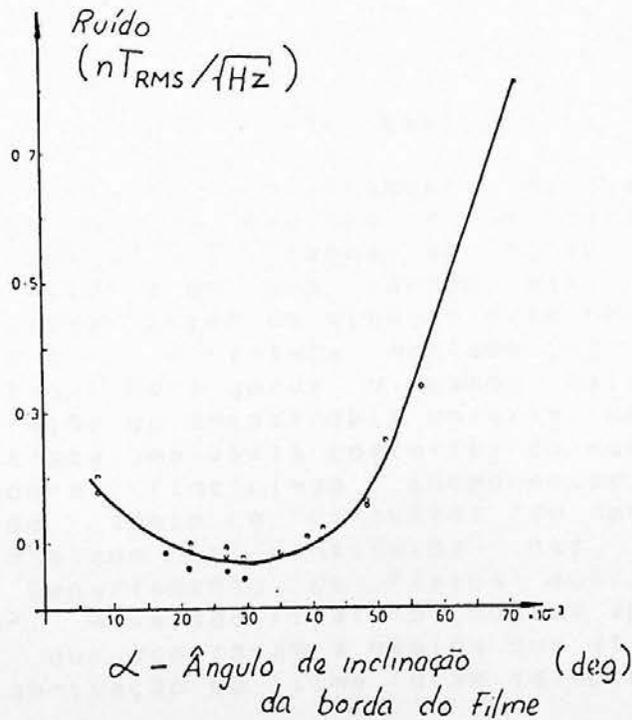


Figura 4.4: Ruído gerado pelos domínios de fechamento em função do ângulo de inclinação da borda do filme [4.4].

CAPÍTULO 5

EQUIPAMENTO PARA A PRODUÇÃO DO FILME

5.1 INTRODUÇÃO

A liga utilizada necessita uma elevada temperatura ($\approx 1700^{\circ}\text{C}$) para ser evaporada, apresentando um alto poder corrosivo que deteriora os componentes da evaporadora. Fizemos alguns testes com evaporadoras comerciais, inclusive numa evaporadora equipada com canhão de elétrons. Devido às dificuldades técnicas e problemas com a disponibilidade para utilização destes equipamentos, optamos pelo projeto e construção de uma evaporadora específica para a produção de filmes de Permalloy. As diretrizes básicas adotadas no projeto da evaporadora foram a especificidade (produção de filmes de "permalloy"), simplicidade e a disponibilidade de componentes que permitisse sua construção no laboratório.

Neste capítulo, descreveremos de uma maneira geral o equipamento construído, fazendo alguns comentários sobre as soluções adotadas para alguns problemas específicos.

5.2 A EVAPORADORA

Um aspecto geral do conjunto mecânico da evaporadora é mostrada na figura 5.1.

A evaporadora consiste basicamente de uma câmara de alto-vácuo dotada de um cadinho e um porta-substratos aquecido. Na figura 5.2 temos um corte longitudinal simplificado da máquina em sua versão mais recente. Na figura 5.3, uma visualização do aspecto externo da câmara de vácuo; na figura 5.4, o sistema montado com a bobina de Helmholtz, utilizada para gerar o campo estático ($\approx 30\text{G}$) necessário a criação da anisotropia uniaxial do filme; e na figura 5.5 é mostrada uma vista posterior do equipamento.

A evaporadora (incluindo componentes mecânicos, instrumentação de apoio e circuitos de potência) foi inteiramente projetada e construída nas oficinas e laboratórios do Departamento de Física dos materiais e Mecânica do IFUSP. A versão final foi obtida após uma série de modificações que ocorreram a medida que as dificuldades do processo de fabricação do filme foram se apresentando.

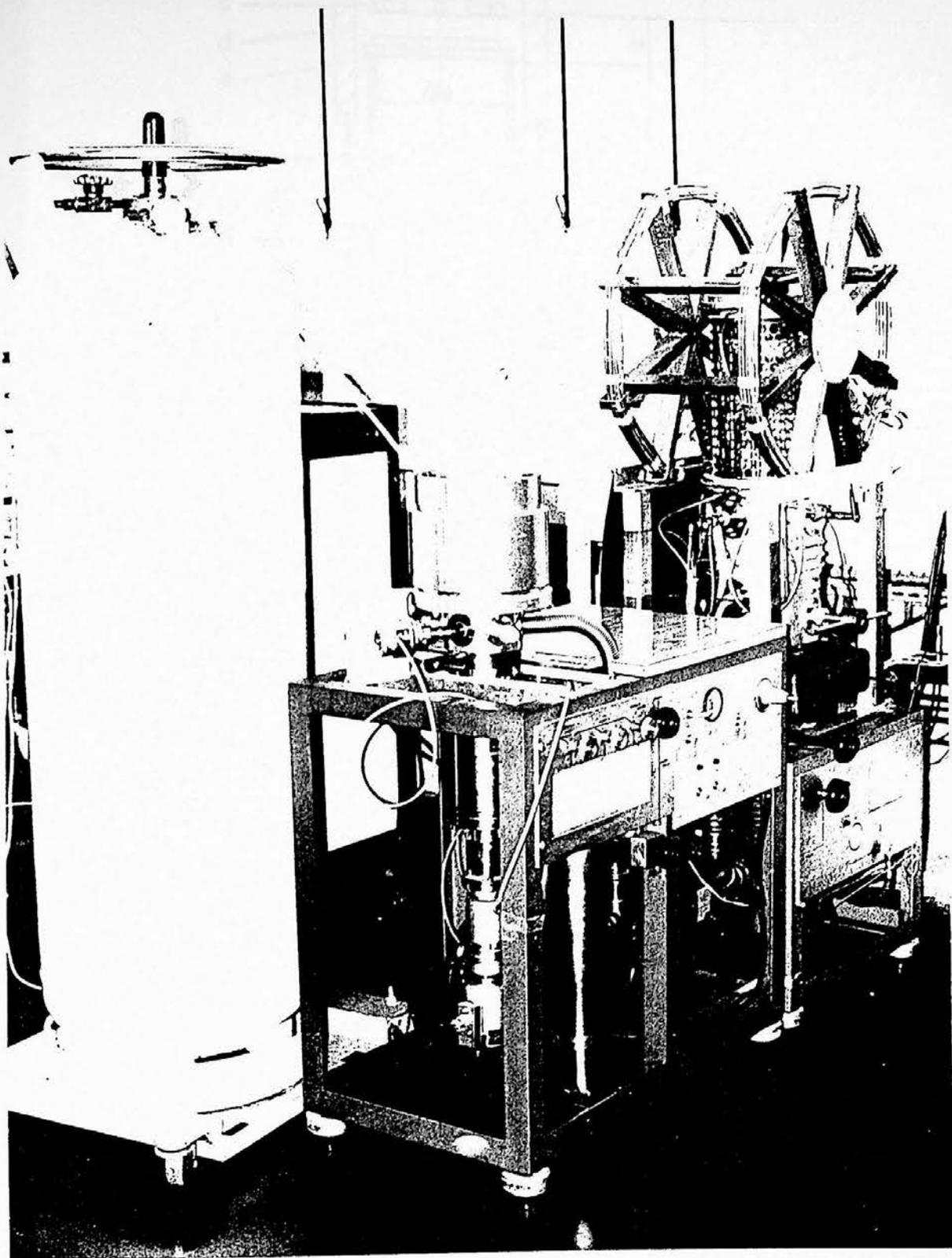


Figura 5.1: Evaporadora para produção de filmes de permalloy.

No corte longitudinal da evaporadora, podemos identificar uma série de componentes:

- a) Conector interligado com as lâmpadas de aquecimento dos substratos e termopares de monitoração de temperatura do suporte dos substratos;
- b) Cinta de cobre com dutos para passagem de água de refrigeração do cabeçote;
- c) Aquecedor dos substratos, composto de 4 lâmpadas de projeção montadas num refletor (na montagem com suporte para 4 substratos, utilizamos apenas uma lâmpada);
- d) Anel de extensão do cabeçote;
- e) Suporte para os substratos, compreendendo: placa aquecedora, base e máscara;
- f) Feixe de material evaporado do cadinho;
- g) Cilindro de vidro de alta resistência;
- h) Transdutor piezoelétrico de espessura;
- i) Obturador do cadinho;
- j) Cadinho com a liga;
- k) Base da câmara;
- l) Passadores de potência refrigerados a água;
- m) Sensores de vácuo, interligados com a câmara na parte posterior;
- n) Blindagem térmica;
- o) Anteparo de alumínio;
- p) Cintas de refrigeração da base da câmara;
- q) Válvula borboleta de 7" de diâmetro;
- r) 1^o estágio da armadilha de vácuo, refrigerado a nitrogênio líquido;
- s) 2^o estágio da armadilha refrigerado a água;
- t) Bomba de difusão.

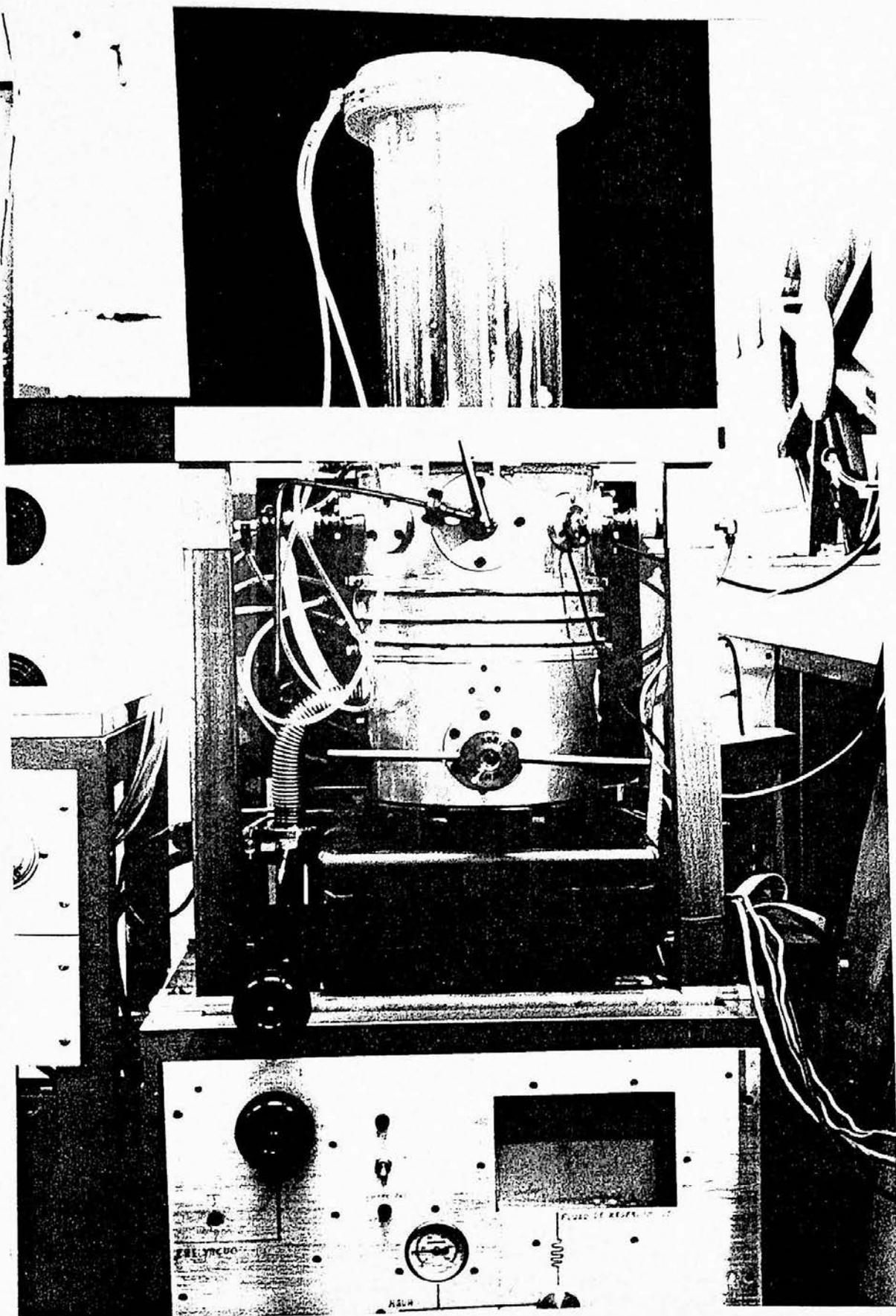


Figura 5.3: Aspecto externo da câmara de alto-vácuo

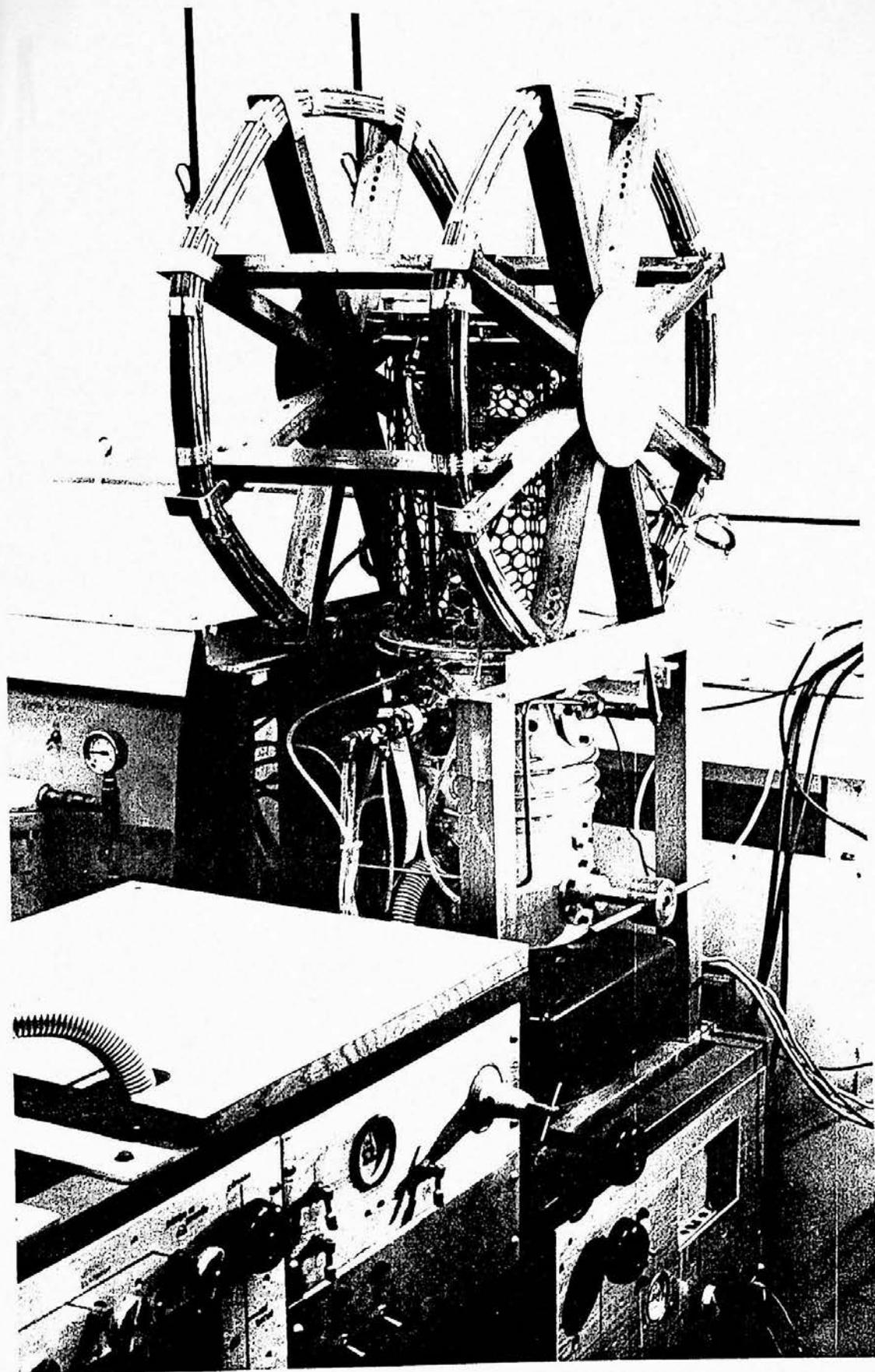


Figura 5.4: Evaporadora montada com a bobina de Helmholtz, responsável pela produção do campo magnético que induz a anisotropia magnética nos filmes.

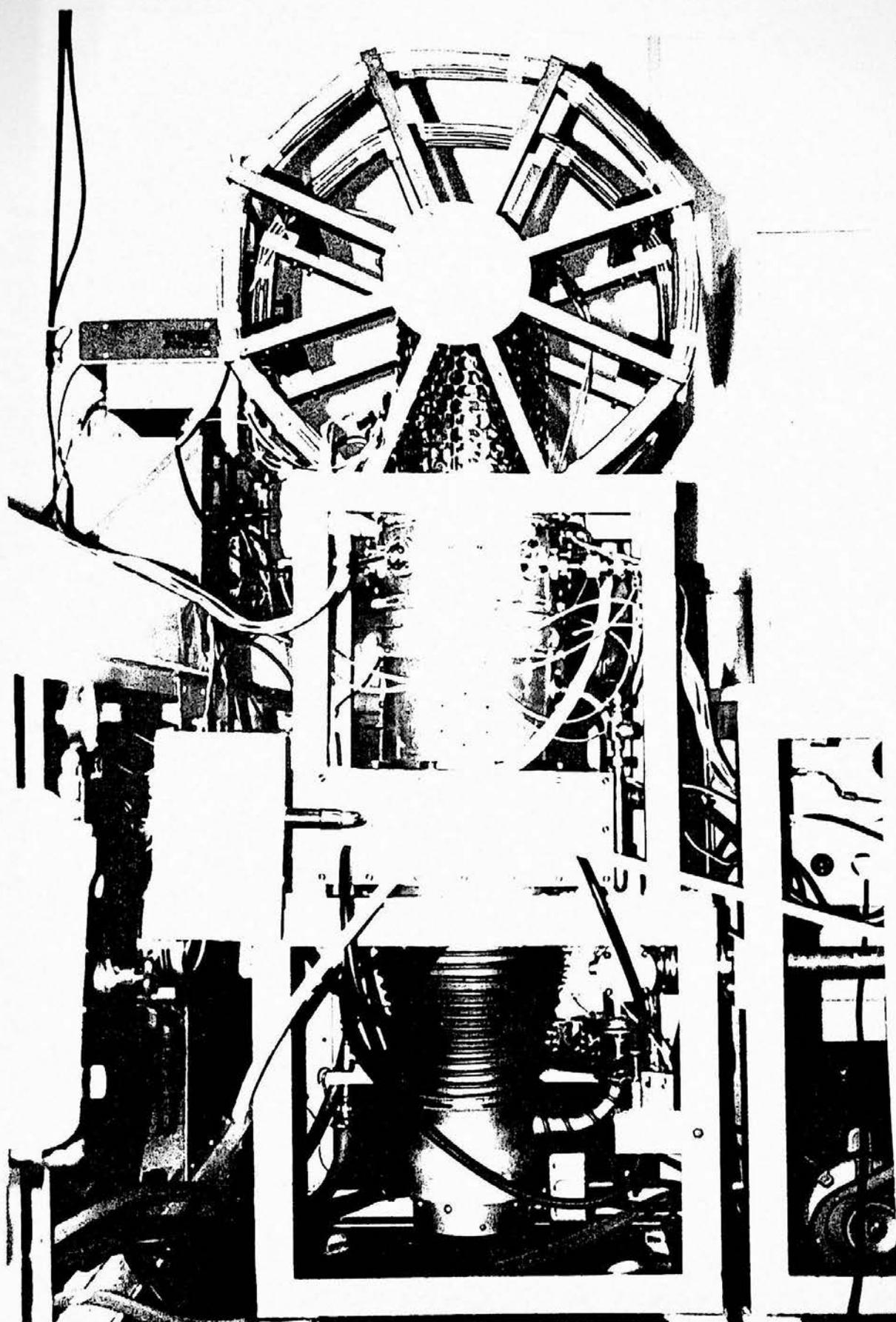


Figura 5.5: Vista posterior da evaporadora.

5.3 SISTEMA DE ALTO-VÁCUO

O sistema de bombeamento de alto-vácuo foi montado seguindo um esquema convencional (figura 5.6), composto basicamente de: armadilha fria, bomba de difusão e bomba mecânica. O aspecto externo da instalação de vácuo pode observado na figura 5.7. Algumas características dos componentes empregados são listadas abaixo:

- Bomba mecânica: Welch, modelo 1402 - 140 l/min;
- Bomba de difusão: CVC, modelo PVMS-100 - 2500 l/seg.

Esta bomba foi gentilmente cedida, por empréstimo, pelo Depto de Hidrologia do Centro de Energia Nuclear em Agricultura da USP (Piracicaba) e foi reparada nos laboratórios do DFMM do IFUSP.

- Armadilha fria: tipo "chevron" em dois estágios: o primeiro refrigerado a água, evita que o óleo da bomba de difusão contamine a câmara de alto-vácuo; o segundo, refrigerado com nitrogênio líquido, melhora o vácuo condensando moléculas mais pesadas (H_2O, O_2 , etc).

Este é um poderoso sistema de vácuo, com o qual é possível obter pressões de 10^{-2} mmHg num tempo relativamente curto (2 a 3h com o sistema limpo). Devido à dificuldade de obtenção, tivemos a necessidade de construir vários componentes nas oficinas do laboratório. Em especial, um destes componentes exigiu muito esforço para ser projetado e executado: a válvula que separa a câmara de evaporação do sistema de bombeamento (V_0). Trata-se de uma válvula borboleta de alto-vácuo e grandes dimensões ($\theta_{interna} = 7"$).

Na figura 5.6 podemos identificar alguns componentes dos sistemas que compõe a evaporadora:

- a) Câmara de evaporação;
- b) Bobinas para a produção de campos magnéticos;
- c) e d) Sensores de vácuo;
- e) Armadilha fria;
- f) Bomba de difusão;
- g) Bomba mecânica;
- h) Dewar para suprimento de nitrogênio líquido;
- i) Cilindro de suprimento de nitrogênio para pressurização da câmara de vácuo;
- j) Regulador de pressão;
- v) Válvulas diversas.

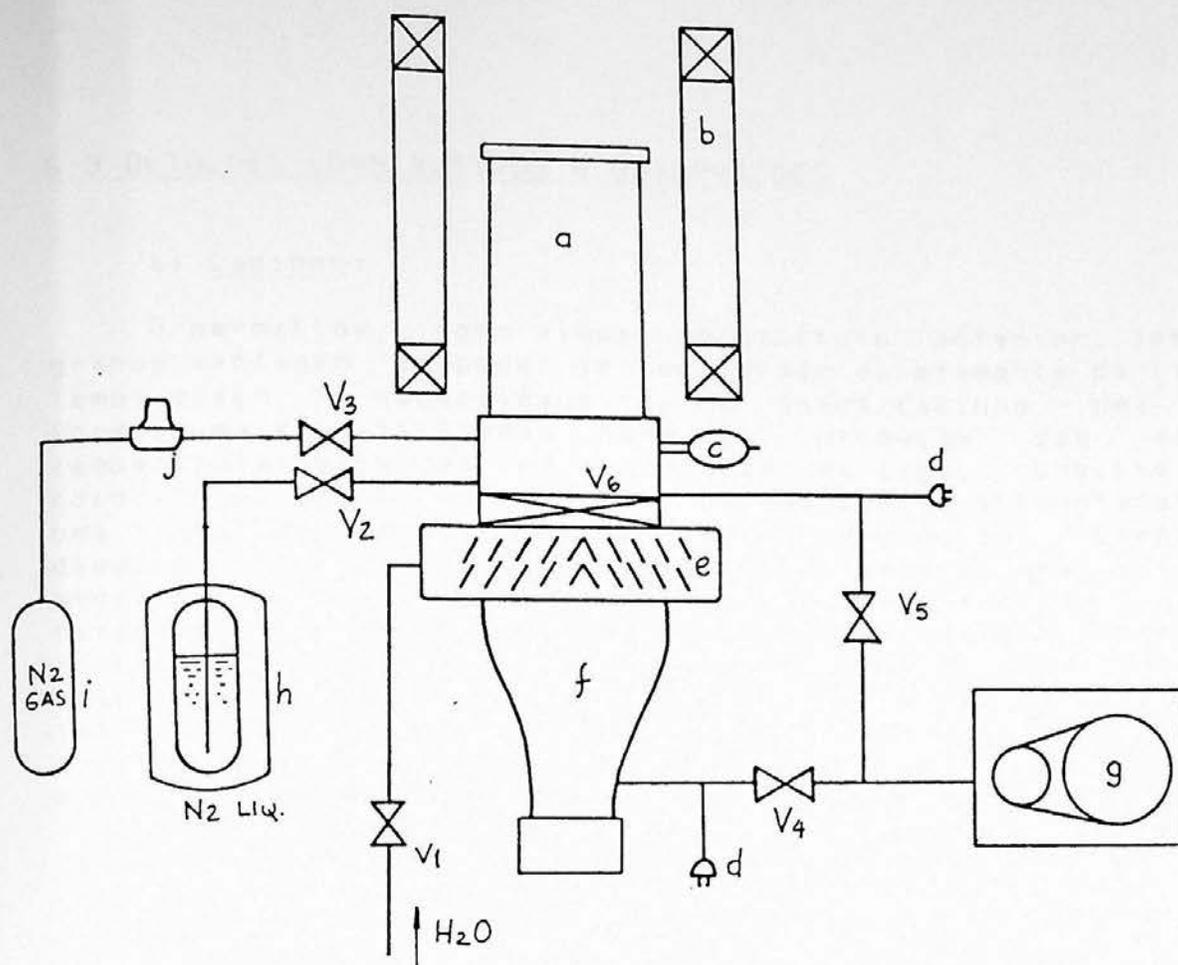


Figura 5.6: Esquema simplificado dos sistemas da evaporadora.

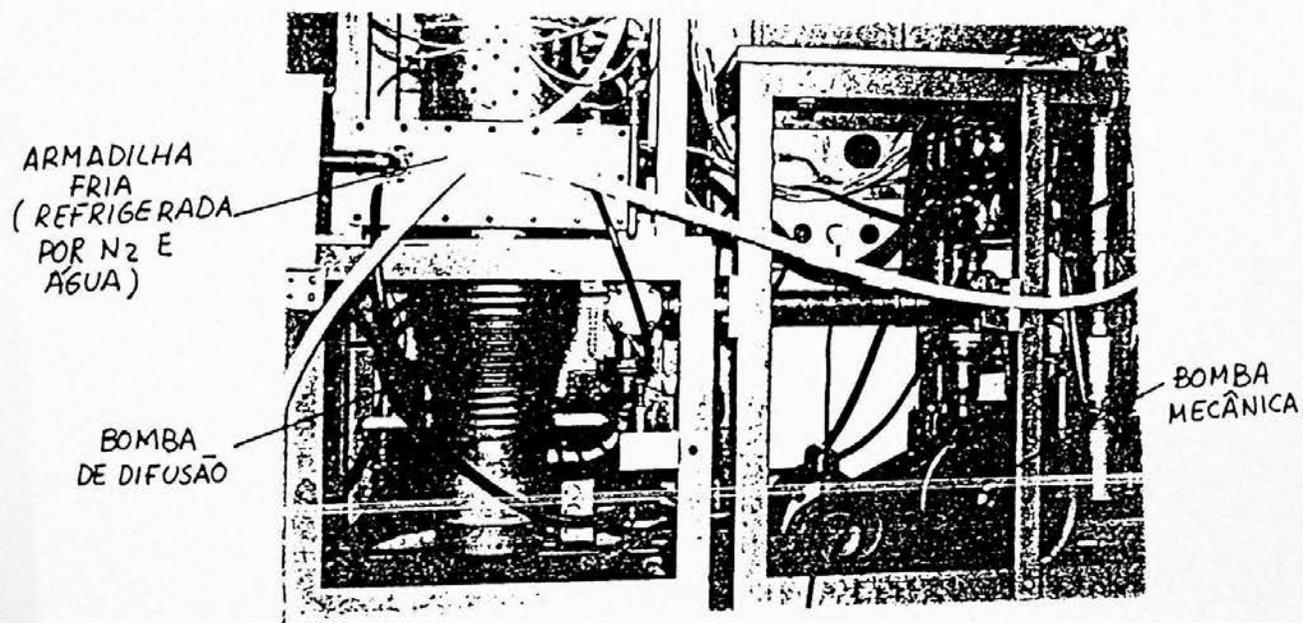


Figura 5.7: Aspecto externo da instalação de vácuo.

5.3 DETALHES CONSTRUTIVOS e OBSERVAÇÕES

a) Cadinho:

O permalloy, como vimos no capítulo anterior, tem a grande vantagem de poder ser evaporado diretamente da liga. Temos assim, a necessidade de um único cadinho. Uma das formas mais utilizadas para a produção das altas temperaturas exigidas na evaporação da liga, consiste em colocar o cadinho no interior de uma bobina alimentada por uma fonte de potência de RF (forno de indução). Como não dispúnhamos de uma fonte deste tipo, utilizamos uma solução ainda mais simples: um cadinho de alumina, aquecido por um filamento de tungstênio (resistivo). A fonte de alimentação do cadinho é composta por um transformador comercial de solda elétrica, com capacidade de fornecer 500A/10V. O transformador é ligado à rede elétrica através de dois controladores de potência (VARIAC), com capacidade de 2.5 kVA cada. Com esta configuração é possível obter a potência sobre o cadinho necessária para atingir temperaturas de até de $\approx 1800^{\circ}\text{C}$. Uma curva de calibração da temperatura do cadinho obtida através de um pirômetro ótico, e mostrada na figura 5.8. Observamos também, que há um grande gradiente de temperatura entre o centro e as bordas do cadinho (as bordas são mais frias).

A disposição do cadinho no interior da câmara de vácuo pode ser observada na figura 5.9.

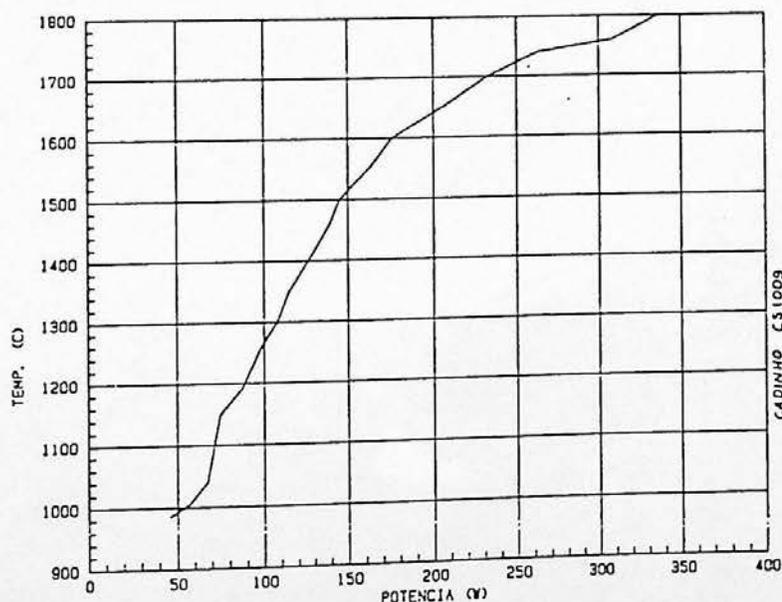


Figura 5.8: Temperatura no centro do cadinho em função da potência fornecida (temperatura medida com um pirômetro ótico).

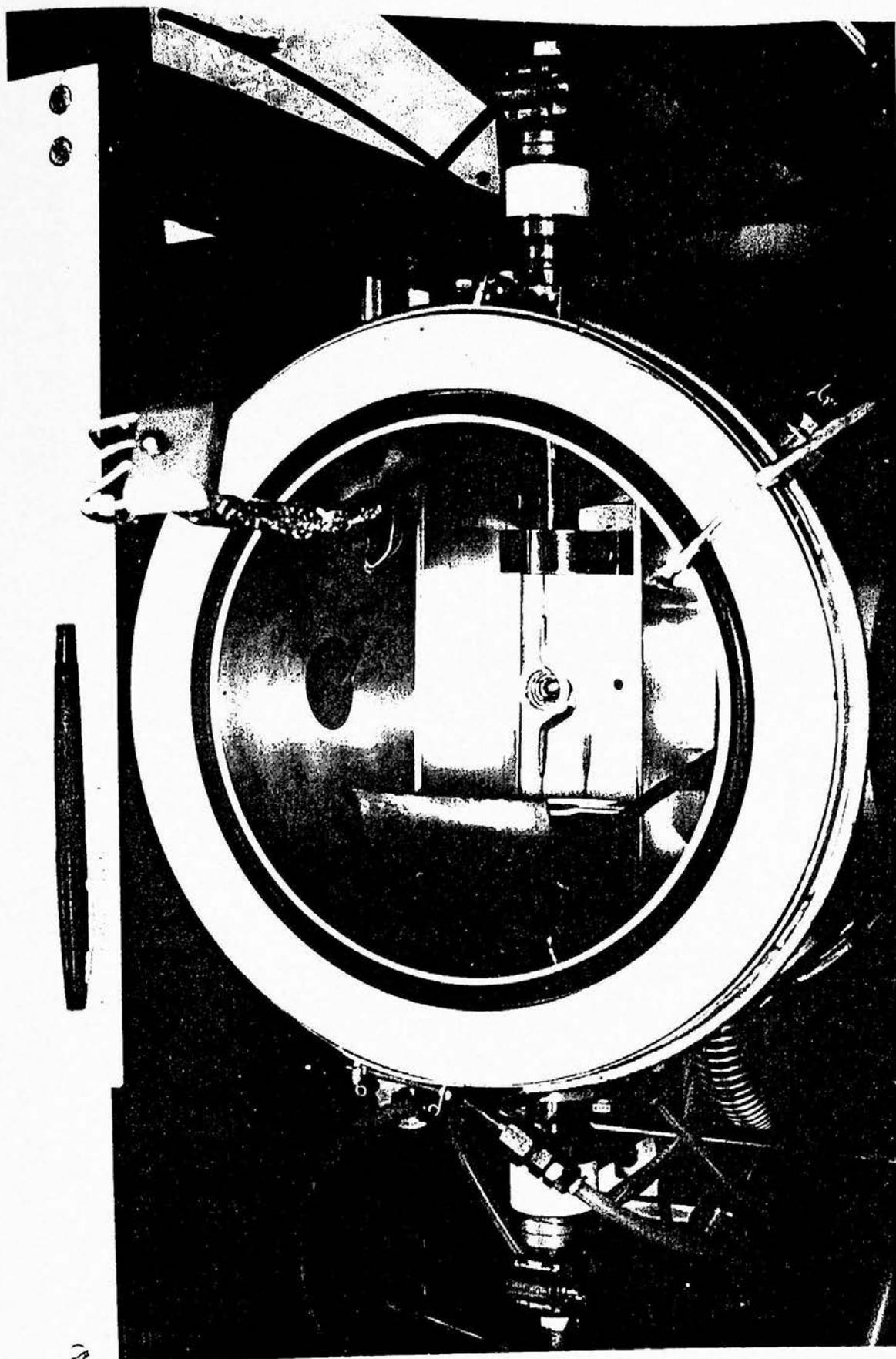


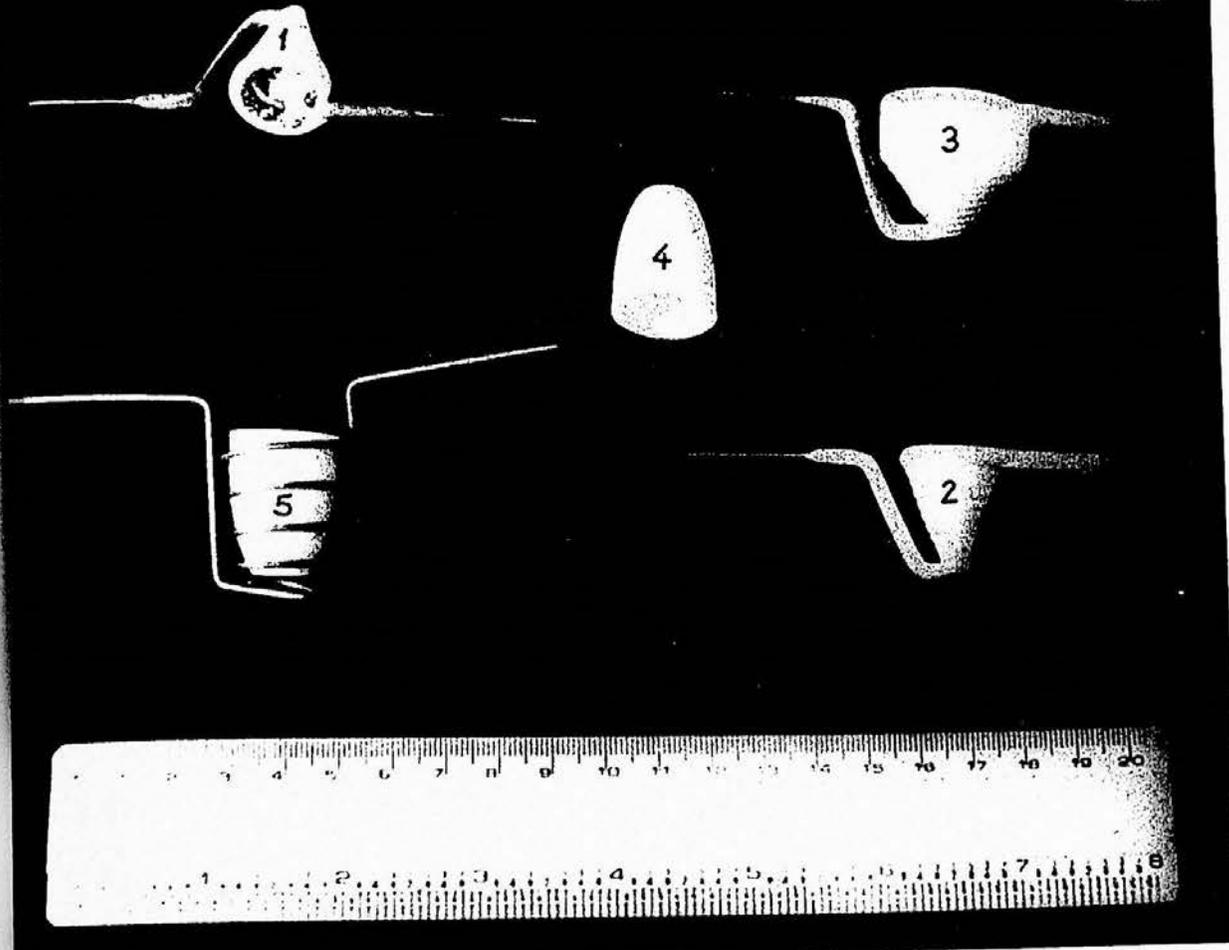
Figura 5.9: O cadinho no interior da câmara de vácuo.

Os passadores de potência (interface vacuo/meio ambiente) são refrigerados a água. O corpo da evaporadora e o cabeçote da câmara possuem também um circuito de refrigeração a água, pois estão expostos a intensa radiação luminosa (figura 5.10).



Figura 5.10: Passadores de potência para fornecimento de corrente para o cadinho.

Inicialmente foram utilizados cadinhos de alumina (Balzers - Ceramic crucible BD482099), aquecidos por um filamento de tungstênio (Balzers - w coil BD 482039), mostrados na figura 5.11. Estes filamentos podem ser alimentados com até 500A/5V. Os cadinhos, inicialmente utilizados, foram substituídos por modelos de maior eficiência, que não apresentam uma série de deficiências daqueles: corrosão do filamento de tungstênio, rompimento do cadinho por dilatações térmicas, necessidade de elevada potência de alimentação, vida útil curta. Nos novos cadinhos, (Sylvania CS1009 com capacidade de 0.8cm³ e CS1010 de 5cm³) o filamento é integrado no interior do próprio cadinho e a eficiência elétrica é bem melhor: consumo máximo de 50A/7V no CS1009 e 50A/16V no CS1010. Não conseguimos utilizar o cadinho de maior capacidade, pois a fonte de potência não fornece tensão suficiente.



1 - CS 1009 usado
 2 - CS 1009 novo
 3 - CS 1010

4 - CADINHO DE ALUMINA BD482099
 5 - FILAMENTO BD482039

Figura 5.11: - Cadinhos utilizados na evaporadora.

b) Monitoração da taxa de evaporação

Vários métodos de monitoração da espessura do filme durante a evaporação, são possíveis: medida da resistividade, interferência ótica, sensores piezoelétricos. O último método é um dos mais utilizados. A dificuldade de importação dos sensores e instrumentação anexa, nos levou ao desenvolvimento de um sistema com desempenho similar ao comercial e baixíssimo custo. Como sensor foi empregado um cristal de quartzo de uso comum em televisores (frequência de oscilação de 3.58MHz). Para construir o sensor de espessura, basta executar um pequeno furo de 01.2mm no encapsulamento do cristal (o encapsulamento deve ser totalmente metálico). Através do furo o cristal fica exposto ao feixe de material evaporado (figura 5.12).

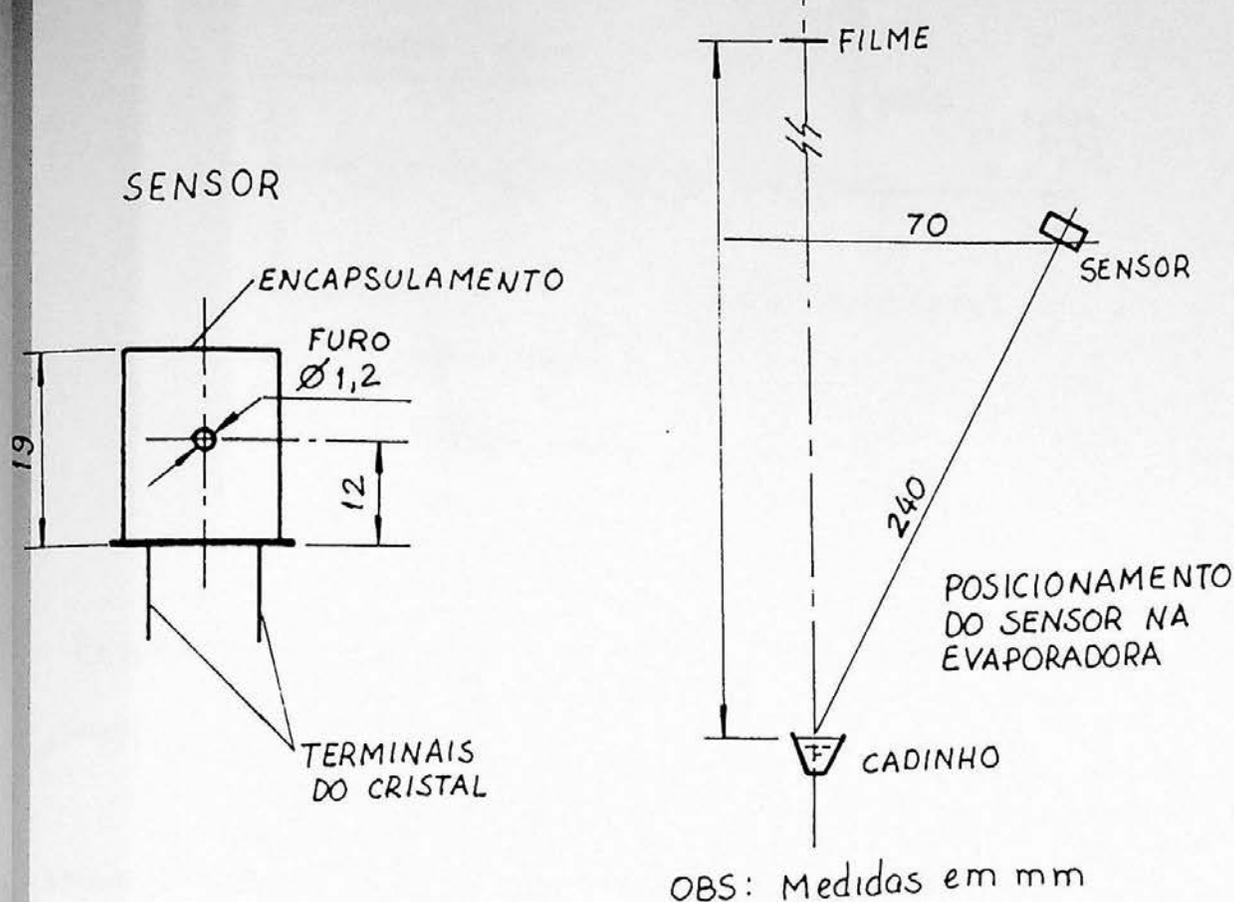


Figura 5.12: Sensor para medida da espessura do filme.

A mudança de massa, devido ao material depositado sobre o cristal, provoca uma diminuição na frequência de oscilação característica do cristal, que é proporcional a espessura do filme depositado. A monitoração da frequência de oscilação é feita por um freqüencímetro convencional acoplado a um oscilador de portas TTL (figura 5.13). Na figura 5.14 temos o desvio de frequência de um cristal em função de sua temperatura. Para evitar que a intensa radiação luminosa aqueça o cristal, implementamos um sistema de resfriamento a água, que envolve o invólucro do cristal. Este resfriamento mantém a temperatura do cristal constante, evitando desvios de frequência provocados pela mudança de temperatura. Com as características geométricas atuais, o sensor de espessura tem uma calibração de aproximadamente $3.54/\text{Hz}$. Aumentando o diâmetro do furo ou diminuindo a distância até o cadinho, a sensibilidade do dispositivo aumenta.

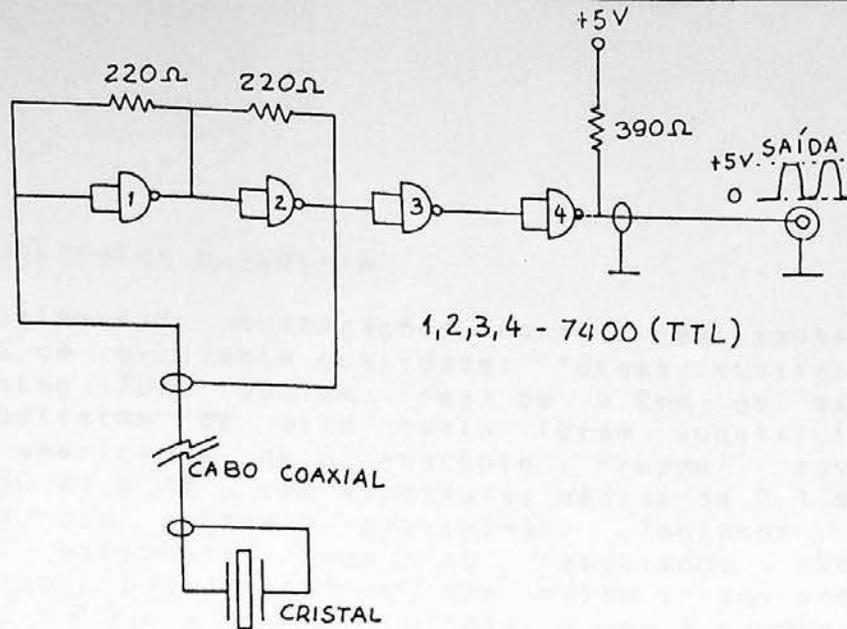


Figura 5.13: Oscilador para o cristal sensor.

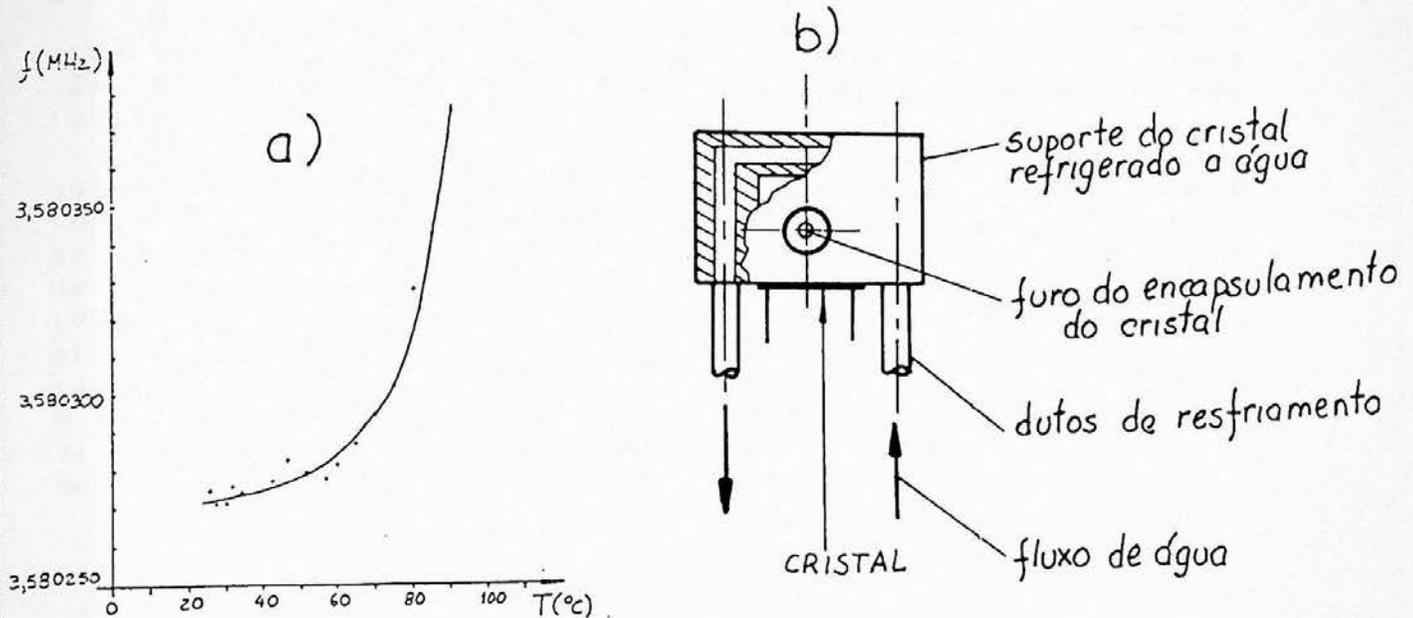


Figura 5.14: a) Desvio termico da frequência de oscilação; b) Sistema para manter a temperatura do cristal constante.

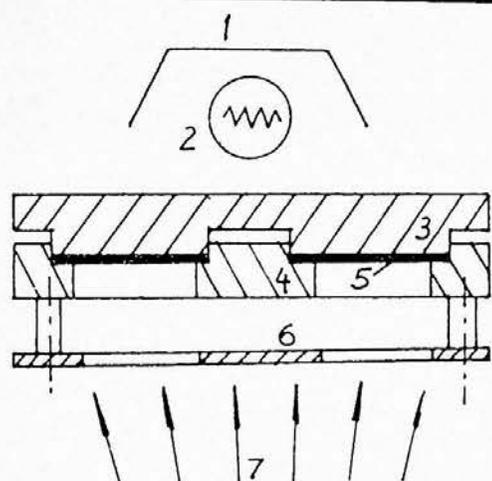
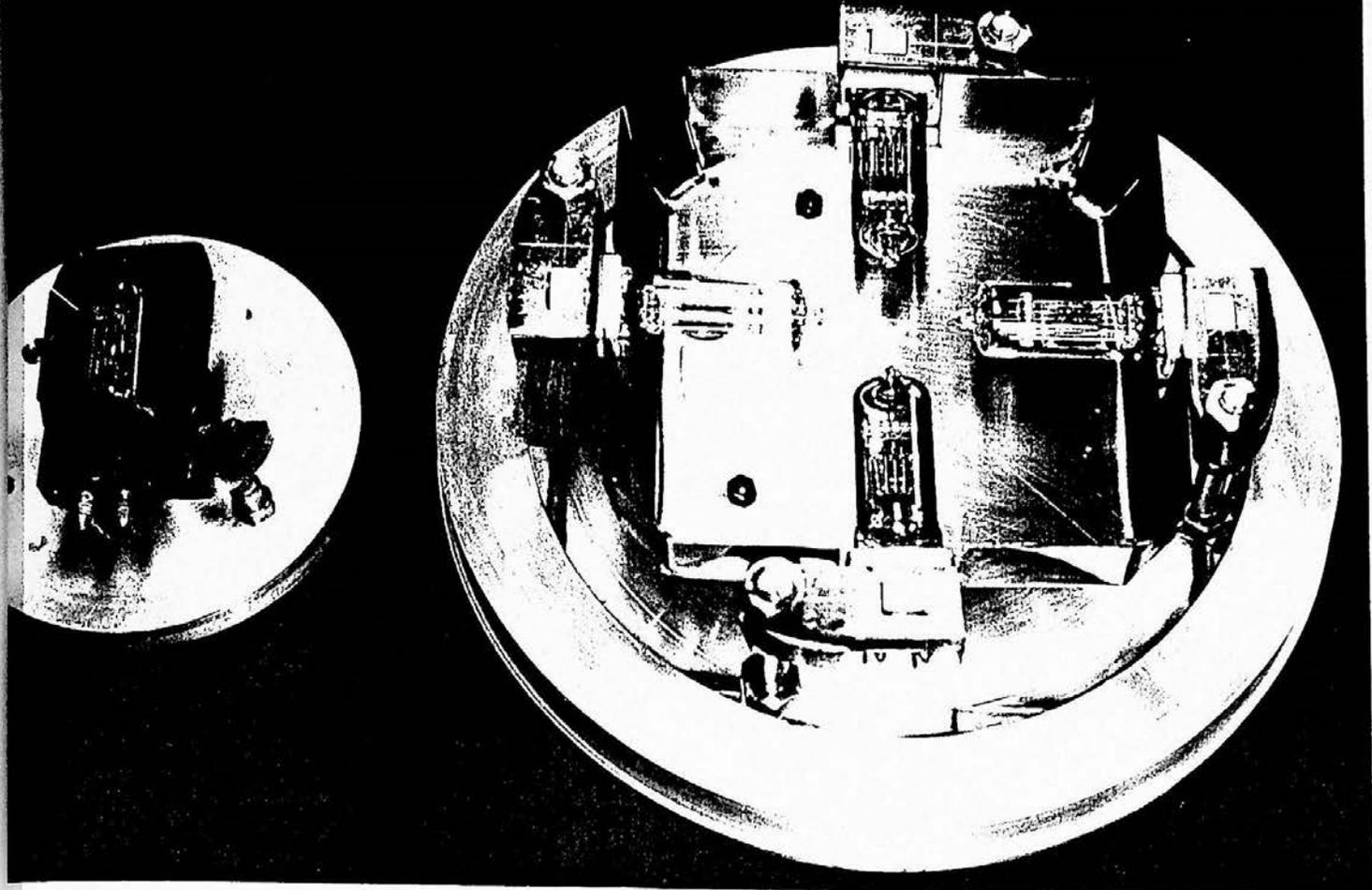
Ajustando a potência aplicada ao cadinho e monitorando a taxa de variação da frequência do oscilador, podemos controlar a taxa de evaporação. A espessura final do filme é determinada pela abertura e fechamento do obturador, colocado entre o cadinho e os substratos.

c) Substratos e suporte

As primeiras evaporações foram realizadas sobre substratos de excelente qualidade: "Glass substrates" de vidro Corning 7059 (Sodium free) de 0.2mm de espessura. Estes substratos de alto custo foram substituídos por lamínulas americanas de microscópio: Propper - cover glass 18 e 20 50 #1 e 1½, com espessuras médias de 0.1 e 0.15mm, fornecidos com limpeza preliminar. Tentamos utilizar lamínulas nacionais, mas os resultados não foram satisfatórios. Suas dimensões são muito irregulares e sua superfície é cheia de imperfeições, o que é comprovado pelo exame ótico do filme obtido: o filme é descontínuo, com grande quantidade de buracos.

Quanto mais fino for o substrato, melhor será o acoplamento do filme com a bobina. Substratos muito finos têm, entretanto, baixa resistência mecânica, rompendo-se com facilidade.

Os substratos devem ser aquecidos, para haver a boa aderência e controle das propriedades magnéticas do filme. A fonte de calor (figura 5.15) é constituída por um conjunto de lâmpadas incandescentes de projeção (Philips modelo 5968 de 115V/500W), alimentadas por um controlador de potência (VARIAC) ligado à rede. A radiação luminosa incide sobre uma placa espessa de alumínio enegrescida (uniformização da temperatura), que está em contato térmico com os substratos. A temperatura é monitorada por vários termopares de cromel-alumel instalados em várias posições do conjunto suporte dos substratos.



- 1- Refletor
- 2- Lâmpada
- 3- Placa de aquecimento
- 4- Suporte dos substratos
- 5- Substrato
- 6- Máscara
- 7- Feixe de vapor da liga

Acima aquecedores de 1 lâmpada para 4 substratos (esquerda) e de 4 lâmpadas para 32 substratos (direita).

Figura 5.15: Sistema de aquecimento dos substratos e aquecedores.

Na versão inicial, o suporte de substratos permitia a fabricação de 4 filmes simultaneamente (figura 5.16). O aquecedor de substratos era constituído por uma única lâmpada com um refletor de aço inox. Na versão mais recente, já é possível a confecção de 32 filmes simultaneamente e o aquecedor dispõe de quatro lâmpadas. Com este sistema de aquecimento é possível aquecer os substratos a mais de 400°.

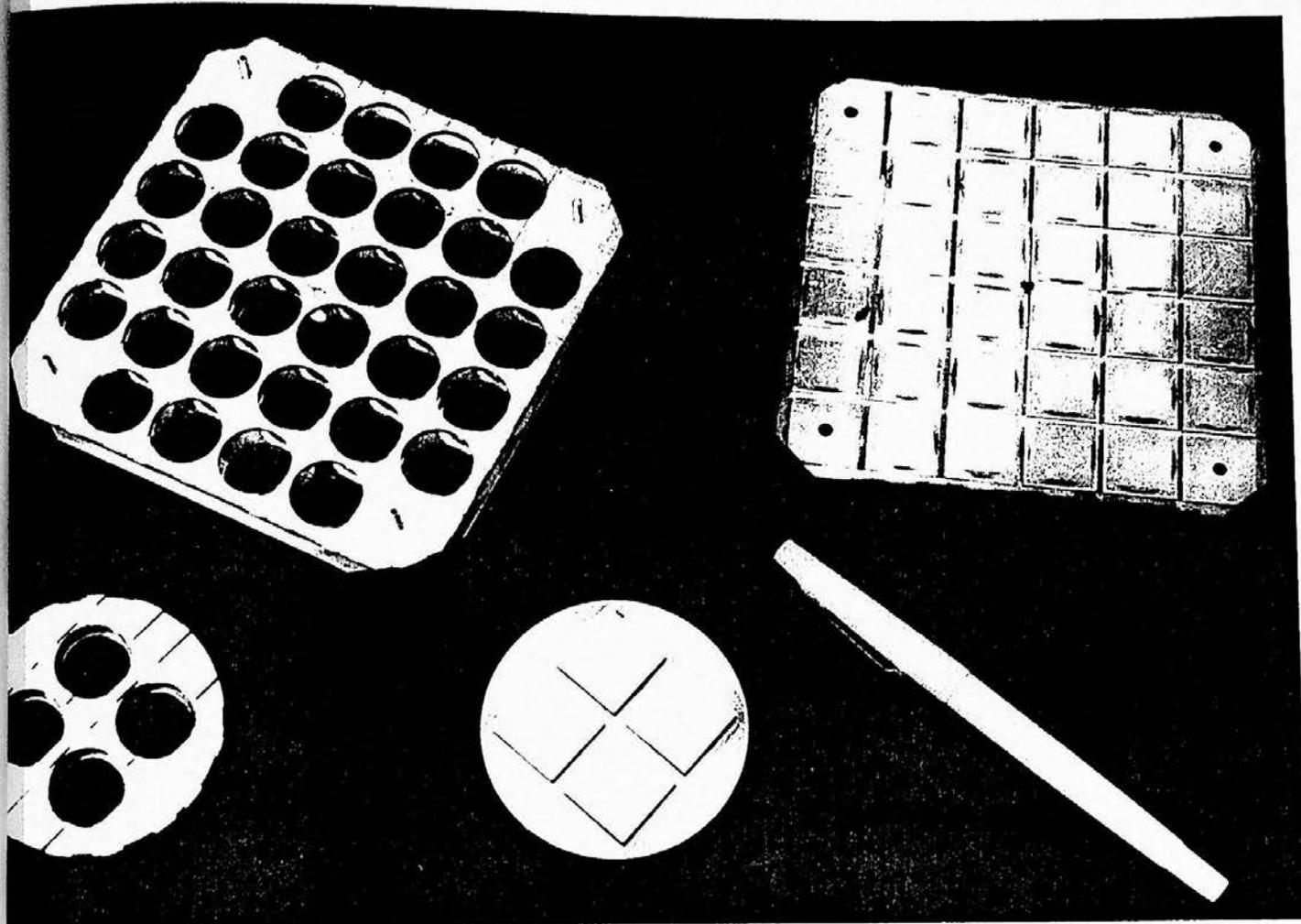


Figura 5.16: À esquerda, suporte de substratos montado com máscara de evaporação; à direita, placas de aquecimento dos substratos.

As bordas inclinadas do filme (minimização de ruído) são obtidas por uma máscara colocada paralelamente ao plano dos substratos e distanciada destes por alguns milímetros (figura 5.16). A borda é obtida pelo halo do feixe evaporado (figura 5.17). Os filmes resultantes são películas circulares depositadas sobre o substrato quadrado.

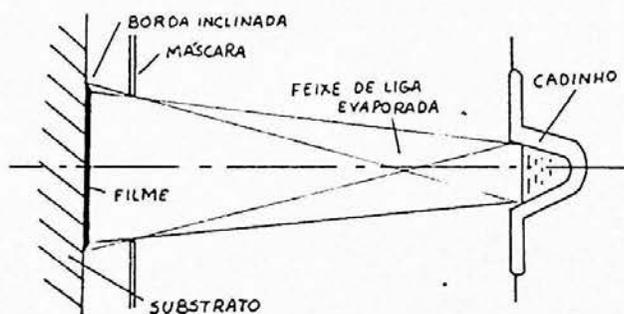


Figura 5.17: Máscara para suavização das bordas do filme.

Na figura 5.18 temos uma visualização da montagem dos componentes citados anteriormente.

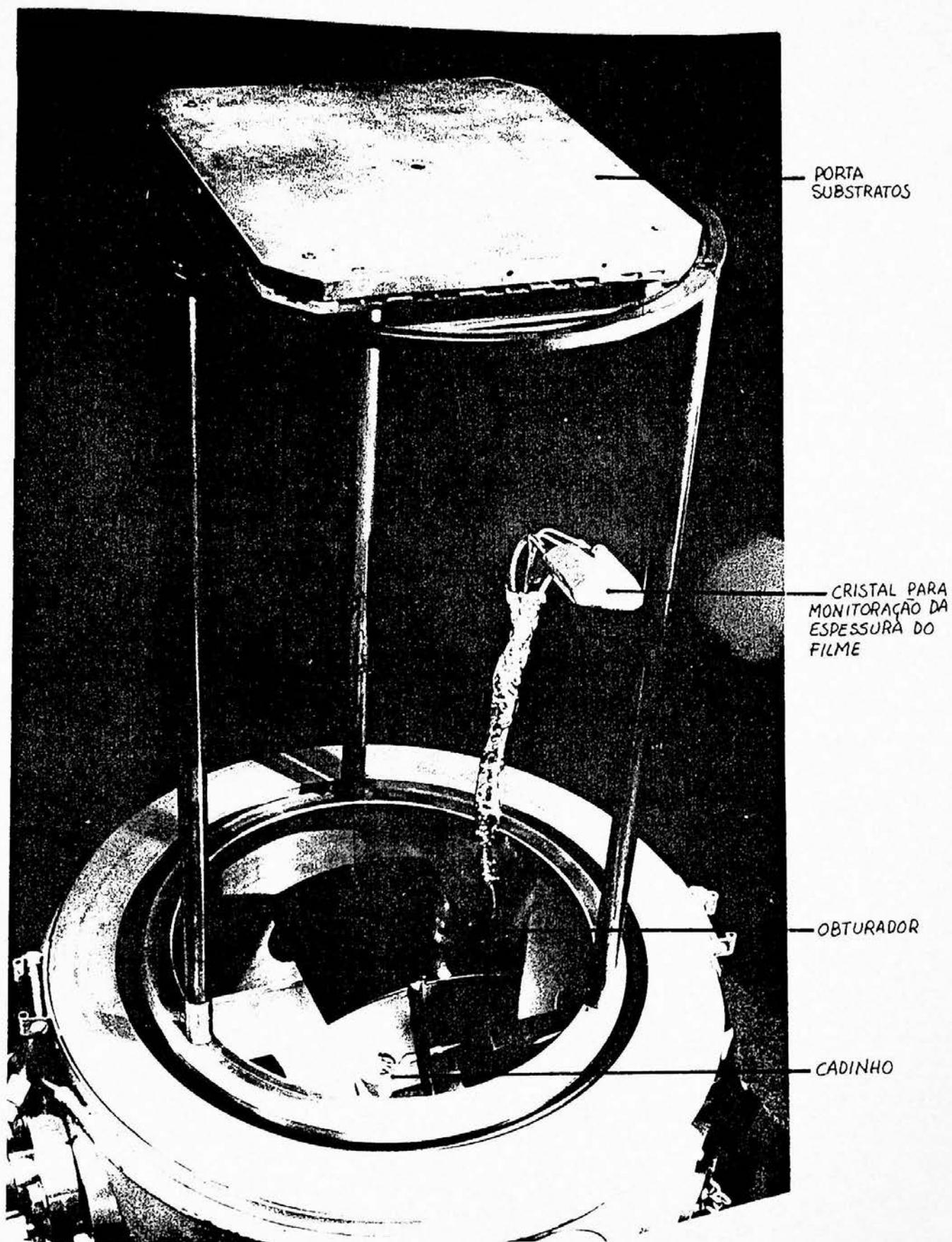


Figura 5.18: Montagem dos componentes no interior da evaporadora.

d) A liga

Como vimos anteriormente, a composição química no cadinho deve ser ligeiramente mais rica em Ni do que aquela desejada para o filme. A composição vai se alterando, a medida que a liga do cadinho vai sendo consumida (vai se tornando mais rica em Ni, pois o Fe evapora-se mais rapidamente). Um procedimento para obtenção de filmes de baixa magnetostricção, que dá bons resultados, consiste em partir de uma liga rica que dá filmes ricos em Fe e realizar sucessivas evaporações sem alterar o conteúdo do cadinho. À medida que as evaporações são realizadas os filmes vão se empobrecendo de Fe e a magnetostricção vai diminuindo, até obter uma evaporação com filmes em que a magnetostricção é mínima. Uma vez atingida a composição em que a magnetostricção é mínima, uma pequena reposição de Fe deve ser feita no cadinho antes de cada evaporação subsequente de maneira a manter a composição do filme constante. Isto pode ser feito, por exemplo, completando o conteúdo do cadinho com uma liga rica em Fe. A monitoração da composição de cada filme é feita através da medida da magnetostricção do filme. Esta propriedade é muito sensível em relação à composição do filme. Com a finalidade de medir a magnetostricção, construímos um aparelho que será descrito no próximo capítulo.

Para as evaporações que realizamos, dispúnhamos de ligas nas composições: 17% Fe, 18,25% Fe e 19% Fe; fornecidas pela Varian - Speciality Metals Division, com pureza de 99,95%. As ligas foram fornecidas em "pellets" de aproximadamente 1,8g cada. Além disso dispúnhamos de Ni puro ("shots" entre 1 e 3g) e Fe em pó.

5.5 PROCEDIMENTOS PARA A EVAPORAÇÃO

Baseados numa grande quantidade de evaporações, que foram realizadas durante o desenvolvimento da evaporadora, podemos estabelecer um procedimento padrão para a obtenção de filmes de permalloy com características desejáveis à magnetometria:

1 - Apesar do substrato já ser fornecido com limpeza preliminar, é interessante garantir sua limpeza com um procedimento simples: imersão em uma solução de água bi-distilada e detergente, banho de ultrassom e secagem com nitrogênio. Nenhum depósito de gordura ou qualquer outra substância pode estar presente, pois pode provocar porosidades no filme.

2 - Após a montagem cuidadosa dos substratos no suporte e a instalação da máscara e termopares, a câmara é fechada e evacuada (procedimento padrão em sistemas de vácuo: pré-vácuo com bomba mecânica, vácuo com a bomba de difusão e finalmente o vácuo final, entre 10^{-6} e 10^{-7} mm de Hg, obtido com auxílio das armadilhas frias).

3 - Pré-aquecimento da liga (cadinho) e dos substratos, a fim de eliminar gases e substâncias estranhas. Assim que o vácuo volta à faixa de trabalho, ajustamos a temperatura do substrato ($\approx 300^{\circ}\text{C}$).

4 - Ajustamos a taxa de evaporação, monitorando o sensor piezoelétrico ($\approx 250\text{Å}/\text{min}$). O obturador é mantido entre os substratos e o cadinho. Aguardamos alguns minutos até que as condições de evaporação se estabilizem.

5 - Alimentamos a bobina de Helmholtz, de forma que produza um campo magnético de aproximadamente 30 Oe. Retiramos o anteparo, expondo os substratos, até obter a espessura desejada. Fechamos o obturador e retiramos a potência do cadinho.

6 - Mantemos os filmes aquecidos e submetidos a ação do campo estático durante $\approx 2\text{h}$ e a seguir, ainda sob a ação do campo, reduzimos a temperatura dos filmes lentamente ($\approx 1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) até atingir a temperatura ambiente.

Na figura 5.19 temos uma visão do sistema em operação.

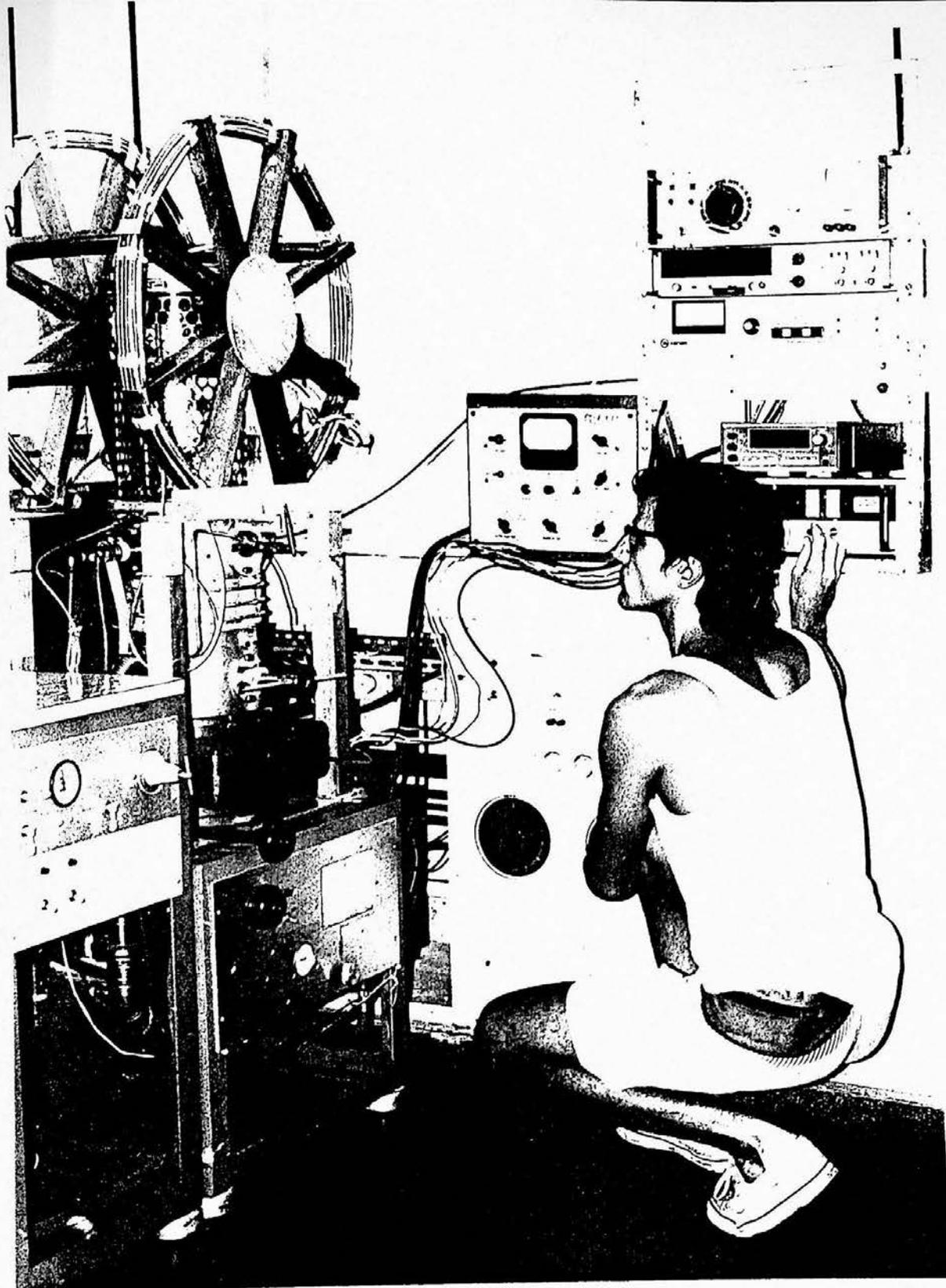


Figura 5.19: Sistema em operação.

CAPÍTULO 6

EQUIPAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

6.1 INTRODUÇÃO

Os filmes obtidos no equipamento descrito no capítulo anterior devem ser caracterizados dentro dos parâmetros de interesse para a magnetometria. Os principais parâmetros que vamos medir nos filmes serão: campo de anisotropia, campo coercivo, espessura e magnetostricção. Além destes faremos ainda a verificação da orientação da anisotropia induzida durante a evaporação e uma avaliação do ruído (caracterizado pela histerese apresentada no eixo duro do filme).

Traçadores de curvas de magnetização ou histerese mostram-se como um dos meios mais simples para realizar estas medidas, pois as informações que necessitamos podem ser extraídas das curvas de magnetização.

As peculiaridades de nossas amostras e o alto custo dos equipamentos comerciais levaram-nos ao desenvolvimento e construção de um sistema de medidas específico às nossas necessidades. Todo o equipamento foi projetado e construído no próprio laboratório.

Vamos descrever inicialmente o equipamento e logo após mostrar como realizamos as medidas dos parâmetros listados acima.

6.2 TRAÇADOR DE CURVAS B x H

O esquema básico de um traçador de curvas de magnetização é mostrado na figura 6.1. O funcionamento é simples: Uma bobina produz um campo magnético alternado sobre a amostra. A amostra está no interior de outra bobina, chamada bobina "pick-up". A magnetização, produzida na amostra pelo campo aplicado, provoca a indução de um sinal elétrico na bobina pick-up. Este sinal, devidamente integrado, será proporcional à magnetização da amostra. Monitorando simultaneamente (através de um osciloscópio ou registrador) a corrente que gera o campo alternado sobre a amostra (H) e o sinal induzido e integrado da bobina pick-up (B), temos a formação das curvas de magnetização do material.

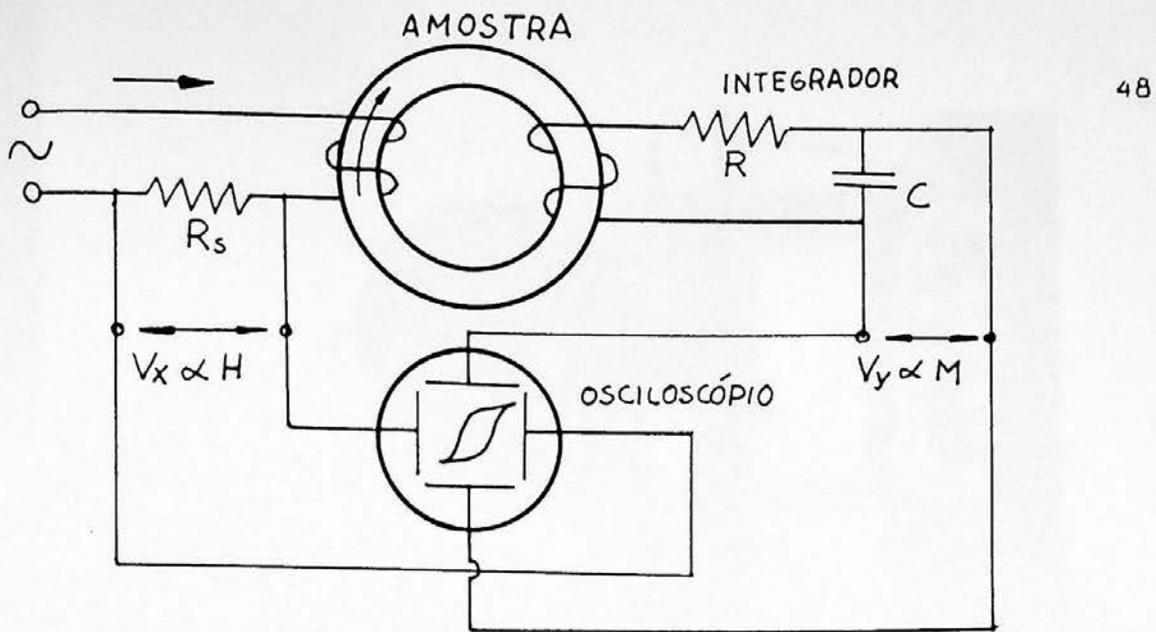


Figura 6.1: Esquema básico de um traçador de curvas de magnetização.

A implementação do traçador resultou na configuração mostrada na figura 6.2. O sistema é de baixo custo e utiliza componentes e aparelhos normalmente encontrados no laboratório. Na figura 6.3, observa-se o equipamento de caracterização em operação.

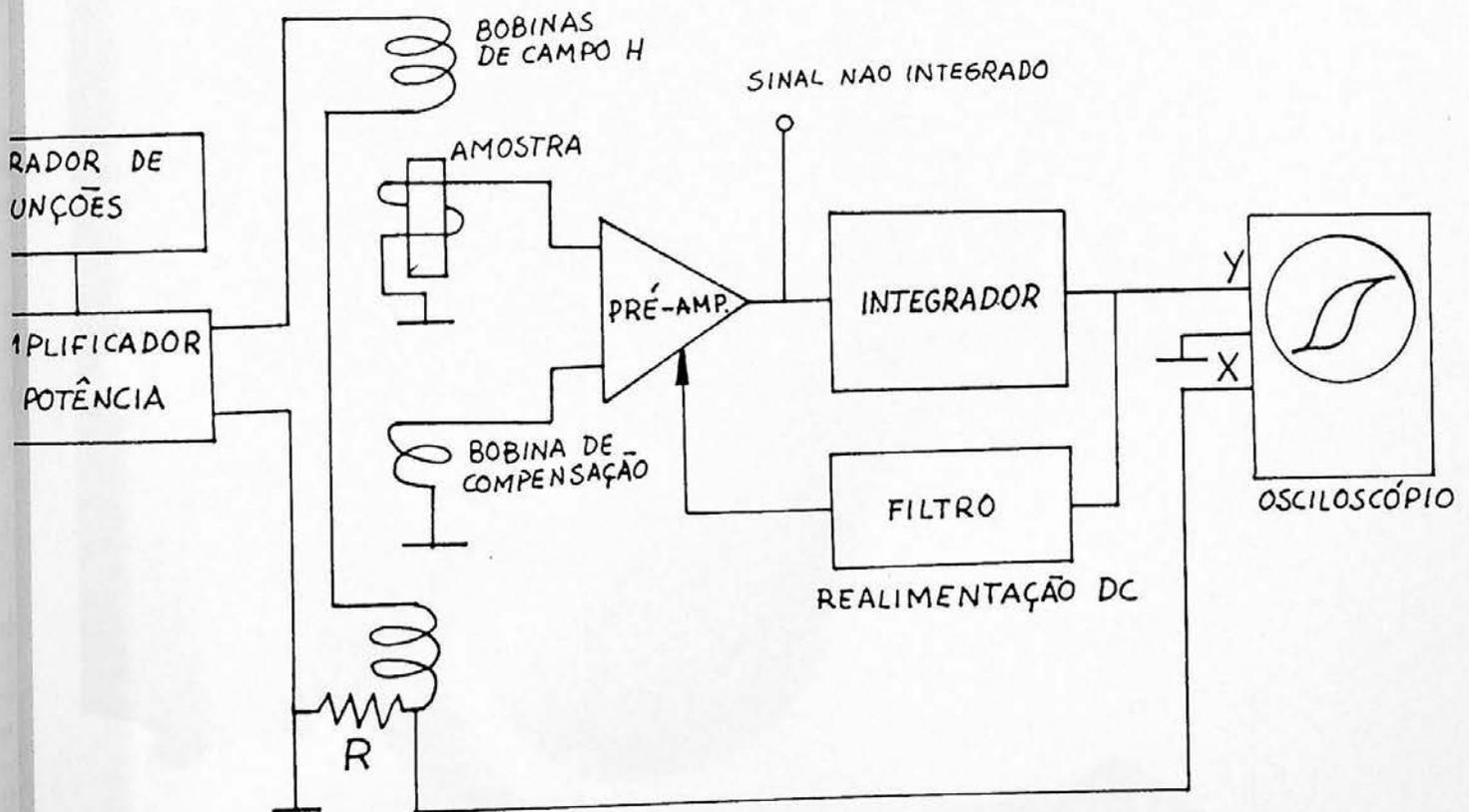


Figura 6.2: Diagrama de blocos do sistema de medida.

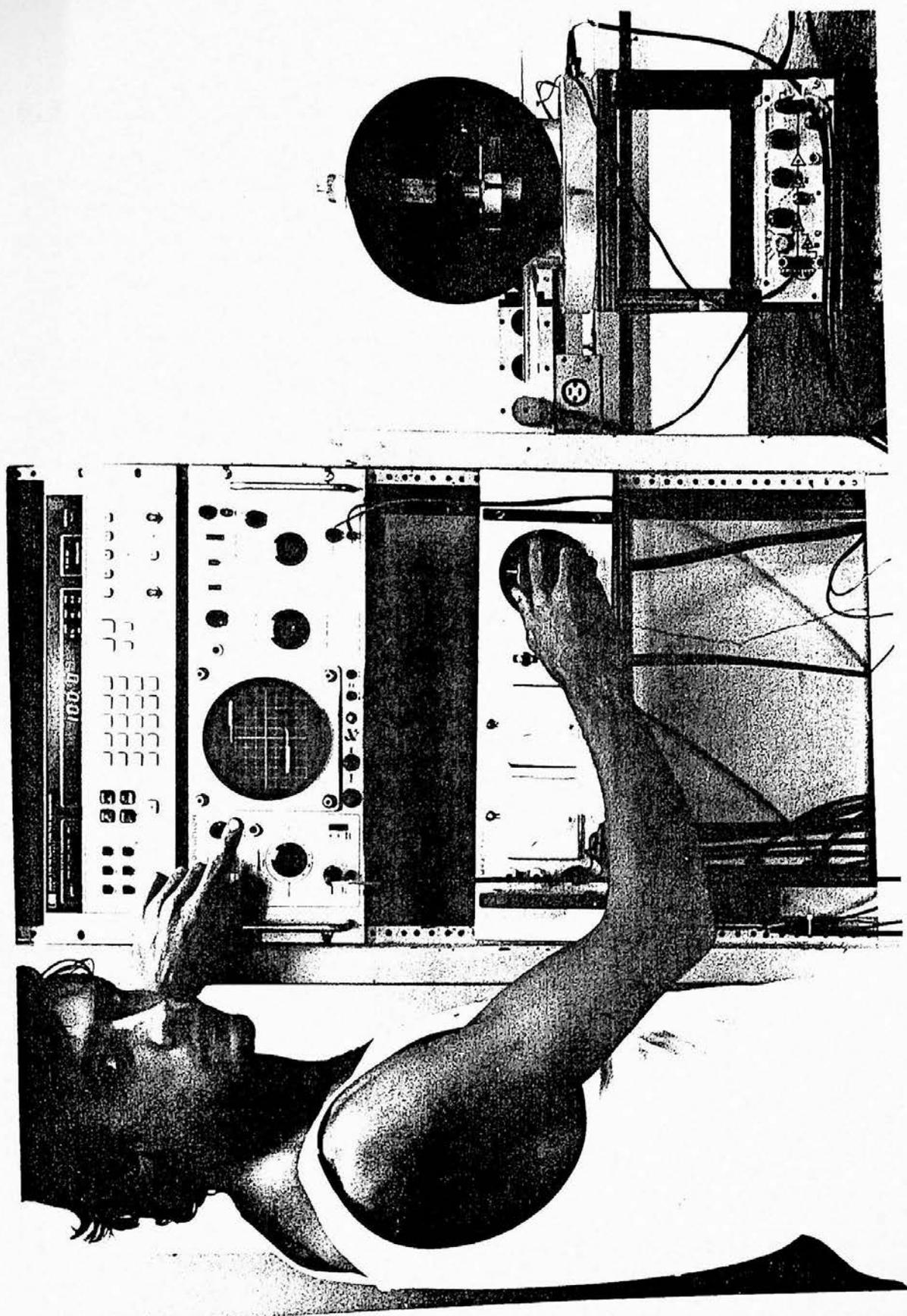


Figura 6.3: Traçador de curvas de histerese em operação.

6.3 DETALHES CONSTRUTIVOS

Todos circuitos, bobinas e montagens mecânicas foram confeccionadas nas oficinas e laboratórios do Departamento de Física dos Materiais e Mecânica do IFUSP. A seguir damos alguns detalhes do equipamento montado:

a) Produção do campo de varredura - H:

O campo responsável pela magnetização dos filmes é gerado por um par de bobinas de Helmholtz, que permitem obter campos de grande homogeneidade sobre regiões relativamente extensas (erro menor que $\pm 0.5\%$ sobre a área ocupada pela amostra - $20 \times 20 \text{ mm}$). A alimentação desta bobina é feita por um amplificador de potência acoplado a um gerador de funções. Nesta configuração, o sistema permite a obtenção de curvas de histerese com campos de varredura na faixa de 0.1Hz até 1kHz. Frequências de operação elevadas, fornecem curvas características do material diferentes daquelas obtidas em frequências menores. Outro problema da operação em frequências elevadas é a introdução de defasagens nos sinais elétricos, devido a eletrônica envolvida. Estas defasagens produzem uma histerese adicional nas curvas de magnetização obtidas, que não têm relação com a amostra. Operando com campos de pequena taxa de variação (baixas frequências de operação - até $\approx 80 \text{ Hz}$), as características magnéticas obtidas serão bastante próximas às características magnéticas estáticas do material. Por outro lado, não podemos reduzir arbitrariamente a frequência de operação do traçador, pois a relação sinal/ruído ficaria muito prejudicada (a amplitude do sinal induzido pelo filme na bobina pick-up é proporcional à frequência de operação do traçador). A operação na faixa de 20 a 60Hz produz resultados bastante satisfatórios.

Uma opção econômica para substituir o amplificador de potência e o gerador de funções, consiste em alimentar a bobina de campo com um simples controlador de potência VARIAC alimentado diretamente pela rede de 60Hz, que é a configuração que utilizamos atualmente.

b) Tratamento do sinal induzido

Como a quantidade de material magnético do filme é muito reduzida e a frequência de operação do traçador também é reduzida, o sinal induzido pelo filme é muito pequeno. Devido a isto, a bobina de pick-up possui um elevado número de espiras (4000). Uma bobina de compensação é colocada ao lado da bobina de pick-up para cancelar o sinal induzido pelo fluxo magnético que atravessa o espaço vazio da pick-up (A seção transversal da bobina é muito maior que a seção transversal do filme: não há um bom acoplamento entre os

filmes e a bobina pick-up). Um ajuste fino desta compensação é feito através da alteração de ganho no pré-amplificador.

O resultado da implementação do traçador é apresentado na figura 6.4, onde podemos observar a bobina de campo com os dispositivos mecânicos de suporte e teste dos filmes. Na parte inferior, o pré-amplificador/integrador.

c) Montagem mecânica

Para permitir a medida da magnetostricção e do desvio angular da anisotropia do filme após a sua fabricação, foi prevista uma montagem mecânica no sistema de caracterização. Como estamos realizando medidas magnéticas, todos componentes desta montagem foram executados em materiais plásticos, resinas e fenolite. A montagem mecânica do dispositivo é mostrada na figura 6.5, onde se observam também as bobinas de campo magnético de varredura. Na figura 6.6, é apresentado um corte desta montagem.

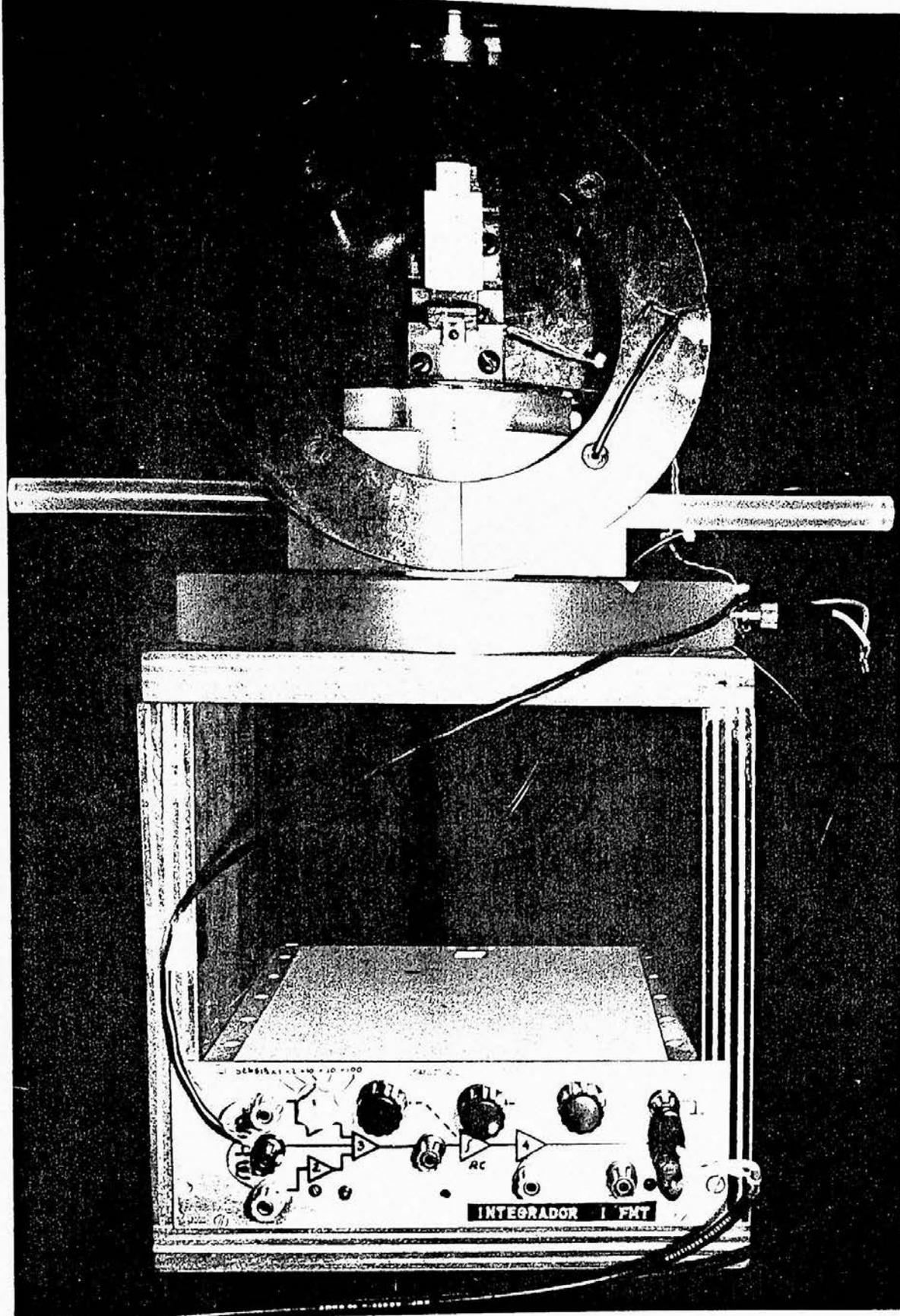


Figura 6.4: O dispositivo para caracterização de filmes magnéticos: na parte superior, bobina de Helmholtz e montagem mecânica; na parte inferior, o pré-amplificador/integrador.

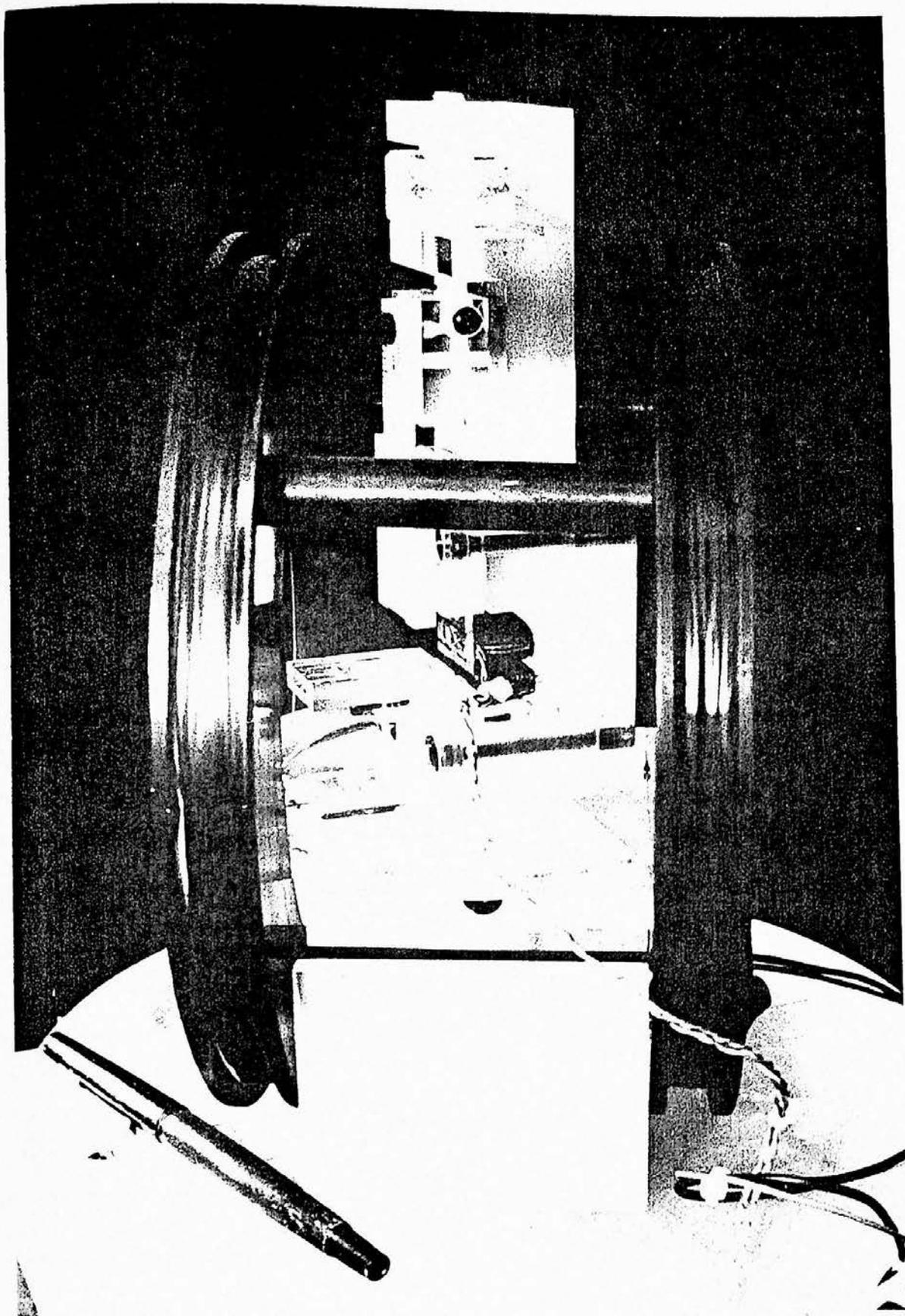


Figura 6.5: A montagem mecânica do traçador de curvas.

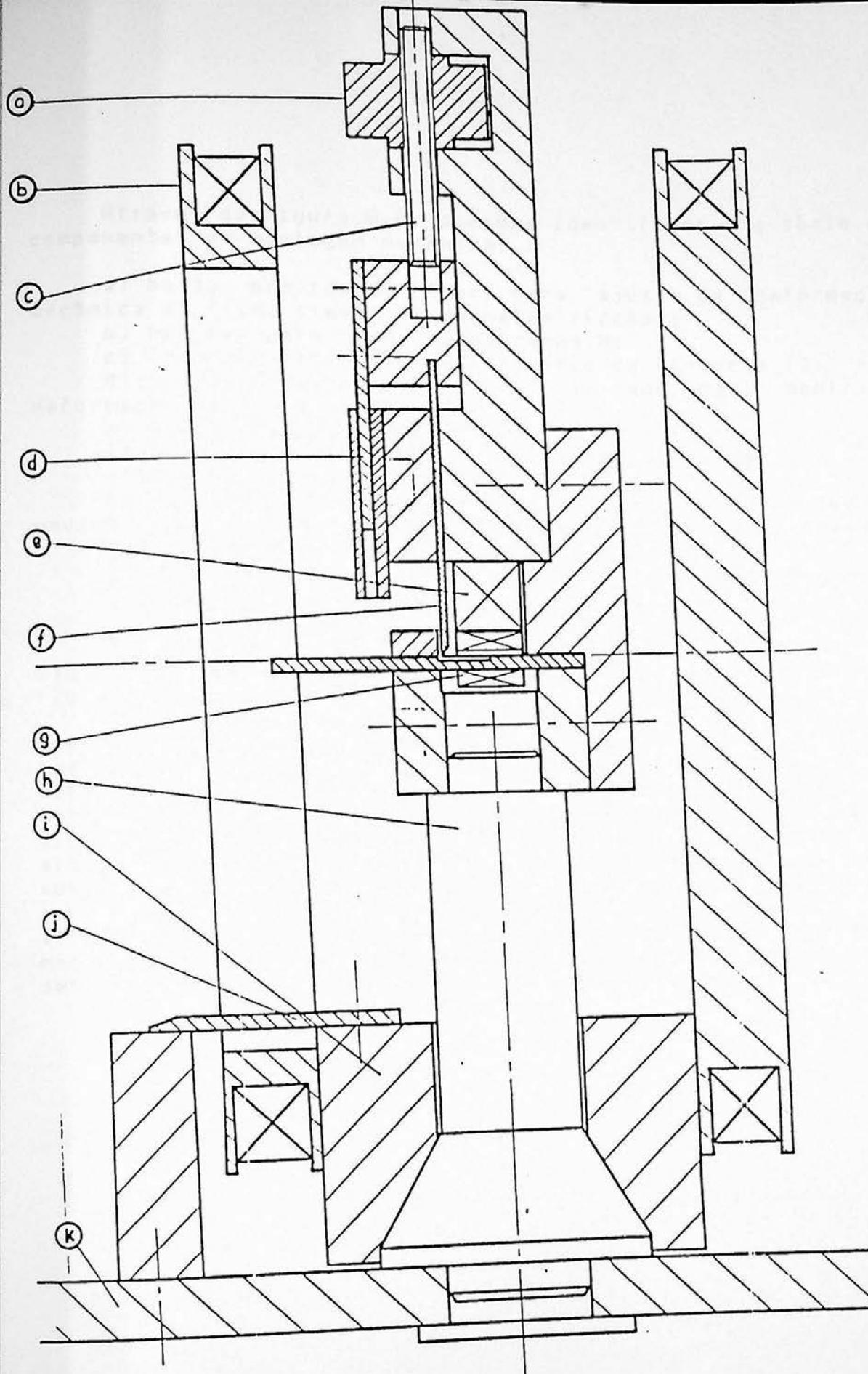


Figura B.6: Vista em corte da montagem mecânica.

Através da figura 6.6, podemos identificar uma série de componentes da montagem mecânica:

- a) botão provido de rosca para ajuste da deformação mecânica do filme (teste de magnetostricção);
- b) bobinas para produção do campo H;
- c) fuso que provoca o deslocamento da lingueta f);
- d) nônio de paquímetro, utilizado para medir a deformação mecânica do filme;
- e) bobina de compensação;
- f) lingueta que provoca a deformação do filme;
- g) bobina pick-up;
- h) eixo, sobre o qual as bobinas de campo podem ter um movimento de rotação (medida do desvio angular dos filmes);
- i) suporte giratório das bobinas de campo;
- j) transferidor para medir o desvio angular dos filmes;
- k) base fixa do dispositivo.

O funcionamento do mecanismo de medida de magnetostricção é bastante simples. Vamos nos basear na figura 6.6 para explicá-lo:

Girando o botão b), o fuso a) se deslocará para baixo. Como ele está mecanicamente acoplado a lingueta d), esta também se deslocará para baixo. O substrato e) sofrerá uma deformação, pois uma de suas extremidades está fixada no suporte f) e a outra está em contato com a extremidade da lingueta. A curvatura resultante do substrato, provoca um alongamento ou compressão no filme depositado sobre este substrato (compressão se o filme está na face inferior do substrato e alongamento se estiver na face superior). A alteração do estado de magnetização do filme (caso este seja magnetostrictivo) será detectado na bobina pick-up h). A deformação pode ser medida através do nônio c).

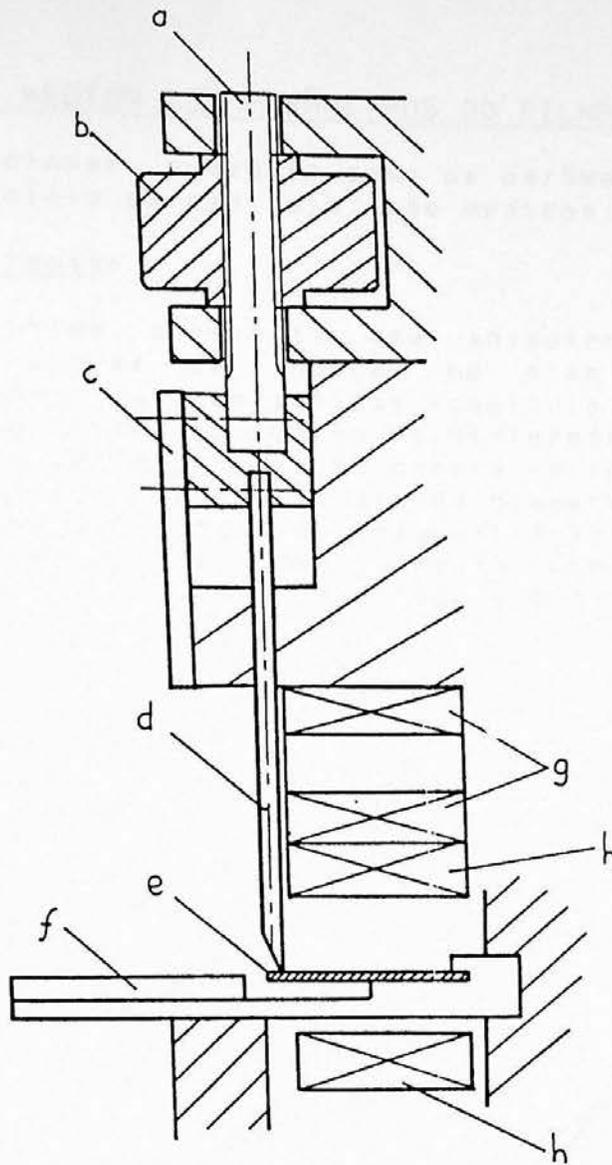


Figura 6.7: Mecanismo para medir a magnetostricção dos filmes.

6.4 MÉTODOS DE MEDIDA DOS PARÂMETROS DO FILME

Vamos descrever a seguir como os parâmetros, a que nos referimos no início do capítulo, são medidos:

a) Anisotropia:

Um bom filme apresenta uma anisotropia muito bem definida. As curvas de indução no eixo fácil e duro apresentam formas características (capítulo 2). Sobre o eixo duro devemos ter o mínimo de histerese, para garantir que o processo de magnetização ocorra principalmente por rotação de domínios. Quando há grande dispersão de domínios, observamos que a curva de magnetização do eixo duro apresenta uma histerese, que aumenta com o aumento da amplitude do campo de varredura (figura 6.8).

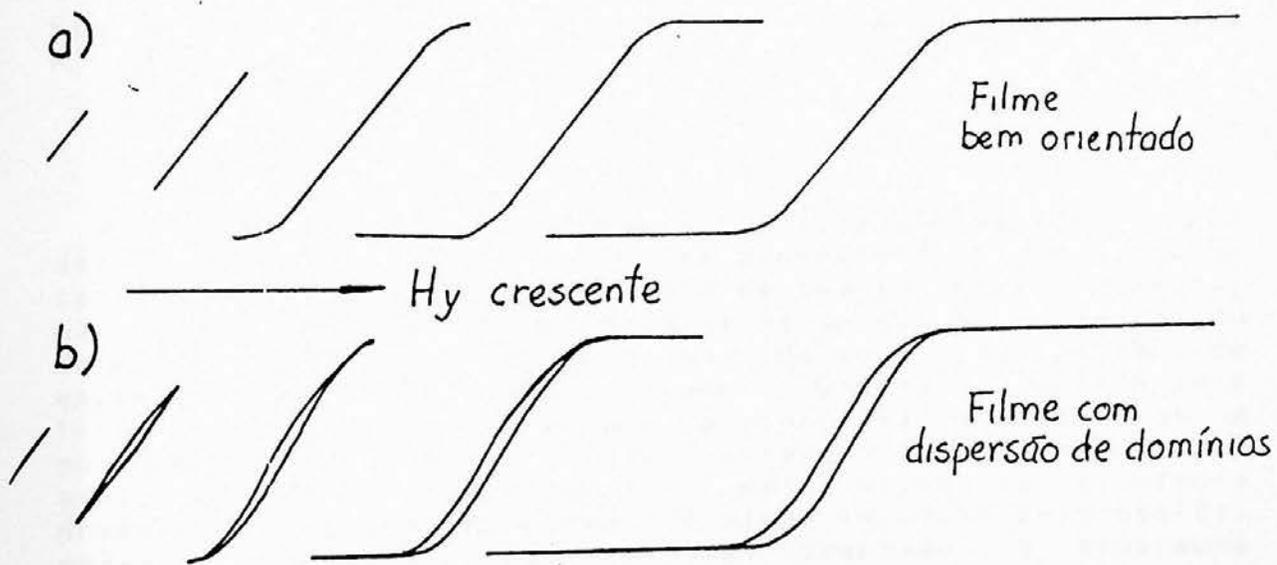


Figura 6.8: Curvas $B \times H$ na direção dura, para amplitudes de H crescentes: a) Filme com a anisotropia uniaxial bem definida; b) Filme inadequado à magnetometria.

O campo de anisotropia é obtido por extrapolação linear na curva de magnetização do eixo duro, conforme a figura 6.9.

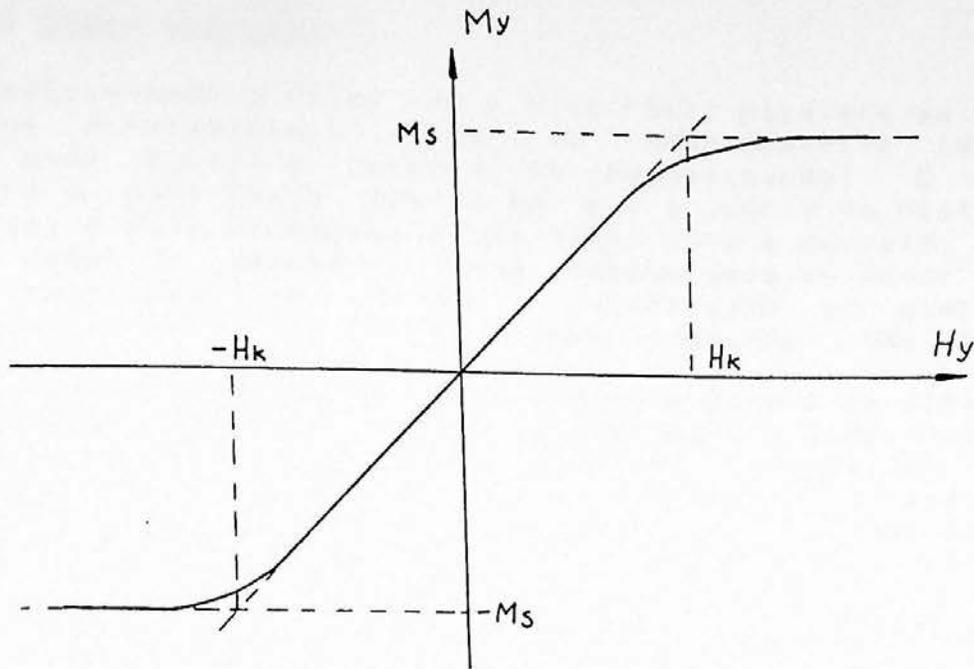


Figura 6.9: Determinação do valor do campo de anisotropia H_k .

b) Espessura:

A espessura do filme pode ser avaliada diretamente pelo desvio de frequência do monitor piezoelétrico, descrito no capítulo anterior. Outra maneira de avaliar esta espessura, mais precisa, consiste em comparar as curvas de magnetização do filme produzido com as curvas de um filme padrão de espessura conhecida (710 Angstroms). O sinal induzido pelo filme na bobina de pick-up é proporcional à sua massa e portanto, proporcional à sua espessura. Comparando-se a amplitude do sinal induzido pelo filme de espessura desconhecida com a amplitude do sinal induzido pelo padrão, podemos determinar, com razoável precisão, a espessura desconhecida.

Um fator de correção geométrico é introduzido para compensar as diferenças de forma e área apresentadas pelo padrão e o filme que medimos.

c) Campo coercivo:

Posicionando o filme com o eixo fácil paralelo ao campo H , temos diretamente a leitura do campo coercivo (mínimo campo onde ocorre a reversão da magnetização). O campo coercivo é dado pelos pontos em que a curva de histerese atravessa o eixo de magnetização nula. Isto é correto, desde que o campo de varredura tenha intensidade um pouco maior que o campo coercivo. Quando a intensidade do campo de varredura é menor que a do campo coercivo não haverá magnetização da amostra.

A medida estática do campo coercivo difere da dinâmica, pois a medida dinâmica fornece valores para o campo coercivo que aumentam com o aumento da taxa de variação do campo aplicado. Como comentamos anteriormente a diferença é pequena e pode ser desprezada dentro da precisão que nos interessa ($\pm 0.10e$), operando com frequências de varredura até 80Hz.

A medida do campo coercivo é útil, pois como veremos a seguir, polarizações com campos da ordem do campo coercivo são interessantes para estabilizar o funcionamento dos magnetômetros.

d) Magnetostricção:

Em dispositivos magnetométricos é fundamental reduzir-se ao mínimo a magnetostricção do filme. A dependência das propriedades magnéticas com as dimensões do filme podem afetar drasticamente a estabilidade e resolução do dispositivo. Neste ponto o filme de "permalloy" apresenta uma importante vantagem. Devido ao fato do Fe e do Ni apresentarem efeitos magnetostrictivos opostos a magnetostricção da liga passa por zero, na composição arroximada de 81% de Ni. A sensibilidade desta propriedade com a composição química é muito grande e assim a medida da magnetostricção também pode dar informações quanto a composição resultante do filme.

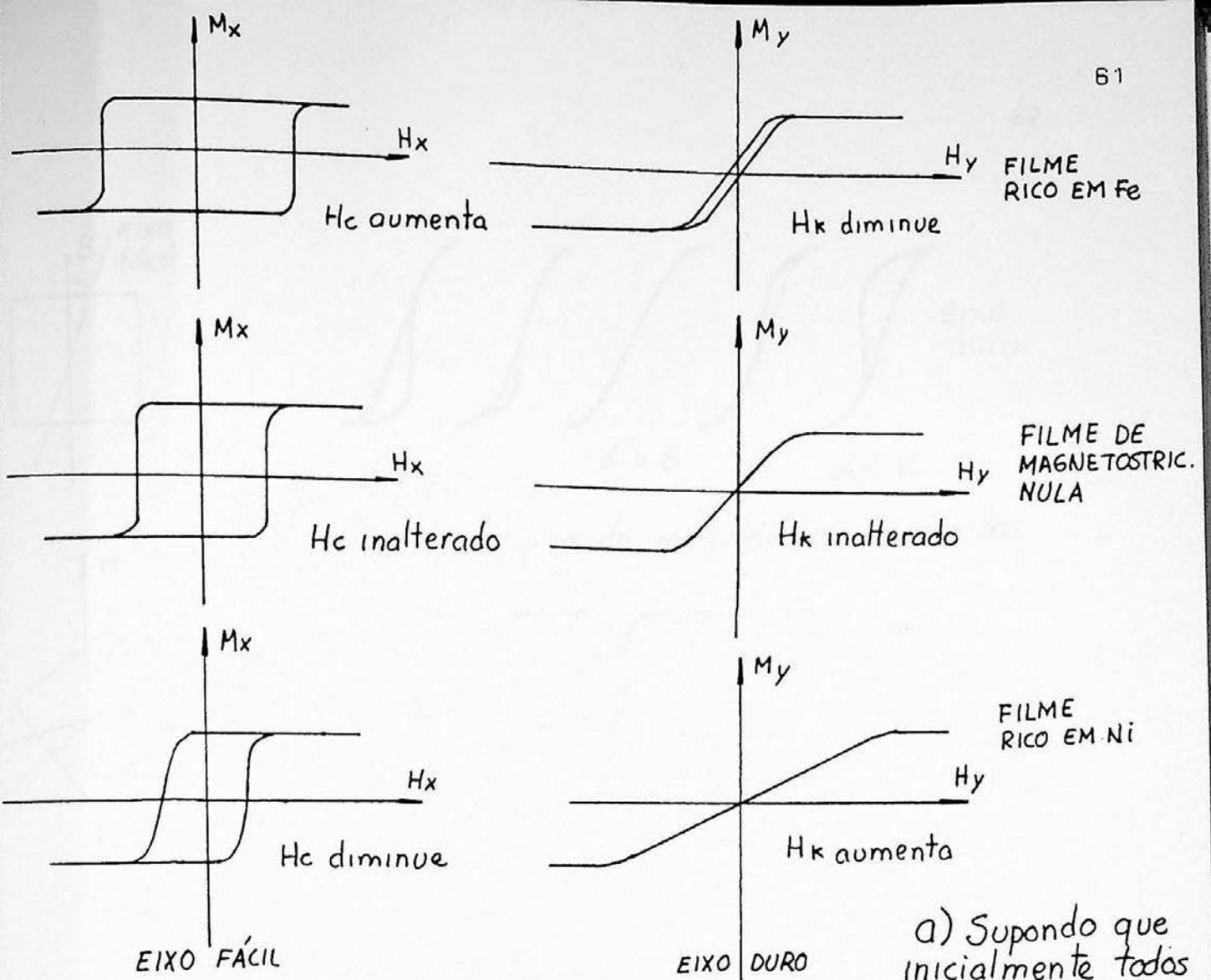
A medida de magnetostricção que fazemos em nossos filmes consiste na medida da variação do campo de anisotropia com a aplicação de um esforço mecânico sobre o filme. O esforço mecânico é aplicado pelo dispositivo citado anteriormente, que provoca uma deformação controlada no substrato do filme. Na figura 6.10.a temos alguns exemplos de como as propriedades magnéticas do filme são afetadas com a aplicação de esforços mecânicos. Na figura 6.10.b, são mostrados os resultados obtidos por alguns pesquisadores na década de 60.

Com nosso dispositivo de medida, verificamos que H_c também varia com a aplicação de esforços mecânicos, porém a variação é contrária a de H_k : aplicando uma deformação no filme enquanto H_k diminui, H_c aumenta e vice-versa.

e) Desvio angular:

Imprecisões na montagem da operação de evaporação e a influência da geometria da evaporadora podem provocar desvios na direção da anisotropia induzida resultante do filme, em relação às direções características em que orientamos o campo magnético durante a evaporação do filme. Normalmente orientamos o campo magnético paralelamente às bordas do substrato, para que a direção de anisotropia magnética possa ser determinada pelo aspecto físico do filme.

A medida destes desvios angulares foi prevista no projeto da montagem mecânica do traçador. Para verificar o desvio angular da anisotropia do filme, giramos o conjunto de bobinas geradoras do campo de varredura H (mantendo o filme fixo em seu suporte), até que a figura de histerese do filme seja simétrica (figura 6.11). Filmes com grandes desvios angulares, não podem ser utilizados em magnetômetros, pois são muito ruidosos. Isto acontece pois estes filmes apresentam histerese na curva de magnetização tomada no eixo paralelo à borda do substrato, que seria a direção prevista para o eixo duro do filme se não houvesse o desvio. Em nosso dispositivo a leitura é feita por um goniômetro, que permite medir desvios da ordem de 0.5°



a) Supondo que inicialmente todos filmes tenham os mesmos valores de H_c e H_k , acima é mostrado o efeito de um esforço de tração sobre os filmes (com compressão o efeito é inverso).

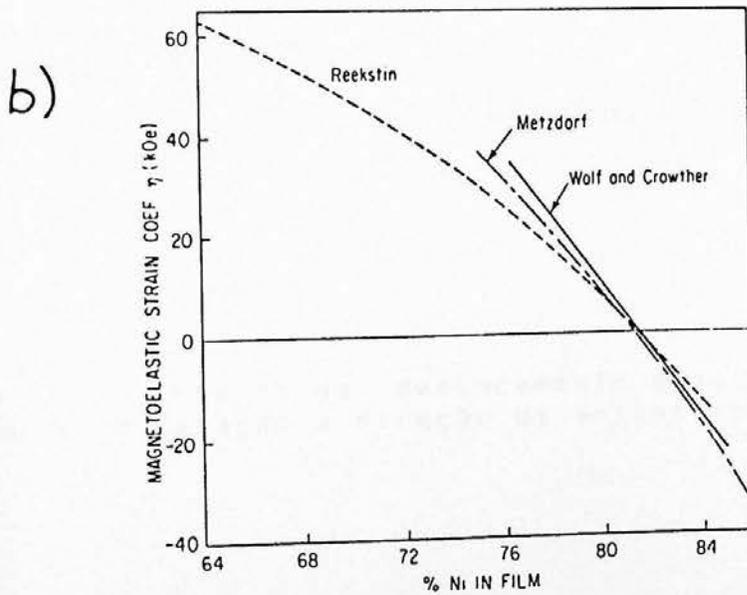
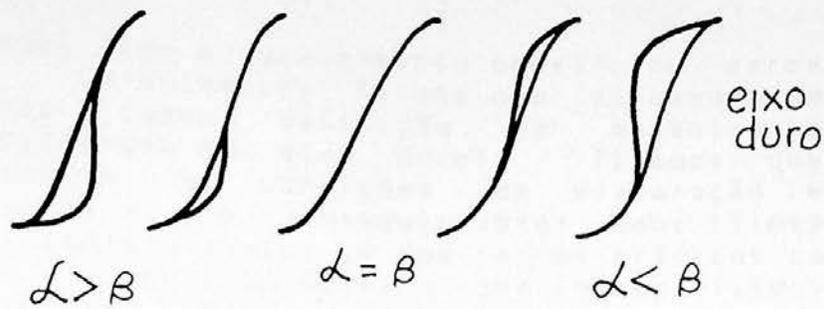
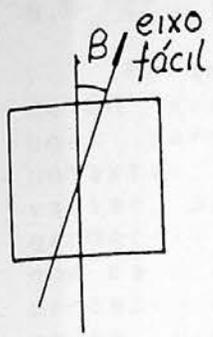
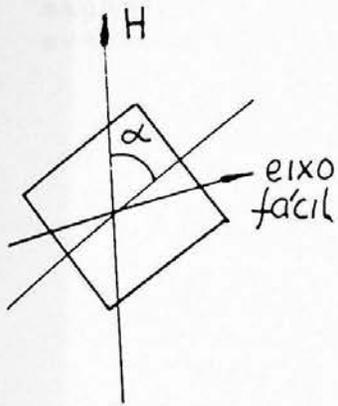


Figura 6.10: a) Alteração das curvas de magnetização de um filme magnetostrictivo com a aplicação de esforços mecânicos; b) Variação de H_k com deformação mecânica [4.1].



figuras de magnetização observadas



B - ângulo formado entre a borda do substrato e o eixo fácil do filme

α - ângulo ajustado no dispositivo de medida de desvio

Figura 6.11: Efeito do deslocamento angular do campo de varredura em relação à direção da anisotropia.

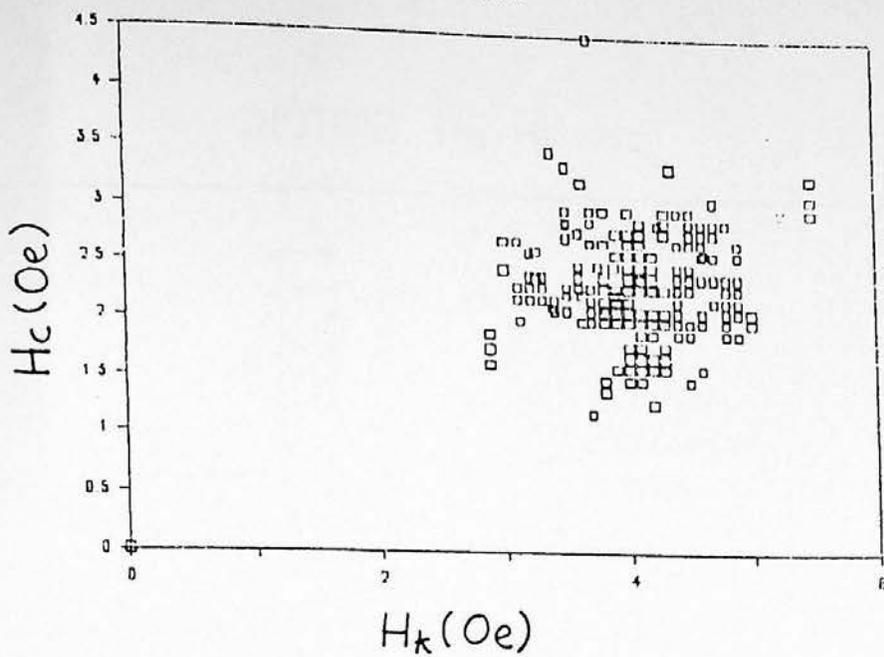
6.5 RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas, com o equipamento construído, cerca de 50 evaporações. Os primeiros filmes não apresentaram boas características (pouca definição da anisotropia uniaxial, grande histerese no eixo duro). Tivemos que variar progressivamente as condições de evaporação e geometria da evaporadora, até conseguir obter bons filmes com características reprodutíveis. Um dos pontos críticos do processo é acertar a composição química que forneça filmes pouco magnetostrictivos. Verificamos que os filmes que apresentam as melhores características são aqueles com baixa magnetostrictão. A seguir resumimos as condições típicas de evaporação em que foram obtidos bons filmes:

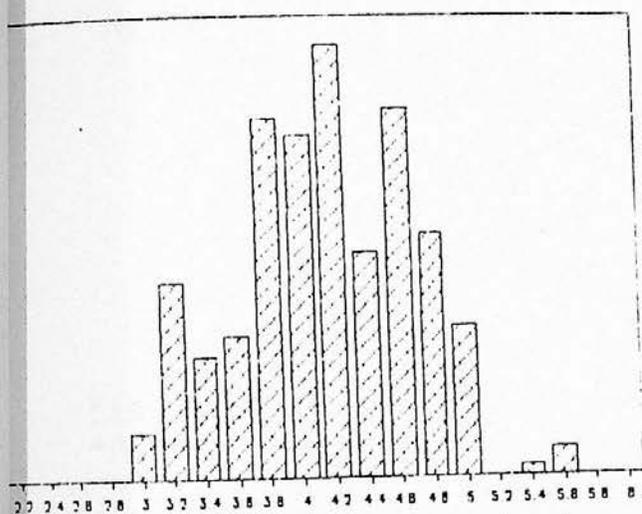
- Composição do cadinho: 83/17 Ni/Fe
- Massa de liga no cadinho: $\approx 5g$
(suficiente para 3 evaporações de filmes de 1000Å)
- Taxa de evaporação: 250Å/min
- Vácuo: $P = 5 \cdot 10^{-7}$ mmHg
- Temperatura dos substratos: 300°C
- Tratamento térmico: $t \approx 2h$; $T \approx 300^\circ C$; $H \approx 300e$
- Taxa de resfriamento: $dT/dt \approx 1.5^\circ C/min$; $H \approx 300e$
- Espessura do filme: 1000Å

Na figura 6.12 podemos observar uma distribuição com os resultados obtidos em diversas evaporações. Temos valores típicos de 2.40e para o campo coercivo e 4.20e para o campo de anisotropia. A dispersão de valores é devida às inúmeras modificações realizadas no processo de evaporação, no qual os filmes foram obtidos.

A relação H_k/H_c apresentou um valor típico igual a 1.8, (figura 6.13). A discrepância em relação ao monodomínio ($H_c = H_k$) acontece pois no filme real antes do campo de anisotropia ser atingido há a nucleação de domínios e movimento de paredes de domínios, que provocam a reversão da magnetização em campos menores ($H_c < H_k$).

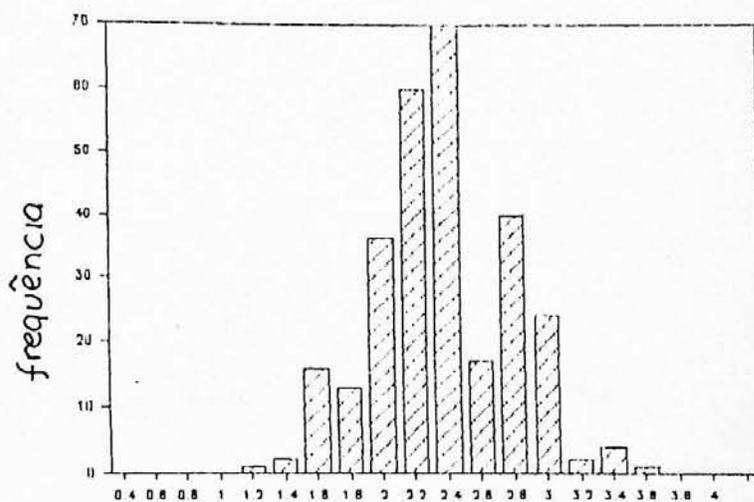


DISTRIB. DE H_k



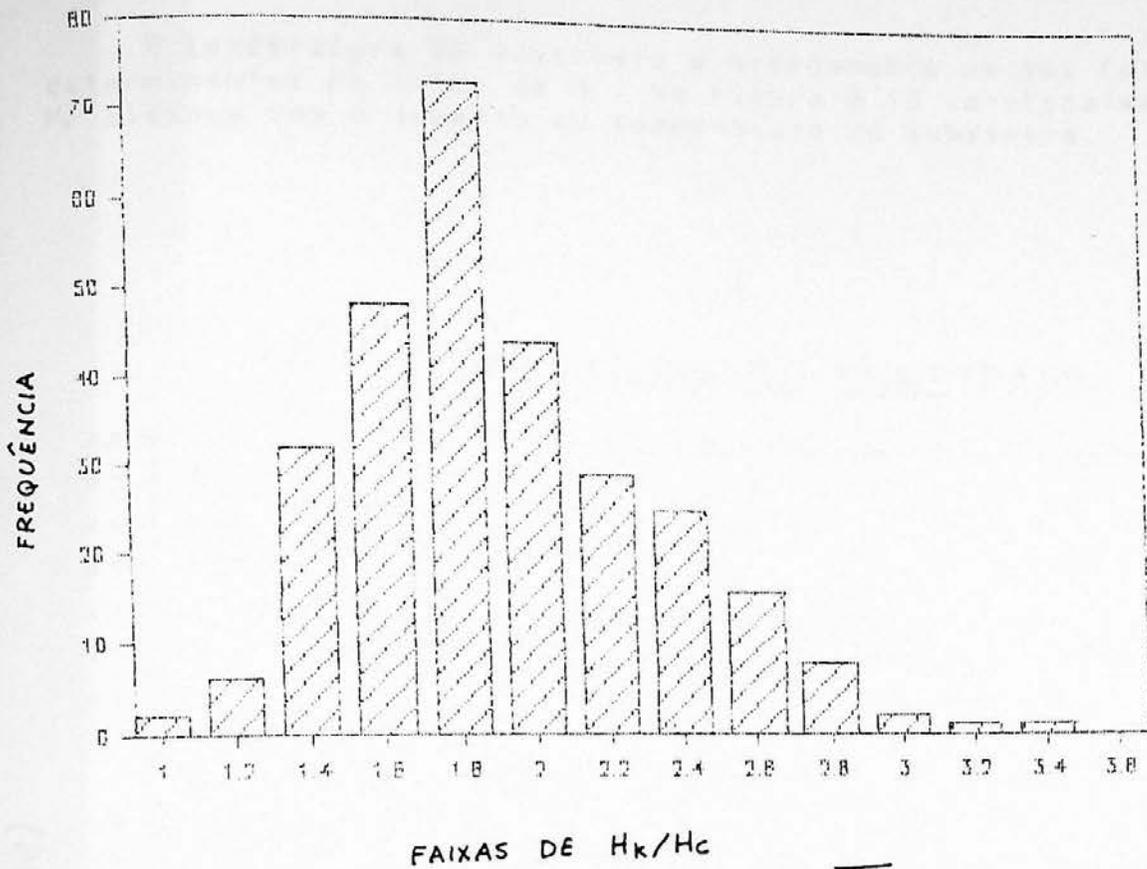
faixas de valores de H_k
(Oe)

DISTRIB. DE H_c



faixas de valores de H_c
(Oe)

Figura 6.12: Distribuição dos valores de H_k e H_c dos filmes produzidos.

DISTRIB. DE H_k/H_c 

$$\overline{\frac{H_k}{H_c}} = 1,8$$

Figura 6.13: Relação entre o campo coercivo e o campo de anisotropia.

A temperatura do substrato é nitidamente um dos fatores determinantes do valor de H_k . Na figura 6.13 verifica-se que H_k diminui com o aumento da temperatura do substrato.

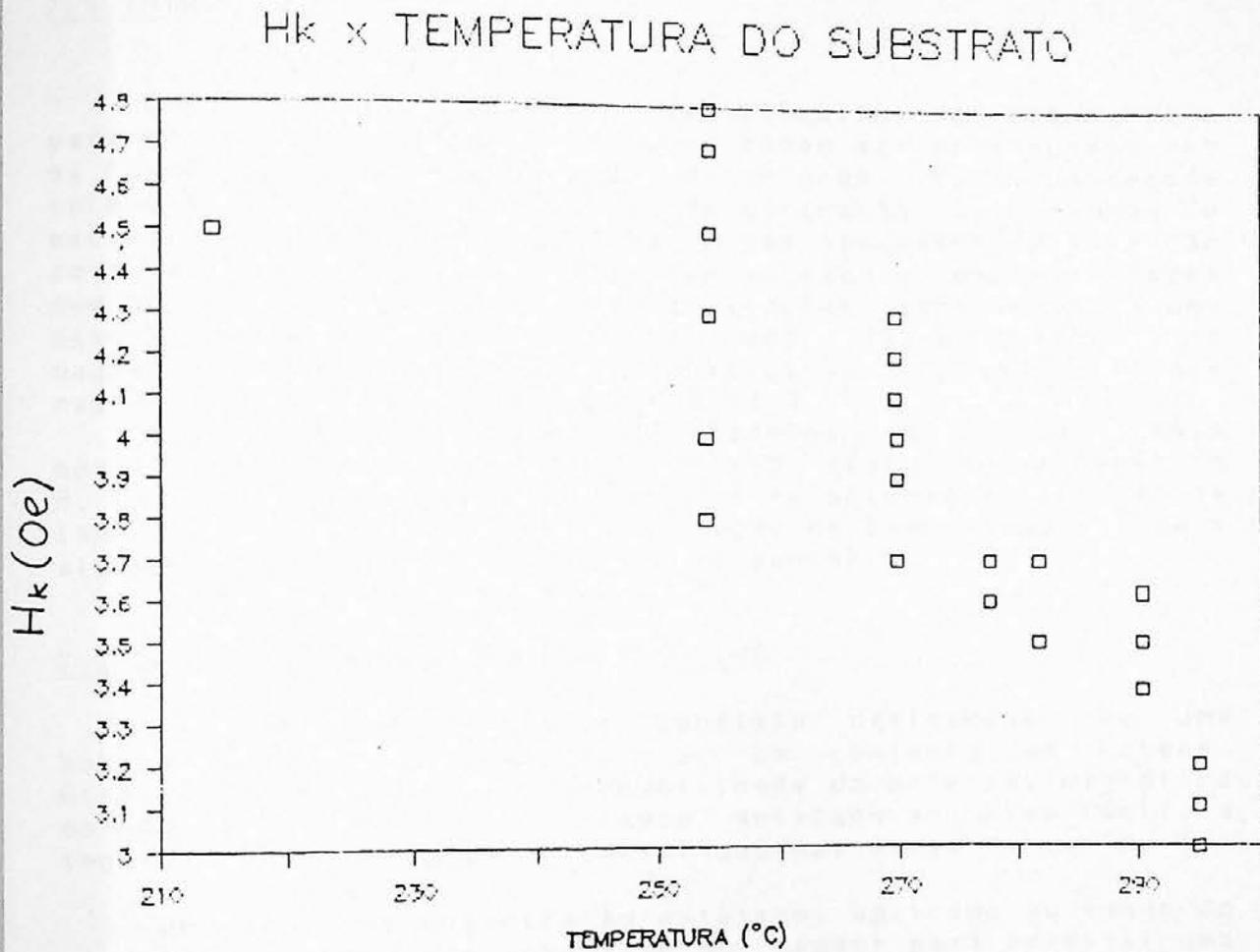


Figura 6.13: Dependência de H_k com a temperatura do substrato.

CAPÍTULO 7

O TRANSDUTOR INDUTIVO

7.1 INTRODUÇÃO

Uma grande variedade de magnetômetros de filme fino para medidas de campos magnéticos podem ser construídos com os filmes obtidos nas etapas anteriores. Esta variedade refere-se às múltiplas opções de aplicação dos campos de excitação, polarização e medida, e aos processos de extração do sinal do transdutor. Cada tipo apresenta peculiaridades que podem torna-lo único em aplicações específicas. Uma descrição sucinta de alguns dos vários tipos de magnetômetros que podem ser construídos empregando filmes magnéticos finos é dada no apêndice A.7.1.

Neste capítulo nos limitaremos a estudar mais detalhadamente o transdutor indutivo discutido no capítulo 3. Determinaremos as equações que relacionam a variação de indutância do sensor com a aplicação de campos magnéticos e algumas propriedades deste tipo de sensor.

7.2 DESCRIÇÃO DO TRANSDUTOR INDUTIVO

O transdutor indutivo consiste basicamente de uma bobina acoplada ao eixo duro de um conjunto de filmes. Através da mudança da permeabilidade do material magnético do núcleo (filmes) com o campo aplicado ao eixo fácil, a indutância do conjunto, filmes + bobina, varia.

Um campo de polarização estático, aplicado ao longo do eixo fácil, deve ser previsto no sensor para permitir uma operação estável com sensibilidade controlada. Este campo de polarização faz com que a orientação dos domínios do filme fique bem determinada e dá ao filme um comportamento magnético tipicamente de monodomínio.

A intensidade deste campo de polarização nos nossos transdutores é tipicamente um pouco maior que H_c (2 a 5 Oe). É produzido através de bobinas alimentadas por uma fonte de corrente DC ou por pequenos ímãs permanentes posicionados paralelamente ao eixo fácil. Os ímãs utilizados são pequenas hastes de CuNiFe e a geometria é calculada de maneira a otimizar a linearidade do campo de polarização sobre o filme (figura 7.1).

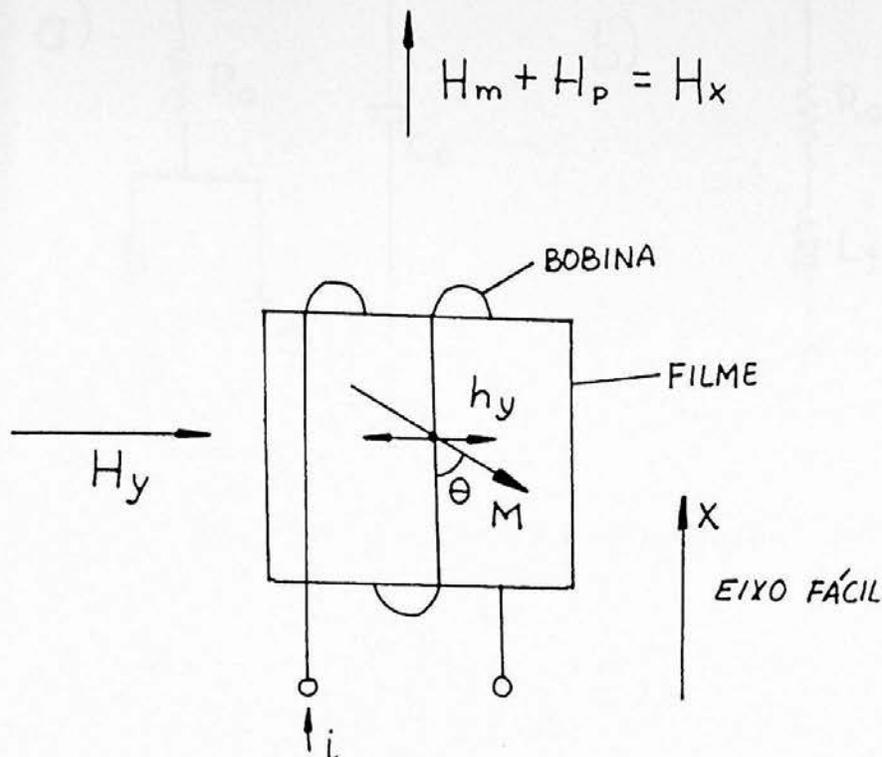


Figura 7.1: Esquema do transdutor indutivo.

7.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO TRANSDUTOR INDUTIVO

Uma representação do transdutor pode ser feita pelo seu circuito equivalente, descrito por Fussel [3.2], montado como na figura 7.2.a. C_a , L_a e R_a são respectivamente os componentes capacitivos, indutivos e resistivos referentes ao enrolamento sem núcleo. C_f , R_f e L_f os parâmetros do filme referentes respectivamente ao efeito capacitivo, às perdas irreversíveis e ao efeito indutivo do filme. As perdas no filme aumentam com a frequência de excitação devido, principalmente, à indução de correntes parasitas (o filme tem uma baixa resistividade). Operando com frequências na faixa de 10 a 20MHz e limitando o ângulo de rotação da magnetização a apenas alguns graus, minimizamos as perdas e podemos desprezar o parâmetro de perdas R_f numa análise simplificada. Como o efeito indutivo é predominante, nestas condições, desprezamos também C_f e C_a (o efeito capacitivo é mais relevante em frequências de operação mais elevadas). O circuito equivalente simplificado resume-se àquele apresentado na figura 7.2.b.

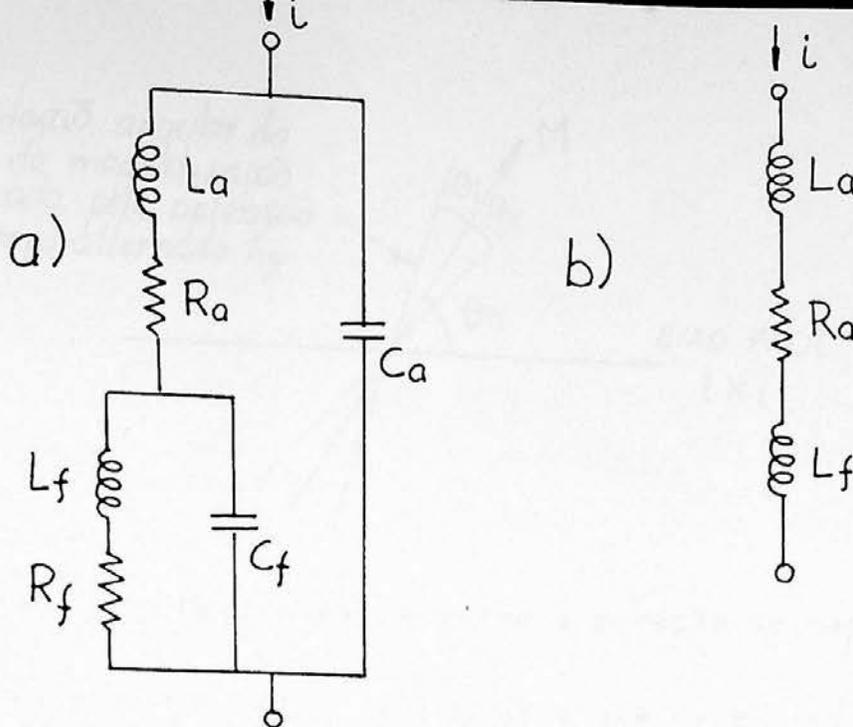


Figura 7.2: Circuito equivalente do transdutor: a) Completo; b) Simplificado.

Baseando-se no trabalho de Fussel vamos determinar o parâmetro mais importante no modelo simplificado, L_f , pois é ele que varia com os campos aplicados.

Isolando apenas o efeito do filme, podemos escrever pela lei de indução de Faraday:

$$e_r = N \cdot d\theta_w / dt ;$$

onde: θ_w = fluxo magnético ao longo do eixo duro
 e_r = tensão induzida pela variação de fluxo
 N = número de espiras do enrolamento

mas: $\theta_w = A_r \cdot M \cdot \sin\theta$

onde: A_r = Área da secção transversal do filme
 M = Magnetização de saturação
 θ = Ângulo formado entre a direcção do vetor de magnetização e o eixo fácil

então: $e_r = N \cdot M \cdot A_r \cdot \cos\theta \cdot d\theta / dt$ 7.1

O vetor de magnetização assumirá uma posição média estática, dada pelo ângulo θ_w , devido a acção dos vários campos estáticos: campo ambiente e campo de polarização. Aplicando o campo de excitação alternado (h_w) na direcção dura, a direcção do vetor de magnetização oscilará em torno de θ_w com uma amplitude que podemos representar pelo ângulo dinâmico θ_d . Na figura 7.3 temos uma representação destes ângulos.

Oscilação angular do
vetor de magnetização
provocada pela aplicação
do campo alternado h_y

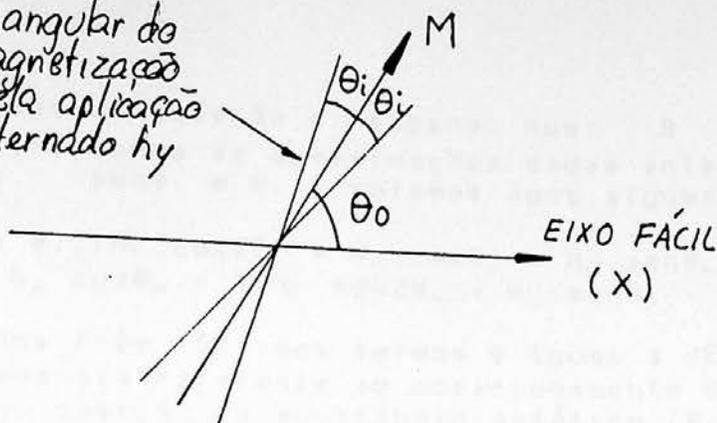


Figura 7.3: Ângulos formados entre a direção de magnetização e o eixo fácil.

Assim: $\theta = \theta_1 + \theta_0$ e $d\theta/dt = d(\theta_1 + \theta_0)/dt = d\theta_1/dt$
(θ_0 é um ângulo estático)

Reescrevendo 7.1: $e_r = N.M.A_r \cdot \cos(\theta_0 + \theta_1) \cdot d(\theta_0 + \theta_1)/dt$

$$e_r = N.M.A_r \cdot (\cos\theta_0 \cdot \cos\theta_1 - \sin\theta_0 \cdot \sin\theta_1) \cdot d\theta_1/dt$$

Impondo um sinal de excitação h_y de pequena amplitude, tal que $h_y \ll H_r$, então θ_1 será um ângulo muito pequeno:

$$\cos\theta_1 \approx 1 \quad \text{e} \quad \sin\theta_1 \approx \theta_1$$

então: $e_r \approx N.M.A_r \cdot (\cos\theta_0 - \theta_1 \cdot \sin\theta_0) d\theta/dt$
 $\approx N.M.A_r \cdot \cos\theta_0 \cdot d\theta_1/dt$

Integrando e_r no tempo, obtemos o fluxo ao longo do eixo duro:

$$\theta_1 = \int e_r dt = N.M.A_r \cdot \cos\theta_0 \cdot \theta_1 \quad 7.2$$

A constante de integração é nula, pois não há componente DC no sinal de excitação h_y .

Vamos agora analisar a equação de energia:

$$E = k \cdot \sin^2\theta - H_r \cdot M \cdot \cos\theta - (H_y + h_y) \cdot M \cdot \sin\theta$$

Derivando em relação a θ :

$$dE/d\theta = k \cdot \sin 2\theta + H_r \cdot M \cdot \sin\theta - (H_y + h_y) \cdot M \cdot \cos\theta$$

Partindo desta equação e sabendo que: $\theta = \theta_0 + \theta_1$, $H_1 = 2K/M$, e utilizando as aproximações dadas anteriormente: $\cos\theta_1 \approx 1$ e $\sin\theta_1 \approx \theta_1$; obtemos após alguma álgebra:

$$dE/d\theta \cdot 1/M = \theta_1 \cdot (H_1 \cdot \cos 2\theta_0 + H_{21} \cdot \cos\theta_0 + H_{22} \cdot \sin\theta_0) - h_w \cdot \cos\theta_0 + \frac{1}{2} H_1 \cdot \sin 2\theta_0 + H_{21} \cdot \sin\theta_0 - H_{22} \cdot \cos\theta_0$$

A soma dos três últimos termos é igual a $dE_0/d\theta_0 \cdot 1/M$, onde E_0 é a energia referente ao posicionamento do vetor de magnetização na posição de equilíbrio estático (θ_0):

$$E_0 = k \cdot \sin^2\theta_0 - H_{21} \cdot M \cdot \cos\theta_0 - H_{22} \cdot M \cdot \sin\theta_0$$

A energia estática é minimizada no ponto de equilíbrio estático:

$$dE_0/d\theta_0 = 0$$

Logo:

$$dE/d\theta \cdot 1/M = \theta_1 \cdot (H_1 \cdot \cos 2\theta_0 + H_{21} \cdot \cos\theta_0 + H_{22} \cdot \sin\theta_0) - h_w \cdot \cos\theta_0$$

Na posição de equilíbrio dinâmico:

$$dE/d\theta = 0$$

assim:

$$0 = \theta_1 \cdot (H_1 \cdot \cos 2\theta_0 + H_{21} \cdot \cos\theta_0 + H_{22} \cdot \sin\theta_0) - h_w \cdot \cos\theta_0$$

Isolando h_w :

$$h_w = \theta_1 \cdot (H_1 \cdot \cos 2\theta_0 + H_{21} \cdot \cos\theta_0 + H_{22} \cdot \sin\theta_0) / \cos\theta_0 \quad 7.3$$

A indutância devida ao filme pode ser escrita como:

$$L_r = \theta_w / i = \int e_r dt \cdot 1/i \quad 7.4$$

$$L_r = \int e_r dt \cdot C_b / h_w$$

Onde i é a corrente que origina o campo de excitação h_w :

$$h_w(t) = i(t) \cdot C_b$$

e C_b é a constante da bobina, que relaciona o campo médio produzido pela bobina e a corrente que circula pela mesma.

Substituindo na expressão de L_r (7.2) os valores de h_w (7.3) e $\int e_r dt$ (7.1), obtemos L_r em função do ângulo estático de magnetização e dos campos estáticos aplicados:

$$L_r = N \cdot A_r \cdot M \cdot C_b \frac{\cos^2\theta_0}{H_1 \cdot \cos 2\theta_0 + H_{21} \cdot \cos\theta_0 + H_{22} \cdot \sin\theta_0} \quad 7.4$$

$$\theta_0 = f(H_{21}, H_{22})$$

A função f não tem solução analítica (gráfico 2.6 do capítulo 2), portanto não podemos eliminar θ_0 de 5.5 impondo a condição que o desvio do vetor de magnetização da direção fácil, seja pequeno. Esta aproximação é válida com $H_w \ll H_k$ (campos ortogonais pequenos). Nestas condições:

$$\sin\theta_0 \approx \theta_0 \quad \text{e} \quad \cos\theta_0 \approx 1.$$

A partir da minimização da energia estática, vamos obter θ_0 em função dos campos estaticos aplicados:

$$1/M \cdot dE_0/d\theta_0 = 0 = H_k \cdot \sin\theta_0 \cdot \cos\theta_0 + H_x \cdot \sin\theta_0 - H_w \cdot \cos\theta_0 \\ \approx H_k \cdot \theta_0 + H_x \cdot \theta_0 - H_w$$

$$\implies \sin\theta_0 \approx \theta_0 \approx H_w / (H_k + H_x) \quad 7.5$$

Substituindo este resultado em 7.4, mas tomando mais um termo na expansão do cosseno de θ :

$$\cos\theta_0 \approx 1 + \theta_0^2/2$$

Lembrando que $\cos 2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$, temos:

$$L_r = N \cdot M \cdot A_r \cdot C_b \cdot \frac{(1 - \theta_0^2)}{H_k \cdot (1 - 2\theta_0^2) - H_x \cdot (1 - \theta_0^2/2) + H_w \cdot \theta_0} \quad 7.6$$

Normalizando os campos H_x e H_w em relação a H_k :

$$\bar{H}_x = H_x / H_k \quad \text{e} \quad \bar{H}_w = H_w / H_k ;$$

e substituindo a expressão para θ_0 (7.5). Obtemos a expressão de L_r em função dos campos aplicados, após reagrupar os termos e definir a constante:

$$k_0 = N \cdot M \cdot A_r \cdot C_b / H_k$$

Obs: A constante k_0 esta relacionada com a densidade de fluxo no filme e a geometria do transdutor.

A expressão de L_r em função dos campos estaticos aplicados fica:

$$L_r = k_0 \cdot \frac{(1 + \bar{H}_x)^2 - \bar{H}_w^2}{(1 + \bar{H}_x)^3 - (1 - \bar{H}_x/2) \cdot \bar{H}_w^2} \quad 7.7$$

A indutância total do transdutor será dada por:

$$L = L_a + L_r$$

$$L = L_a + K_0 \cdot \frac{(1 + \bar{H}_r)^2 - \bar{H}_r^2}{(1 + \bar{H}_r)^3 - (1 - \bar{H}_r/2) \cdot \bar{H}_r^2} \quad 7.8$$

A expressão 7.8 é a função de transferência do transdutor indutivo em relação aos campos estáticos aplicados, válida desde que H_r e $h_r \ll H_k$.

Na figura 7.4 temos uma simulação numérica do comportamento da indutância do filme com a aplicação de campos magnéticos em várias direções (solução numérica da equação 7.4 e 2.4). Observa-se que a indutância praticamente não se altera com a aplicação de campos de intensidade reduzida na direção dura. Isto indica que quando campos bem menores que H_k estão presentes, a indutância sofre principalmente a influência da componente do campo tomada sobre a direção fácil do filme utilizado como núcleo do sensor.

$$L_{f0} = L_f (\bar{H}_x = \bar{H}_y = 0)$$

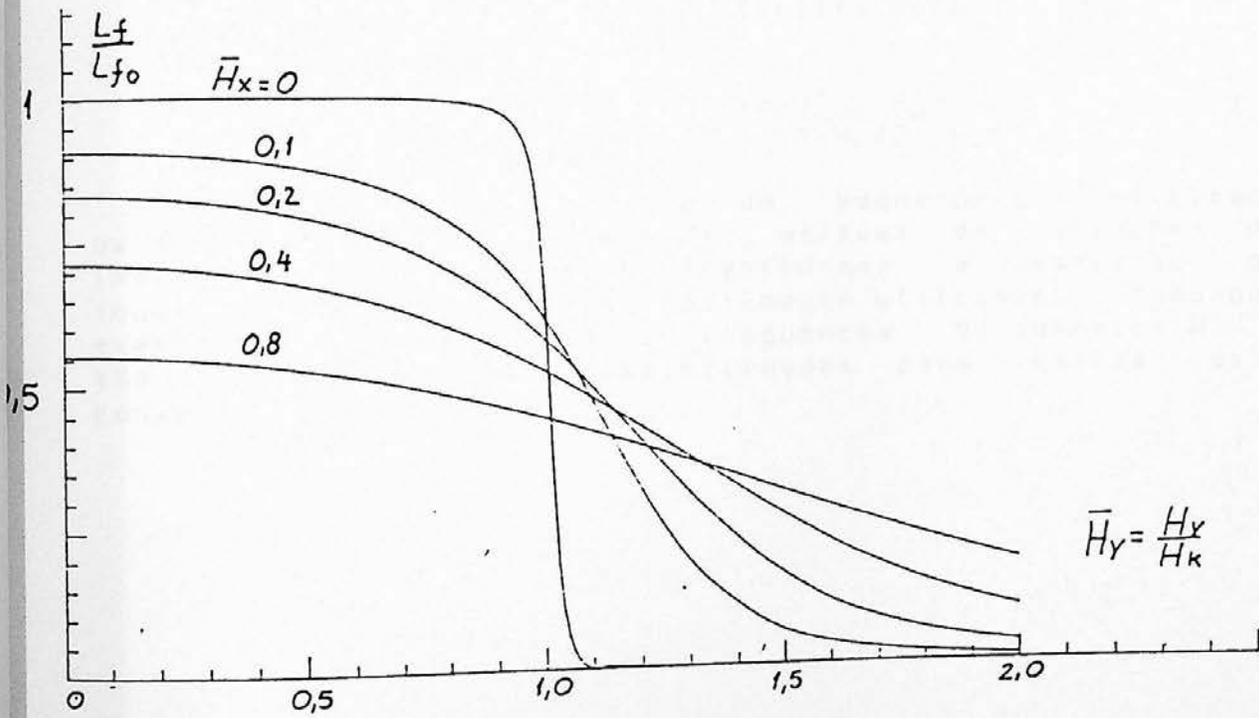
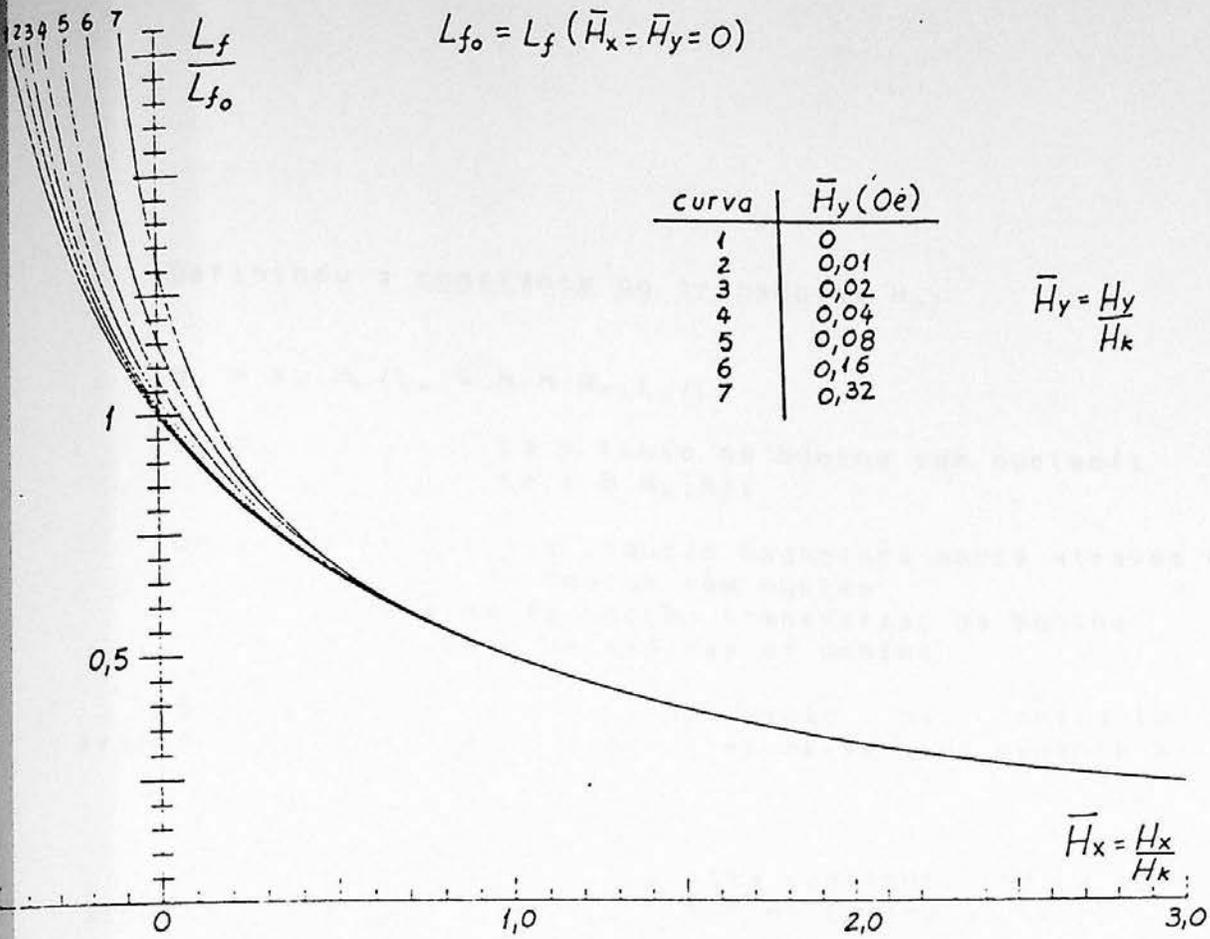


Figura 7.4: Indutância do sensor indutivo em função dos campos aplicados.

Definindo a constante do transdutor H_d :

$$H_d = K_d \cdot H_p / L_m = N \cdot M \cdot A_p \cdot C_b / L_m$$

Como: $L_a = \text{fluxo na bobina sem núcleo}/i$
 $L_a = B \cdot A_m \cdot N/i$

Onde: $B = C_b \cdot i = \text{a indução magnética média através da bobina sem núcleo}$
 $A_b = \text{area da secção transversal da bobina}$
 $N = \text{numero de espiras da bobina}$

Substituindo L_m na definição da constante do transdutor, verificamos que H_d resume-se simplesmente a:

$$H_d = M \cdot A_p / A_b$$

Nota-se claramente, que esta constante indica como é o acoplamento entre o filme e a bobina do transdutor.

A expressão 7.8 pode ser reescrita como:

$$L = L_m \left(1 + H_d \frac{(1+H_m)^2 - H_w^2}{(1+H_m)^3 - (1-H_m/2) \cdot H_w^2} \right) \quad 7.9$$

Na construção prática de um magnetômetro utilizado para medir campos magnéticos através de variações de indutância, é necessário transformar a variação de indutância num sinal mais facilmente utilizável, como por exemplo um sinal de tensão ou frequência. No apêndice A.7.2 são listadas algumas possibilidades para realizar esta conversão.

7.4 CARACTERÍSTICAS DO TRANSDUTOR

Apresentamos a seguir algumas observações quanto as características típicas deste transdutor:

a) Ortogonalidade e sensibilidade

Se o sensor não é submetido a campos na direção fácil, observa-se pela expressão 7.8, que a indutância permanece constante:

$$L(H_x, H_y=0) = L_0 + K_0 = \text{constante}$$

Pequenos campos ortogonais ($H_x \ll H_y$) não afetam o valor da indutância do sensor, indicando que este possui uma característica vetorial (sensibilidade à campos numa única direção).

Se não houver campos aplicados na direção ortogonal, podemos escrever a função de transferência como:

$$L(H_x, H_y=0) = L_0 + K_0 \cdot \frac{1}{1 + H_x} \quad 7.10$$

ou,

$$L = L_0 \left(1 + \frac{H_x}{H_p + H_x} \right) \quad 7.11$$

H_x pode ser decomposto em campo de polarização (H_p) e campo a ser medido (H_m) ao longo do eixo fácil, então:

$$L = L_0 \left(1 + \frac{H_x}{H_p + H_p + H_m} \right) \quad 7.12$$

Esta é a função de transferência de nosso transdutor (

A sensibilidade aos campos que desejamos medir (no eixo fácil) será:

$$\frac{dL}{dH_m} = -L_0 \frac{H_x}{(H_p + H_p + H_m)^2} \quad 7.13$$

No dispositivo prático temos os domínios orientados em media na direção fácil. A dispersão em torno deste valor deteriora a performance vetorial, incrementando a sensibilidade a campos ortogonais.

7.4 RUÍDO

Além dos cuidados referentes as bordas do filme e às condições de operação do transdutor (limitação da amplitude de rotações de domínio), o tamanho do filme é um dado importante na determinação do ruído. Se o tamanho do filme diminui, os efeitos do campo desmagnetizante nas bordas do filme aumentam e a área do filme sujeita a formação de domínios indesejáveis também aumenta. Isto limita a dimensão mínima do sensor, dependendo do limiar de detecção desejado. Sensores menores, com pequena relação área/perímetro, são mais ruidosos.

7.5 SENSORES CONSTRUÍDOS

Da expressão 7.13 observamos que quanto maior é H_d (melhor acoplamento entre filmes e bobina), maior será a sensibilidade do transdutor. Construímos dois tipos de sensores. O primeiro tipo foi uma réplica dos transdutores construídos por fassel em seu estudo sobre os parâmetros dos filmes. No primeiro tipo não há muitos cuidados com o acoplamento entre a bobina e os filmes, resultando num transdutor com baixo valor de H_d . No segundo tipo melhorando o acoplamento, os valores obtidos para H_d foram bem maiores. A seguir descrevemos os dois tipos construídos:

TIPO I - Composto por uma bobina com 22 espiras de fio de cobre esmaltado de #22AWG autosuportada (figura 7.5). Esta configuração permite a troca dos filmes. Valores típicos para este sensor são listados a seguir:

$$L \approx 2.5 \mu\text{H} \text{ (com polarização } \approx 4 \text{ Oe)}$$

$$H_d \approx 2 \text{ Oe}$$

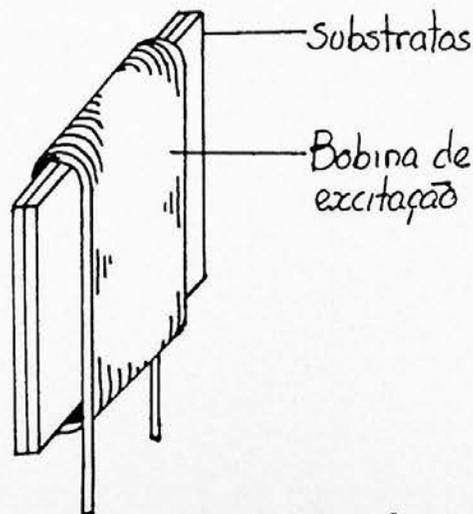


Figura 7.5: Transdutor indutivo do tipo I.

TIPO II - Permite um melhor acoplamento entre a bobina e os filmes. O suporte da bobina são os próprios condutor multifilar composto de 4 fios de cobre esmaltado #38AWG. Têm como desvantagem a possibilidade de submeter os filmes a esforços mecânicos, devido a compressão dos fios sobre os substratos.

Valores típicos deste sensor são fornecidos abaixo:

$$L \approx 2 \mu H$$

$$H_c \approx 8 Oe \text{ (com polarização } \approx 4 Oe)$$



Figura 7.6: Transdutor indutivo do tipo II.

Estes transdutores serão utilizados na construção de magnetômetros, como veremos no próximo capítulo.

CAPITULO 8

O MAGNETÔMETRO INDUTIVO DUAL8.1 INTRODUÇÃO

Os transdutores indutivos, descritos no capítulo anterior, serão empregados na construção de dispositivos destinados à medida de campos magnéticos de intensidade reduzida. Estes dispositivos (magnetômetros) são o principal objetivo dos filmes que produzimos. Estudaremos neste capítulo uma configuração particular: o magnetômetro dual. As ideias básicas deste dispositivo foram patenteadas por C. J. Bader e C. S. DeRenzi [8.1]. Esta escolha foi feita porque este tipo de magnetômetro apresenta excelentes características típicas:

- simplicidade/robustez
- baixo ruído/alta resolução (resolução $\approx 1\mu$)
- baixo consumo de energia (alguns mW)
- alta sensibilidade ($\approx 1V/Oe$)

Este tipo de magnetômetro apresenta uma configuração clássica em projetos de instrumentação. São empregados dois transdutores indutivos polarizados com campos magnéticos de sentidos opostos e excitados a partir de uma mesma fonte, que produz a corrente de RF (10 a 20 Mhz) que atravessa as bobinas de excitação dos dois transdutores. O sinal de tensão correspondentes à cada transdutor (após ser retificado) contém um nível DC modulado pelo sinal correspondente à aplicação do campo externo. O sinal de cada transdutor é somado ao do outro com sua polaridade invertida. Desta maneira se os dois transdutores são iguais, os níveis DC são cancelados entre si e os sinais referentes a aplicação do campo são somados (cada transdutor tem seu campo de polarização contrário ao do outro). O resultado é a obtenção de um sinal de saída no dispositivo, que contém unicamente a informação relativa ao campo que estamos medindo. Outra vantagem da utilização desta configuração é a minimização do ruído do magnetômetro, pois uma boa parcela do ruído do oscilador tende a se cancelar quando os sinais dos dois transdutores são combinados.

8.2 DESCRIÇÃO DO MAGNETÔMETRO

Os dois sensores, idênticos aqueles descritos no capítulo anterior, são colocados em planos paralelos e polarizados com campos estáticos de mesma intensidade, porém de sentidos opostos (figura 8.1). Esta polarização, na presença do campo que desejamos medir (o campo desconhecido H_m é medido sobre o eixo fácil dos sensores) provoca o aumento do campo aplicado ao eixo fácil de um dos transdutores ($H_{s1} = H_m + H_p$) e a diminuição do campo aplicado sobre o outro transdutor ($H_{s2} = H_m - H_p$). A indutância em cada transdutor irá variar em sentido oposto, pois: $L = L(H_{s_i})$. Num transdutor: $L_1 = L(H_m + H_p)$, no outro $L_2 = L(H_m - H_p)$.

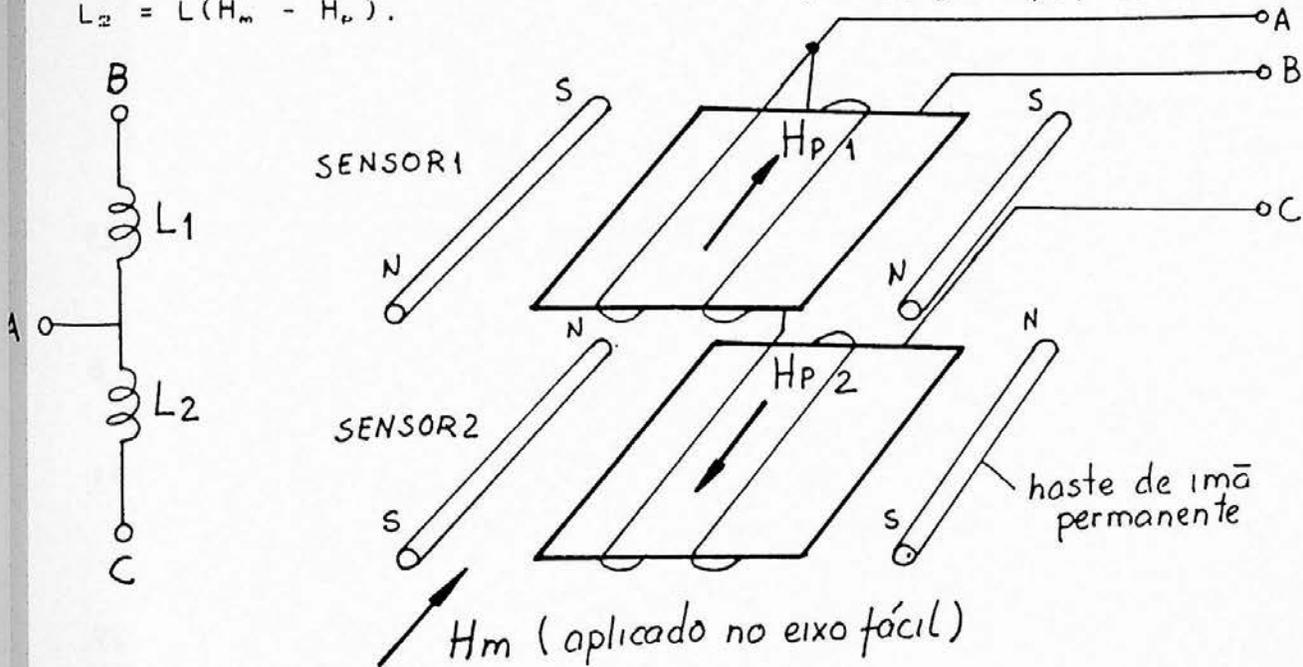


Figura 8.1: A montagem dos transdutores no magnetômetro dual.

A excitação dos dois transdutores é feita por um único oscilador (figura 8.2). Este oscilador gera uma corrente (i) de radio-frequência (10-20MHz), que circula pelos dois sensores. O sinal de tensão resultante sobre cada sensor ($v = 2\pi f \cdot L(H_{s_i}) \cdot i$) é retificado, originando um nível de tensão DC. O sinal de saída é o resultado da composição dos dois níveis DC de tensão, tomados com polaridades opostas para cada sensor. Desta maneira, na ausência de um campo externo, o sinal de tensão resultante na saída será zero. A polaridade do sinal de saída (com um campo aplicado) inverteterá, se girarmos o magnetômetro de 180°. Além da intensidade e direção, o magnetômetro também é sensível ao sentido do campo aplicado.

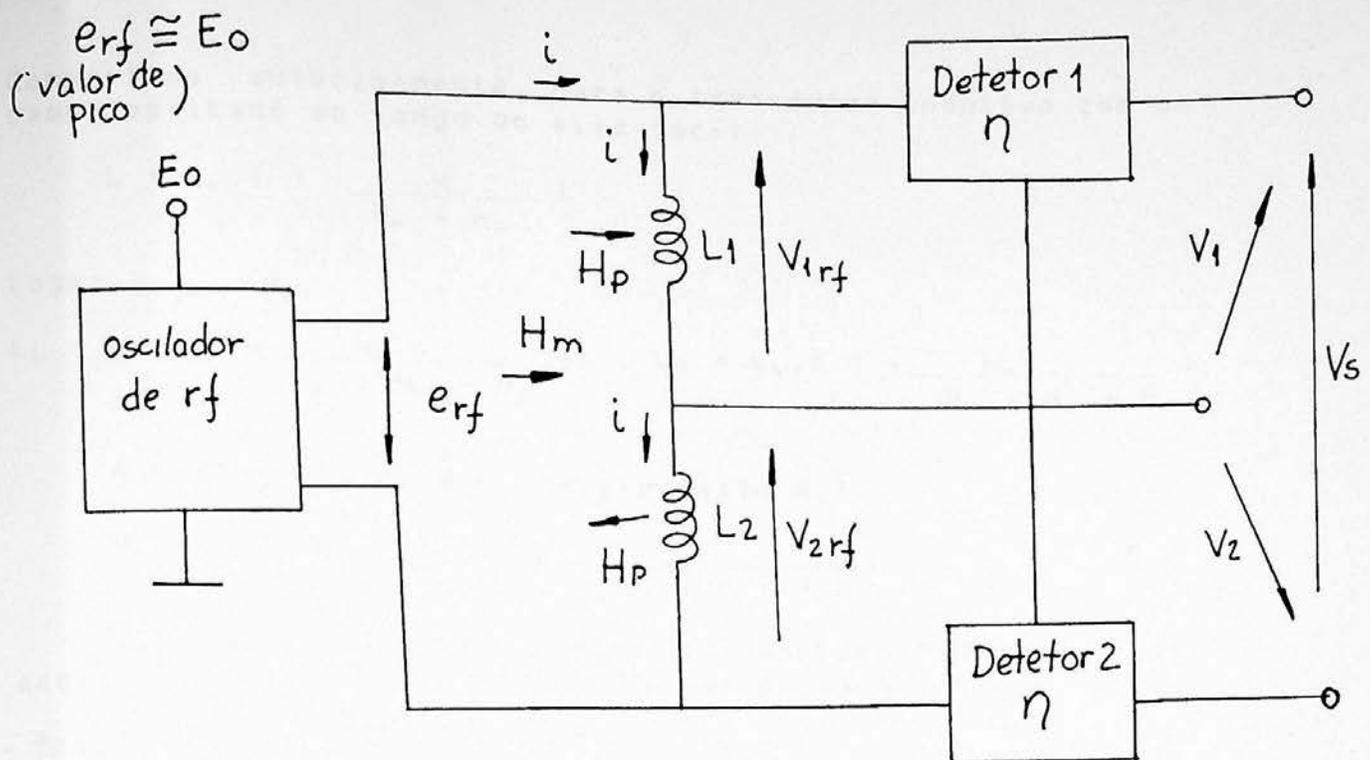


Figura 8.2: Esquema do magnetômetro dual.

8.3 FUNÇÃO DE TRANSFERENCIA

Observando a figura 8.2, podemos escrever para os dois sensores:

$$\begin{aligned} \text{sensor 1:} & \quad H_{x1} = H_p - H_m; & L_1 & = L(H_{x1}) \\ \text{sensor 2:} & \quad H_{x2} = H_p + H_m; & L_2 & = L(H_{x2}) \end{aligned}$$

$$V_1 = n \cdot e_{rf} \cdot L_1 / (L_1 + L_2)$$

$$V_2 = n \cdot e_{rf} \cdot L_2 / (L_1 + L_2)$$

$$\implies \quad V_s = V_1 - V_2 = n \cdot e_{rf} \cdot \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} \quad 8.1$$

Onde: e_{rf} = valor de pico do sinal de excitação
 \approx tensão de alimentação (com o circuito utilizado)

n = rendimento do retificador
 ≈ 1 com um detetor de pico simples

Podemos utilizar, em substituição ao detetor de pico simples, um detetor/dobrador (será descrito mais a diante). Neste caso $n=2$.

Como vimos anteriormente, para o transdutor indutivo com um campo aplicado ao longo do eixo fácil:

$$L = L_m \cdot \left(1 + \frac{H_d}{H_k + H_y} \right)$$

Logo:

$$L_1 = L_m \cdot \left(1 + \frac{H_d}{H_k + H_p - H_m} \right); \quad L_2 = L_m \cdot \left(1 + \frac{H_d}{H_k + H_p + H_m} \right)$$

Substituindo L_1 e L_2 na expressão 8.1:

$$V_m = n \cdot e_{rf} \cdot \frac{H_d \cdot H_m}{(H_k + H_p)^2 + H_d \cdot (H_k + H_p) - H_m^2} \quad 8.2$$

Na figura 8.3 temos curvas de transferência calculadas, adotando valores típicos para os vários parâmetros.

E_0 - tensão de alimentação do oscilador

$e_{rf} \cong E_0$

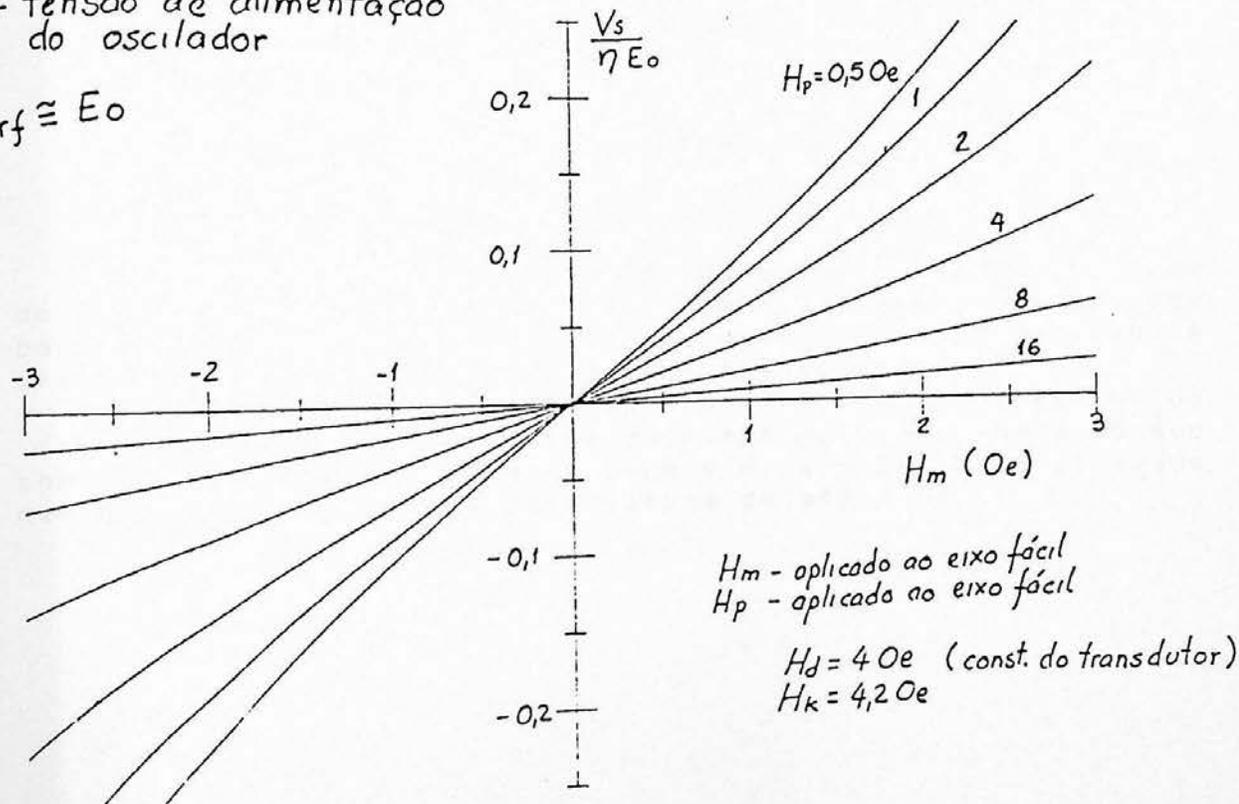


Figura 8.3: Curvas de transferência calculadas com valores típicos.

8.4 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS

a) Sensibilidade,

Para pequenos campos aplicados H_m^2 é desprezível em relação aos outros termos do denominador da função de transferência 8.2. A sensibilidade em relação aos campos que medimos no eixo fácil dos filmes é constante (para campos de pequena intensidade):

$$dV_m/dH_m = n.e_{\text{eff}} \cdot \frac{H_d}{(H_k + H_p)^2 + H_d \cdot (H_k + H_p)} \quad 8.3$$

Valores típicos para filmes e transdutores:

$$H_k \approx 4.2 \text{ Oe}; H_p \approx 2 \text{ Oe}; H_d \approx 4 \text{ Oe}$$

forneem sensibilidades típicas de 1-2 V/Oe, com a utilização do detetor/dobrador.

Na figura 8.4 temos gráficos mostrando a dependência da sensibilidade com os parâmetros H_d , H_k e H_p .

b) Linearidade

A linearidade pode ser definida como:

$$\text{linearidade} = (H_{\text{medido}} - H_{\text{real}})/H_{\text{real}}$$

O desvio da linearidade é dado pelo termo H_m^2 do denominador da função de transferência. Este termo aparece porque a variação da indutância, quando o campo aplicado é grande, não é igual em cada um dos transdutores.

Na figura 8.5 plotamos o gráfico do desvio da linearidade com a intensidade do campo aplicado. Nota-se que com valores típicos de $H_d \approx 3 \text{ Oe}$ e $H_p \approx 5 \text{ Oe}$, a linearidade mantém-se dentro de $\pm 1\%$ para campos de até 1 Oe.

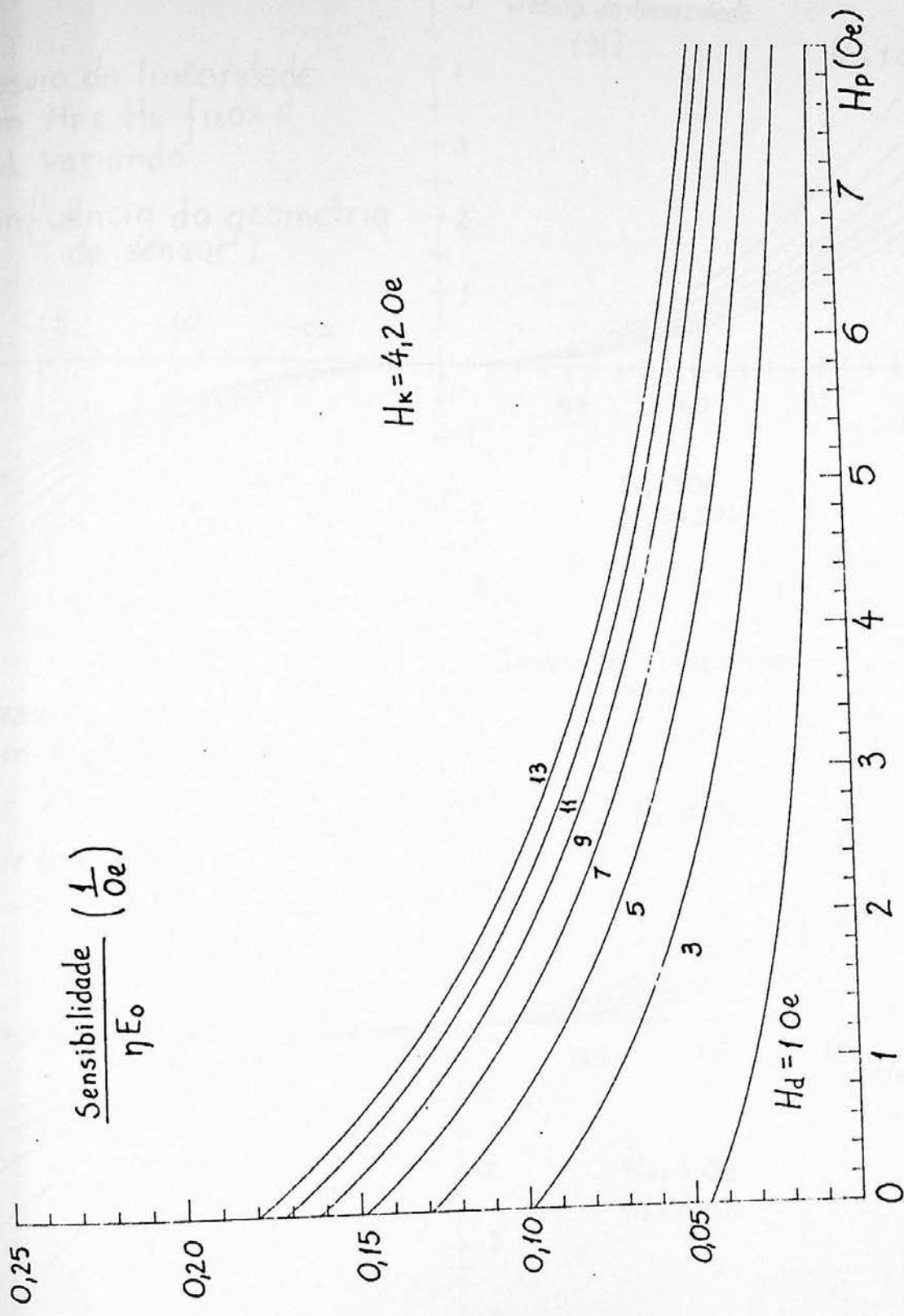
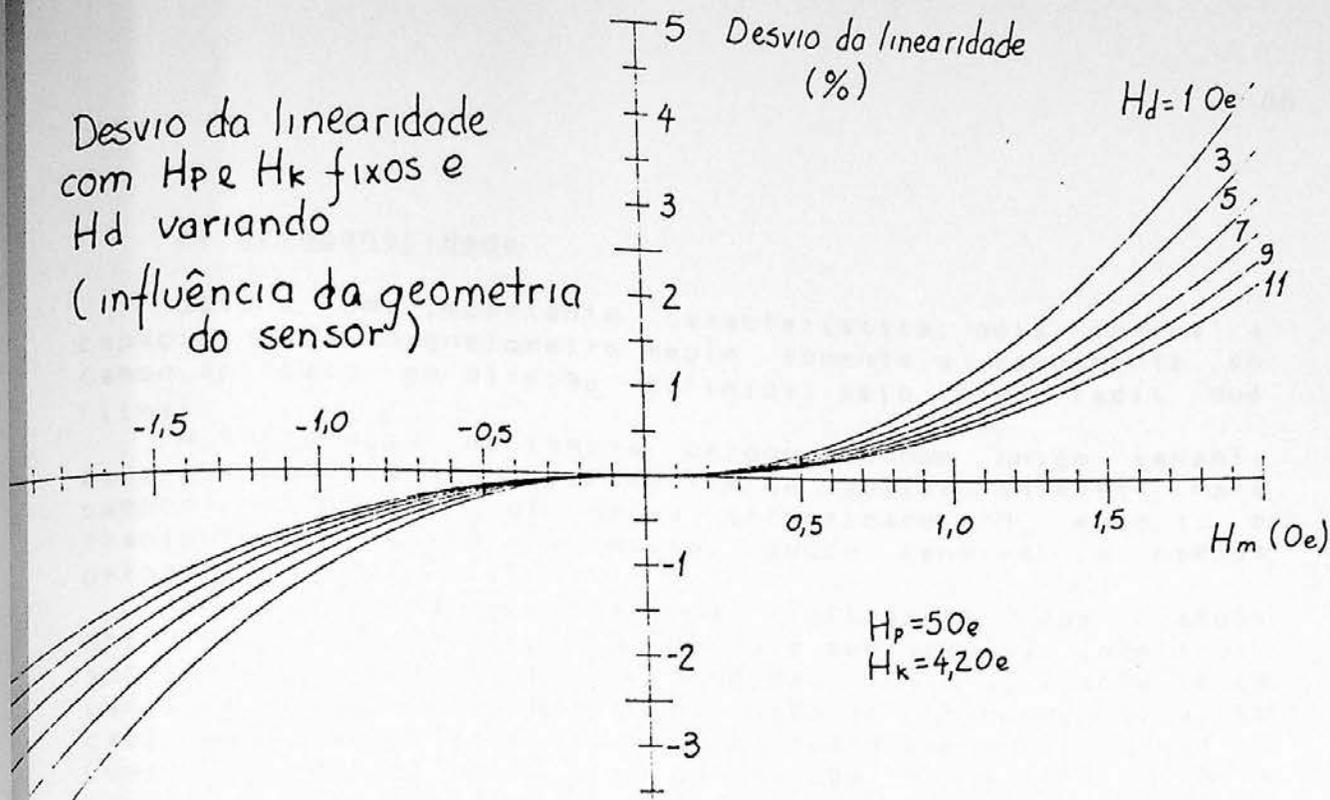


Figura 8.4: Graficos de sensibilidade em função dos parâmetros envolvidos: H_k , H_d e H_p .

Desvio da linearidade
com H_p e H_k fixos e
 H_d variando
(influência da geometria
do sensor)



Desvio da linearidade
com H_d e H_k fixos e
 H_p variando
(influência da
polarização)

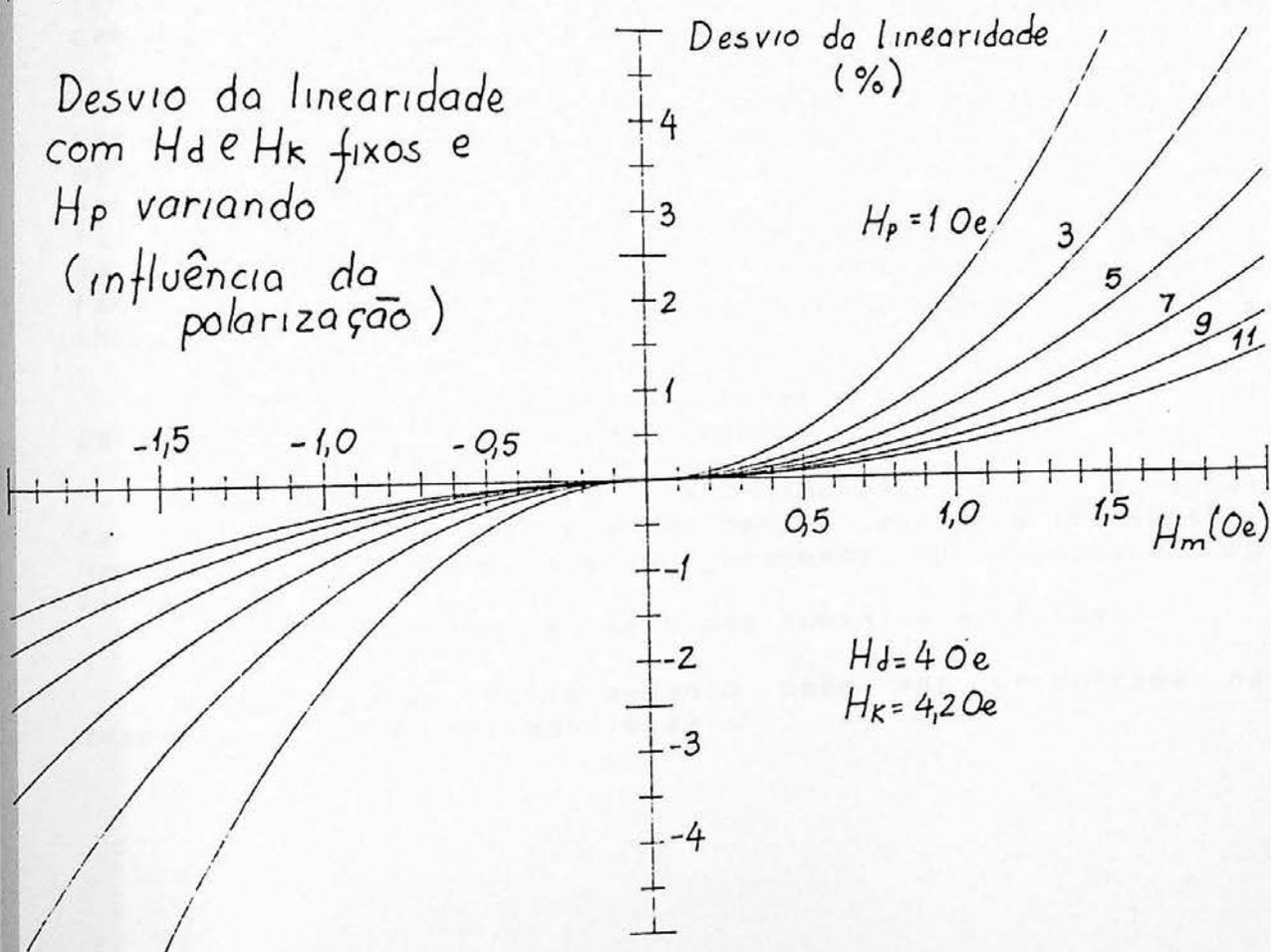


Figura 8.5: Desvio da linearidade como função do campo aplicado.

c) Ortogonalidade

Esta é uma importante característica, pois indica a capacidade do magnetômetro medir somente a componente do campo aplicado na direção definida pelo eixo fácil dos filmes.

A influência de campos ortogonais num único sensor, pode ser observada no gráfico 7.4 do capítulo anterior. Para campos ortogonais de baixa intensidade ($H_x \ll H_y$), o transdutor indutivo é muito pouco sensível a campos ortogonais.

No magnetômetro dual, a influência dos campos ortogonais é ainda menor. Se os dois sensores são idênticos, apresentam a mesma resposta ortogonal. Com a aplicação de um campo ortogonal, teremos a produção de um mesmo sinal em cada sensor (referente a aplicação deste campo ortogonal). Como o sinal de saída é a composição dos sinais dos dois sensores, tomados com polaridades inversas, o efeito do campos ortogonais tende a se anular.

Quando campos transversais muito intensos estão presentes, é necessário aumentar o campo de polarização para que o magnetômetro continue com sensibilidade reduzida a estes campos transversais. Esta conclusão pode ser verificada através da fórmula 7.9 do capítulo anterior, fazendo o campo ortogonal igual a H_x e H_y igual ao campo de polarização H_m . mais o campo que estamos medindo no eixo fácil dos filmes H_m . Observa-se nesta que se H_m aumenta, a influência de H_x diminui.

Podemos citar outros fatores que interferem na performance vetorial do magnetômetro:

- Dificuldade no alinhamento das direções características do filme e do sensor devido a imprecisões nas montagens mecânicas e no processo de fabricação do filme.
- Dispersão na orientação dos domínios do filme.

Uma discussão deste assunto pode ser encontrada no trabalho de G. R. Hoffman [8.2].

c) Ruido e resolução

O ruído impõem o limite mínimo de detecção para o magnetômetro. No magnetômetro podemos identificar duas fontes de ruído: a primeira é proporcional ao campo aplicado, a segunda é constante e independe do valor do campo aplicado.

A primeira fonte está relacionada com a diferença entre os dois transdutores. Mesmo que os dois transdutores sejam idênticos, o campo aplicado altera o valor dos transdutores em sentidos opostos, devido a polarização de sentido oposto em cada transdutor. O oscilador de RF, que supre a corrente de excitação, é uma fonte de ruído. Se os dois transdutores são idênticos o ruído gerado pelo oscilador será cancelado totalmente (a mesma corrente de excitação circula pelos dois transdutores). Quanto maior é o desbalanceamento entre os dois transdutores (desbalanceamento devido por exemplo a aplicação de um campo externo), maior será o ruído no sinal de saída. Uma escolha cuidadosa dos dispositivos semicondutores empregados no oscilador pode minimizar o problema.

A parcela de ruído que independe da aplicação de campo externo pode ter uma série de origens. Pode ser devida ao desbalanceamento dos transdutores durante sua construção, pois dificilmente são construídos com as mesmas características. Pode também ser originada nos circuitos detetores, devido principalmente aos diodos retificadores de material semicondutor. Retirando os filmes do núcleo do magnetômetro, temos que o ruído, devido apenas a eletrônica, é da ordem de alguns μV , o que num sensor com sensibilidade de $1V/Oe$ representa um ruído menor que $1r$.

Nos filmes temos a principal fonte de geração de ruído. Nestes o ruído é gerado principalmente pelos domínios orientados fora da direção preferencial da anisotropia uniaxial: domínios de fechamento nas bordas do filme, domínios de fechamento em torno de porosidades e imperfeições e a própria dispersão angular de domínios em torno da direção de orientação preferencial (fenômeno provocado principalmente pelo mecanismo de magnetostricção). Estes domínios apresentam modos de magnetização diferentes da rotação de domínios (movimento de paredes \rightarrow ruído Barkhausen). Para minimizar este tipo de ruído, devemos tomar uma série de cuidados na fabricação dos filmes: prover bordas inclinadas, garantir uma boa limpeza do substrato, usar substratos de boa qualidade para evitar a formação de porosidades e ter um filme bem uniforme, garantir uma composição química que resulte em filmes de baixa magnetostricção para evitar os efeitos nocivos desta propriedade (indução de tensões mecânicas \rightarrow formação de domínios desorientados).

A máxima frequência de detecção é limitada por perdas no filme causadas principalmente por correntes parasitas. Tipicamente os nossos transdutores podem detectar campos alternados cuja frequência seja uma ordem de grandeza menor do que a frequência do sinal de excitação. Por exemplo, com uma excitação de 10MHz, poderíamos medir campos até frequências de 1MHz. Esta é uma das características únicas deste tipo de sensor: a possibilidade de medir campos magnéticos com elevada taxa de variação.

Conjugando o ruído devido a eletrônica e aos filmes chegamos a um limite de detecção típico de 1r para uma banda passante de DC até 10Hz.

e) Consumo de potência

Outra característica única deste tipo de magnetômetro é o reduzido consumo. A pequena quantidade de material magnético no núcleo exige uma reduzida energia para sua excitação. Os circuitos eletrônicos envolvidos são muito simples, consumindo também uma potência muito reduzida. O resultado é um magnetômetro que opera com um consumo de apenas alguns miliwatts. Esta característica típica indica este tipo de magnetômetro para aplicações onde é necessária uma economia de energia: trabalho de campo alimentado por baterias, satélites de sensoriamento, etc.

8.5 OS PROTÓTIPOS DO MAGNETÔMETRO INDUTIVO

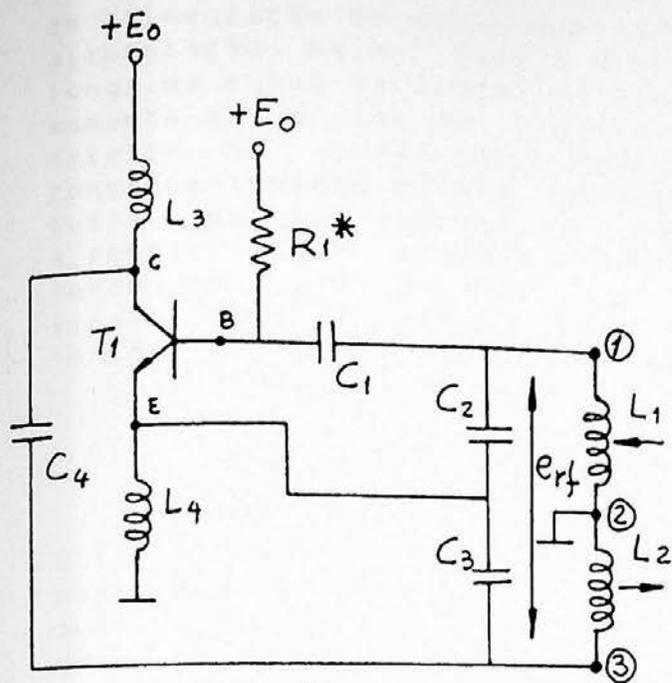
a) Circuito eletrônico

A eletrônica envolvida no magnetômetro é constituída basicamente de um oscilador de radio-frequência e de dois detetores de pico (figura 8.6). O oscilador é o clássico Colpitts, cuja frequência é determinada pelo circuito ressonante formado pelos dois sensores indutivos e os capacitores C1, C2 e C3. O detetor de pico simples pode ser substituído por um detetor/dobrador de tensão, que permite dobrar a sensibilidade, sem dobrar o ruído (o ruído será multiplicado por um fator $\sqrt{2}$; a sensibilidade, por um fator 2).

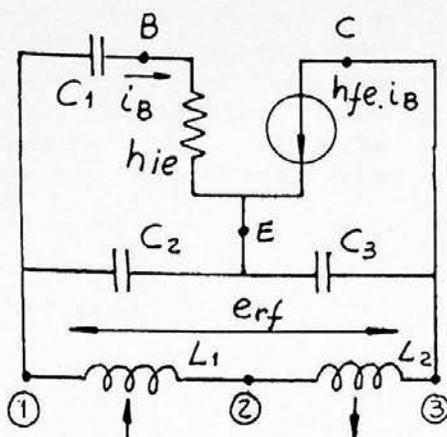
No detetor dobrador os componentes C5, C8, C7, C9, R3 e R2 formam o filtro que limita a frequência do sinal de saída e consequentemente a faixa do campo medido (DC até a frequência de corte do filtro). L₃ e L₄ isolam o oscilador, permitindo uma saída de tensão bipolar a partir de uma fonte de alimentação simples.

OSCILADOR

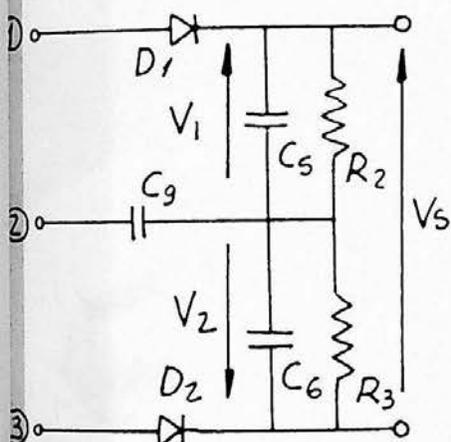
(Circuito utilizado por C.J. Bader 18.11)



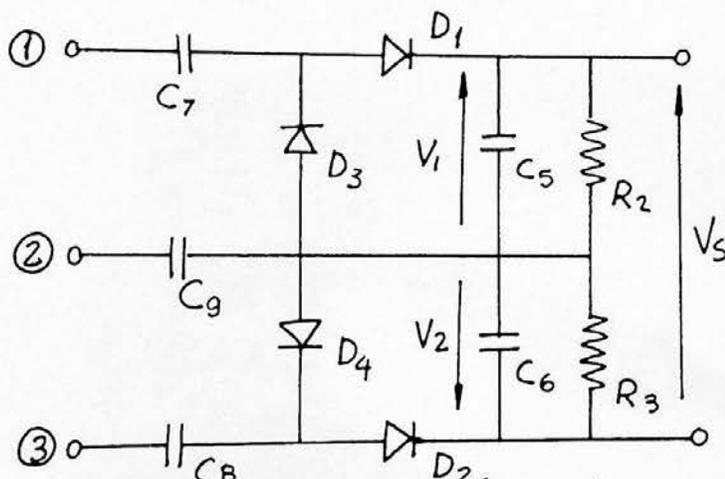
ESQUEMA ELÉTRICO



CIRCUITO HÍBRIDO EQUIVALENTE (Frequências elevadas)



DETETOR SIMPLES ($\eta = 1$)



DETETOR/DOBRADOR ($\eta = 2$)

- R1 150k Ω
- R2 470k Ω
- R3 470k Ω

- C1 47pF
- C2 220pF
- C3 27pF
- C4 1kPF
- C5 1kPF
- C6 1kPF
- C7 1kPF
- C8 1kPF
- C9 1kPF

- L1 transdutor
- L2 transdutor
- L3 100 μ H
- L4 100 μ H

- D1 1N 914
- D2 1N 914
- D3 1N 914
- D4 1N 914
- T1 BF183

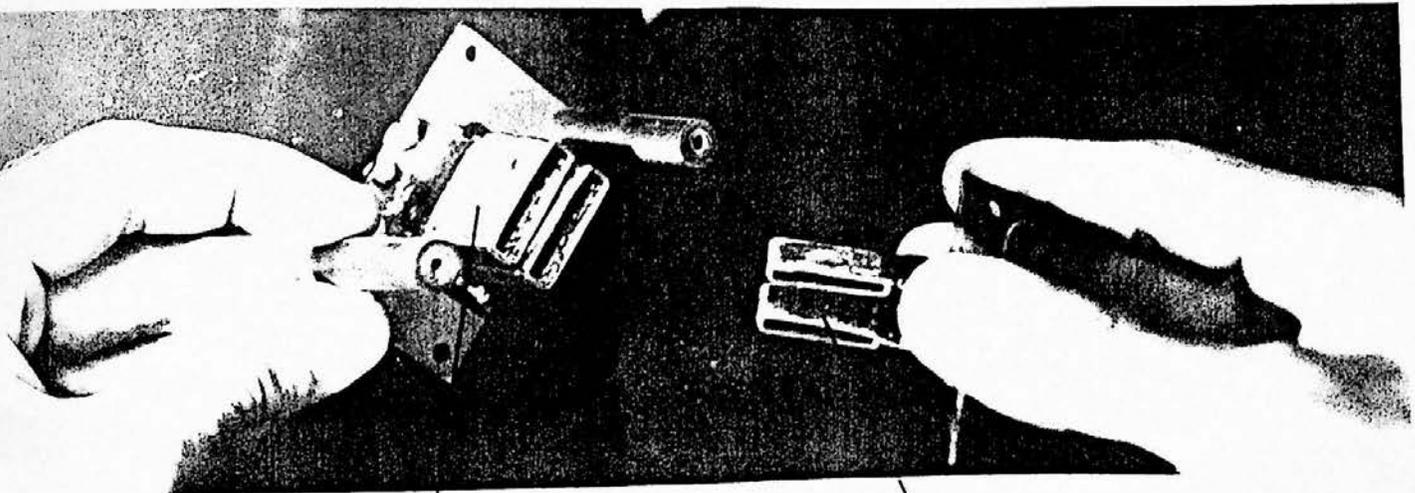
* Pode-se acrescentar em série c/ R1 um indutor de 100 μ H p/ melhorar o isolamento do oscilador

Figura 8.6: Esquema elétrico do magnetômetro dual.

Uma observação importante refere-se ao valor da tensão de alimentação do magnetômetro: quanto maior for a tensão de longo da curva de magnetização do eixo duro, isto provoca um aumento do efeito da histerese (que eventualmente possa existir na curva de magnetização do eixo duro) e conseqüentemente haverá um aumento do nível de ruído. Por outro lado, um aumento da tensão de alimentação faz com que a sensibilidade aumente (aumento do sinal de saída). Um ponto de compromisso, com a otimização da relação sinal/ruído, é obtido com o magnetômetro operando com tensões de alimentação na faixa de 3 a 9V.

b) Construção mecânica do magnetômetro dual

Foram construídas várias versões de magnetômetros utilizando o mesmo circuito eletrônico básico. O primeiro magnetômetro construído utilizava transdutores de bobinas autosuportadas (transdutor tipo I) e campos de polarização gerados por um conjunto de bobinas que envolve os transdutores. Esta montagem permite a troca dos filmes e a variação do campo de polarização, permitindo um estudo da influência dos filmes e do campo de polarização no desempenho do magnetômetro. Na figura 8.7 temos o magnetômetro descrito acima.



bobinas para gerar o campo de polarização (campo estático)

bobinas autosuportadas que produzirão o campo de excitação das filmes (campo alternado - rf)

Figura 8.7: Protótipo do magnetômetro dual do primeiro tipo com campo de polarização variável e transdutor com bobina de excitação autosuportada (tipo I).

O segundo protótipo construído também possuía transdutores do tipo I (bobina autosuportada), porém o campo de polarização era fixo e produzido por pequenas hastes de ímã permanente. Os ímãs de CuNiFe foram dispostos de maneira a homogeneizar o campo de polarização sobre os transdutores. O magnetômetro foi montado sobre uma base de fenolite, para obter uma montagem mecânica robusta. Na figura 8.8 temos este protótipo.

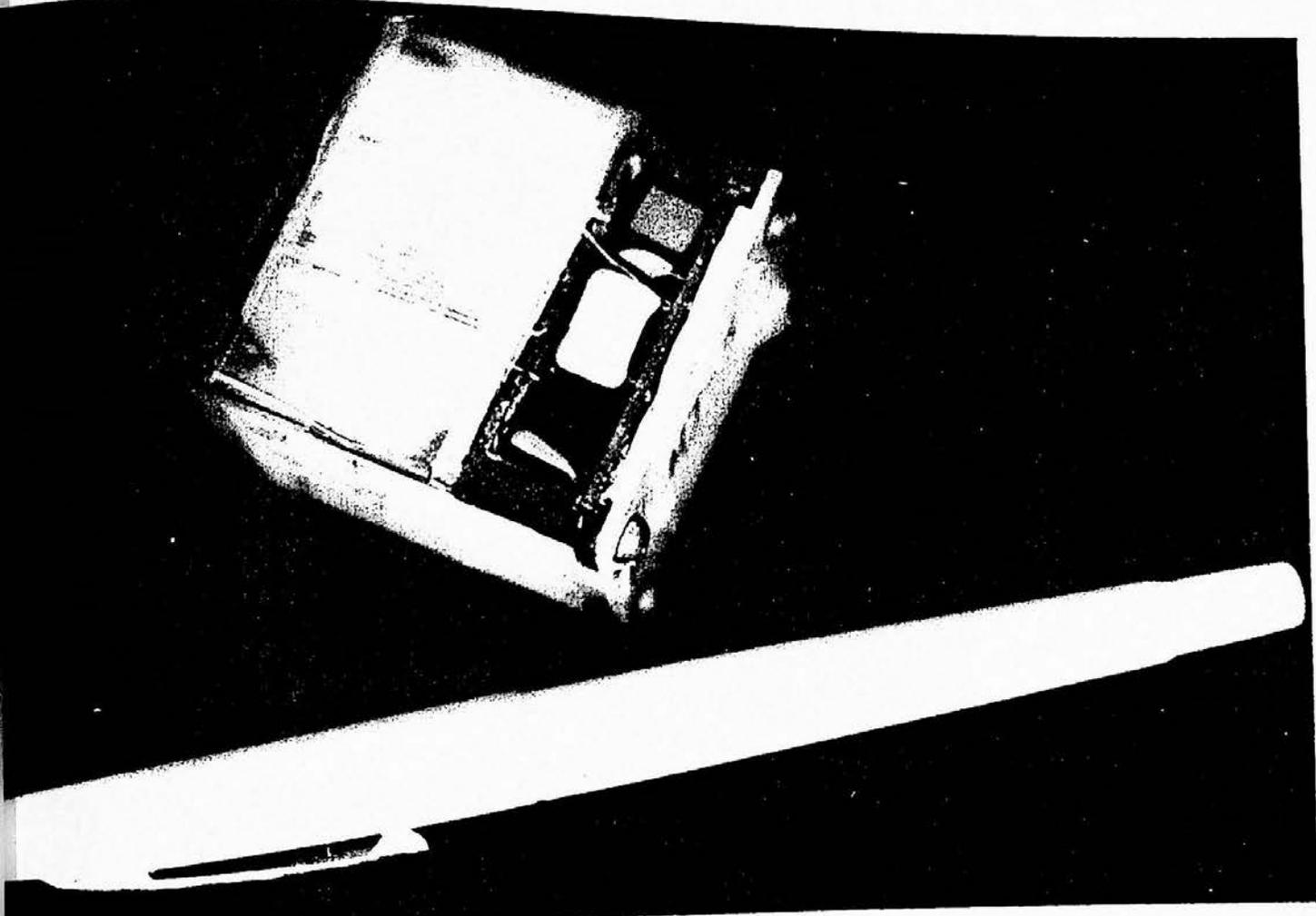
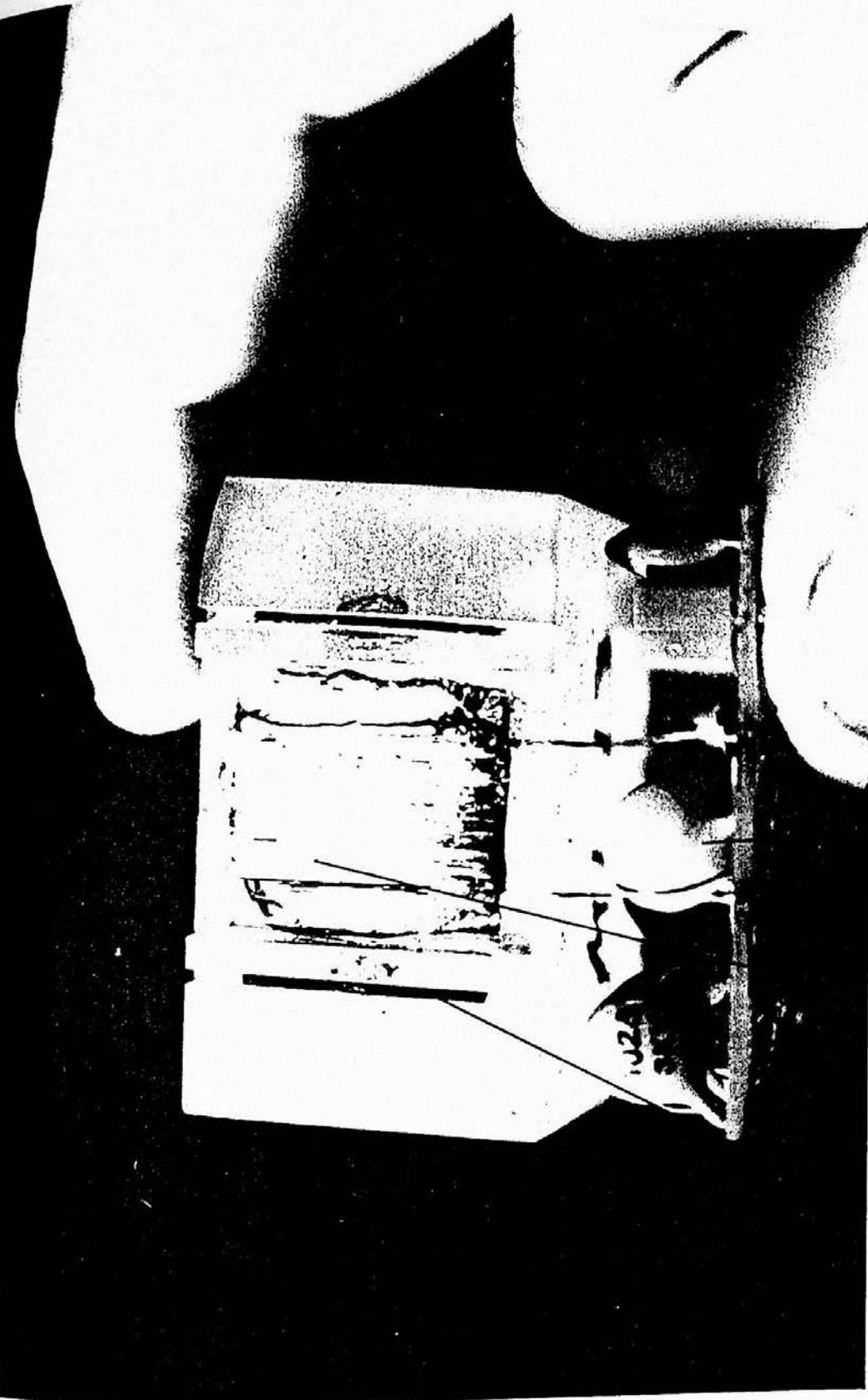


Figura 8.8: Protótipo de magnetômetro dual do segundo tipo, com campo de polarização produzido por ímãs permanentes e transdutor de bobina de excitação autosuportada (tipo I).

O terceiro tipo de protótipo desenvolvido, utiliza transdutores do tipo II (bobina de excitação enrolada diretamente sobre os substratos) e campo de polarização gerado por ímãs permanentes. O magnetômetro é montado sobre um suporte de acrílico, como mostrado na figura 8.9.

OBS: Na parte posterior do magnetômetro mostrado acima, há outro transdutor magnetoindutivo idêntico ao que se pode observar na face visível do dispositivo.



OBS: Na face posterior
há o outro transdutor
(idêntico)

placa com o oscilador
e os detectores

bobina de
excitação
com os filmes

ímã permanente
de polarização

Figura 8.9: Prototipo de magnetômetro dual do terceiro tipo, com polarização por ímãs permanentes e transdutores com bobinas de excitação enroladas sobre o próprio substrato (tipoll).

A ideia final era de encapsular os magnetômetros em resinas plásticas para dar-lhes a devida proteção. Um protótipo chegou a ser encapsulado em Araldite, mas apresentou muito ruído devido às contrações da resina. O material de encapsulamento deve ser escolhido de maneira a não submeter os filmes à esforços mecânicos com mudanças de temperatura ou pelo seu processo de solidificação.

c) Resultados obtidos

Foram construídos vários protótipos: 1 do primeiro tipo, 2 do segundo tipo, 10 do terceiro tipo e 1 encapsulado. Nos restringiremos aqui, apenas a apresentar alguns resultados típicos destes magnetômetros.

A montagem experimental empregada para avaliar o desempenho dos magnetômetros é mostrada na figura 8.10.

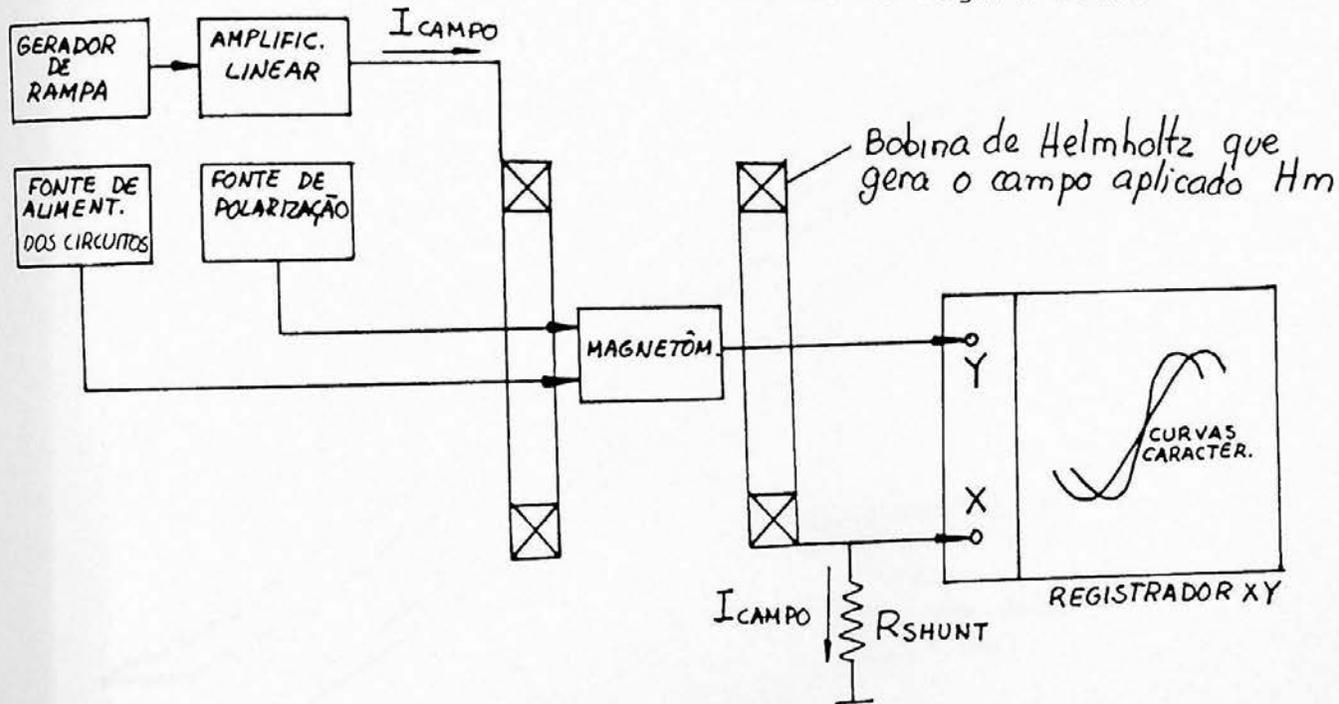


Figura 8.10: Montagem experimental para avaliação do desempenho dos magnetômetros.

CURVAS DE TRANSFERÊNCIA CARACTERÍSTICAS

Na figura 8.11 podemos observar o comportamento do sinal de saída em relação à campos aplicados na direção fácil dos magnetômetros. Nas curvas do primeiro protótipo vemos a influência do campo de polarização no sinal de saída. A segunda curva refere-se a um protótipo do segundo tipo e a curva inferior e uma curva tipicamente observada em protótipos do terceiro tipo.

Podemos saber, preliminarmente, que um magnetômetro é ruidoso se sua curva característica apresentar histerese. A curva característica de um magnetômetro muito ruidoso pode ser vista na figura 8.12. A histerese na curva característica é provocada por transdutores construídos com filmes que apresentam a indesejável histerese na curva de magnetização do eixo duro (filmes com dispersão de domínios).

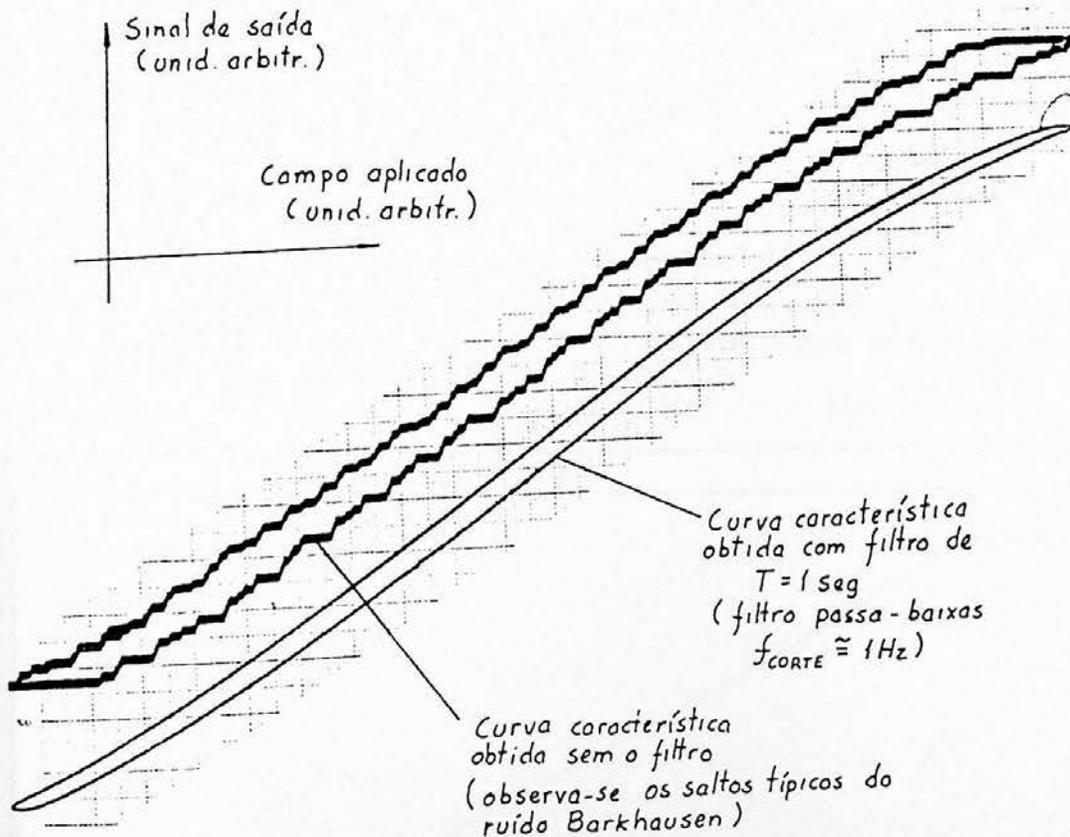


Figura 8.12: Curvas características de um magnetômetro ruidoso.

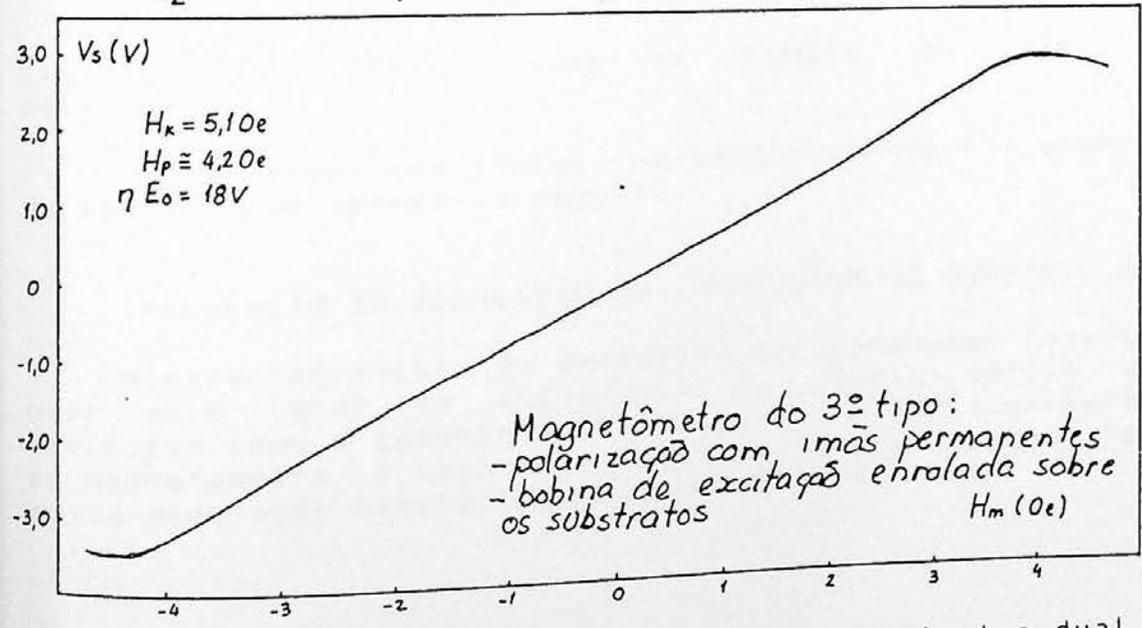
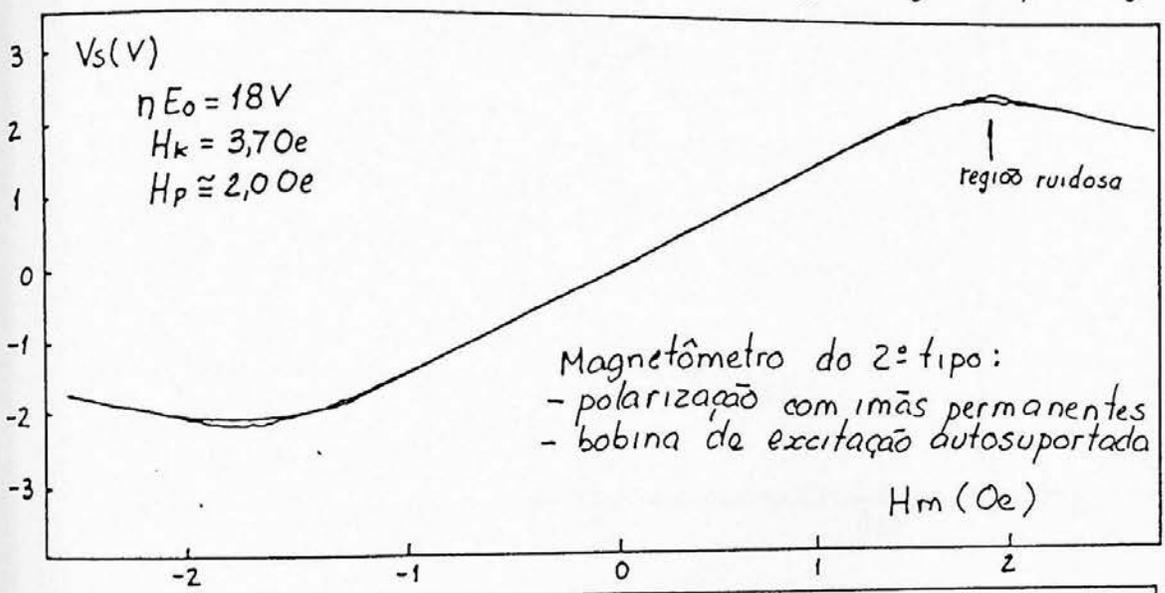
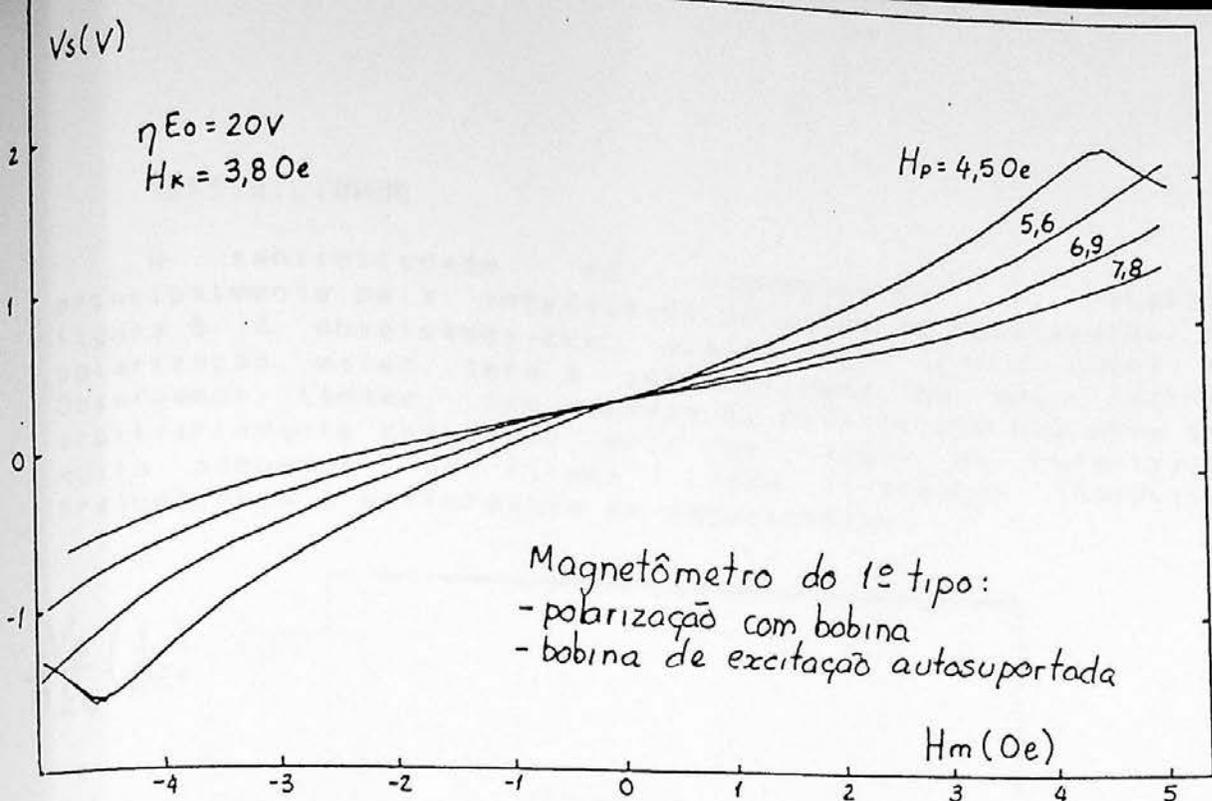


Figura 8.11: Curvas características do magnetômetro dual.

SENSIBILIDADE

A sensibilidade do magnetômetro é afetada principalmente pela intensidade do campo de polarização. Na figura 8.13 observamos que, quanto menor for o campo de polarização, maior será a sensibilidade do magnetômetro. Observamos, também, que o campo de polarização não pode ser arbitrariamente reduzido, pois com campos de polarização muito pequenos os filmes ficam totalmente instáveis, prejudicando a performance do magnetômetro.

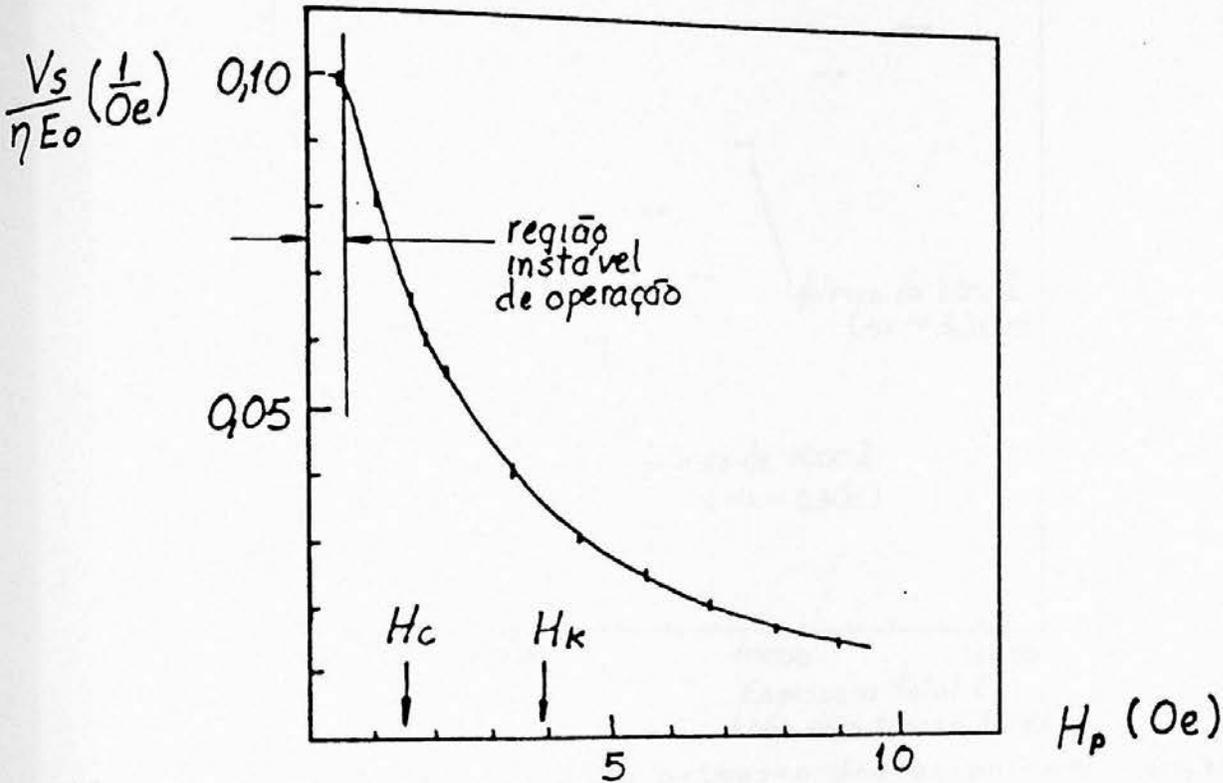


Figura 8.13: Sensibilidade em função do campo de polarização.

Outro fator que influi na sensibilidade é a geometria do sensor como veremos a seguir.

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO TRANSDUTOR NA SENSIBILIDADE

A caracterização da geometria do transdutor indutivo é dada pelo fator do transdutor H_d . Nesta seção vamos verificar como a geometria do transdutor afeta a performance do magnetômetro e usar os resultados obtidos para testar nossa modelagem matemática do magnetômetro.

Uma sequência interessante, utilizando o primeiro interior de cada transdutor como a quantidade de filmes no magnetômetro (figura 8.14).

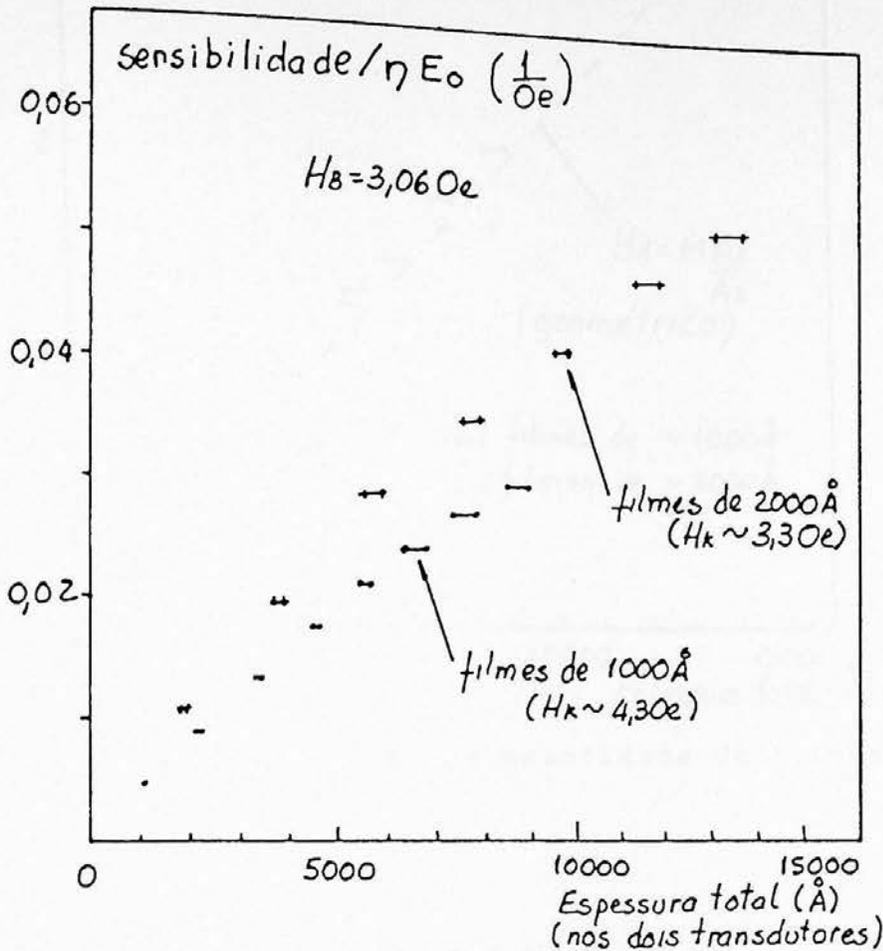


Figura 8.14: Sensibilidade do primeiro protótipo como função da quantidade de filmes.

Neste magnetômetro a bobina de excitação tem uma secção transversal constante ($A_b = \text{constante}$), o que implica num aumento do valor do fator do transdutor H_d com o aumento da quantidade de filmes (A_r crescente).

Com os dados do gráfico anterior podemos construir um novo gráfico, mostrando a dependência do fator do transdutor H_d com a quantidade de filmes utilizados nos transdutores. Para isto, utilizamos a expressão abaixo, originada da expressão 8.3:

$$H_d = \frac{\text{sensibilidade} \cdot (H_r + H_p)^2}{n \cdot e \cdot r - \text{sensibilidade} \cdot (H_r + H_p)}$$

Plotando os dados experimentais, temos o gráfico da figura 8.15.

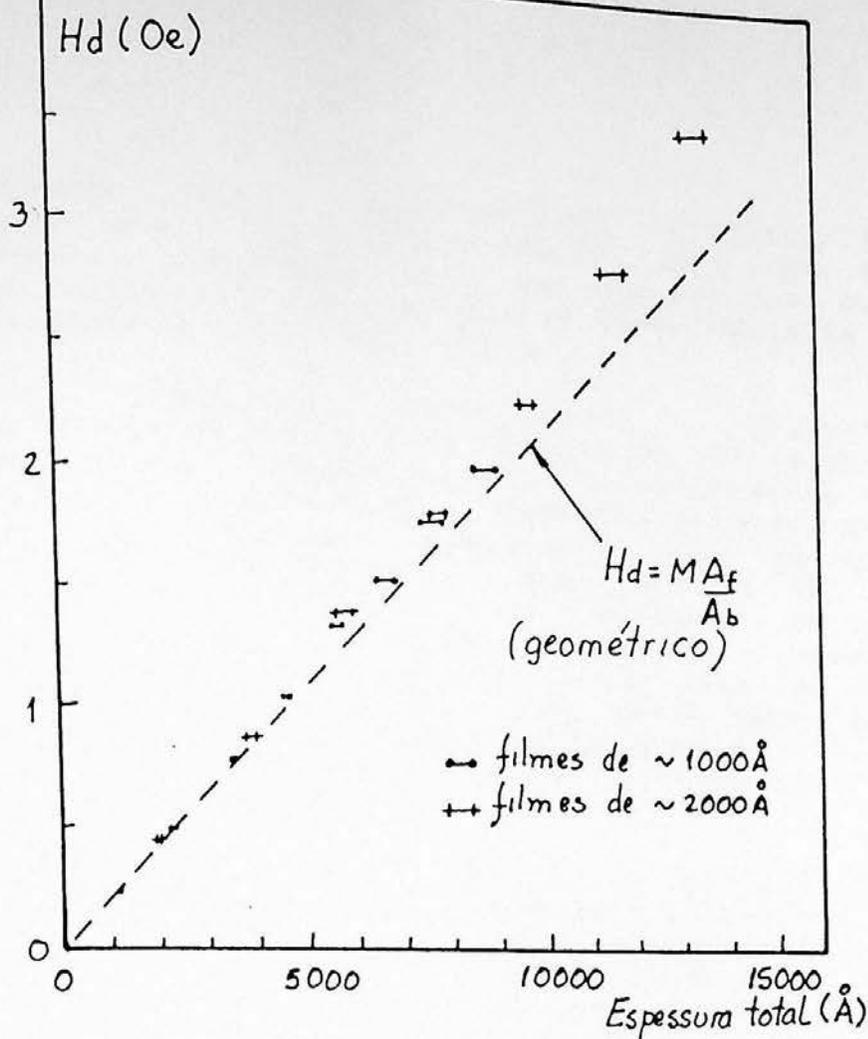


Figura 8.15: H_d em função da quantidade de filmes nos dois transdutores.

Lembrando que:

$$H_d = M \bar{A}_f / \bar{A}_b$$

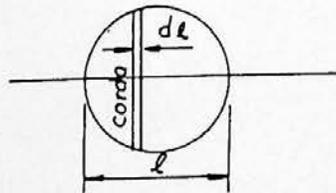
Onde: \bar{A}_b = área da secção transversal da bobina
 $= 42 \text{ mm}^2$

\bar{A}_f = área da secção transversal dos filmes

M = magnetização de saturação
 $\approx 10000 \text{ Gauss}$

Como o filme é circular ($\emptyset = 15 \text{ mm}$), determinamos uma largura média dada por:

$$\text{largura média} = \left(\int_0^l \text{corda } dl \right) / l$$



e escrevemos: $\bar{A}_f = (\text{largura média}) \cdot \delta_f$; onde δ_f é a espessura do filme. H_d fica, então:

$$H_d = 2,19 \cdot 10^{-4} \cdot \delta_f$$

Com H_d em Oe e δ_f em angstroms

Plotando este resultado no gráfico anterior, verificamos uma concordância muito boa com os dados experimentais, indicando que os resultados de nossa modelagem matemática do dispositivo estão bastante próximos do que se observa experimentalmente.

Outro resultado interessante, refere-se aos magnetômetros do terceiro tipo (bobina de excitação enrolada diretamente sobre os substratos - transdutores do tipo II). Observando-se a figura 8.16, temos que é inútil aumentar a quantidade de filmes para aumentar o valor de H_d , se a relação entre a espessura do substrato e do filme se mantiver constante. Neste tipo de transdutor, se desejarmos aumentar o valor de H_d , devemos diminuir a espessura do substrato ou aumentar a quantidade de material depositado sobre o mesmo substrato. Na figura 8.17 temos os valores experimentais de H_d , em função da relação entre a espessura do substrato e a espessura do filme, obtidos para uma série de prototipos do terceiro tipo.

Numericamente podemos construir o gráfico da figura 8.18, que mostra a dependência da sensibilidade com o fator do transdutor H_d . Observa-se que esta dependência apresenta uma característica assintótica, indicando que um esforço exagerado para aumentar H_d , não vale a pena do ponto de vista do aumento da sensibilidade. Nossos transdutores (com bobina de excitação enrolada diretamente sobre os substratos) já apresentam valores de H_d bem otimizados neste aspecto.

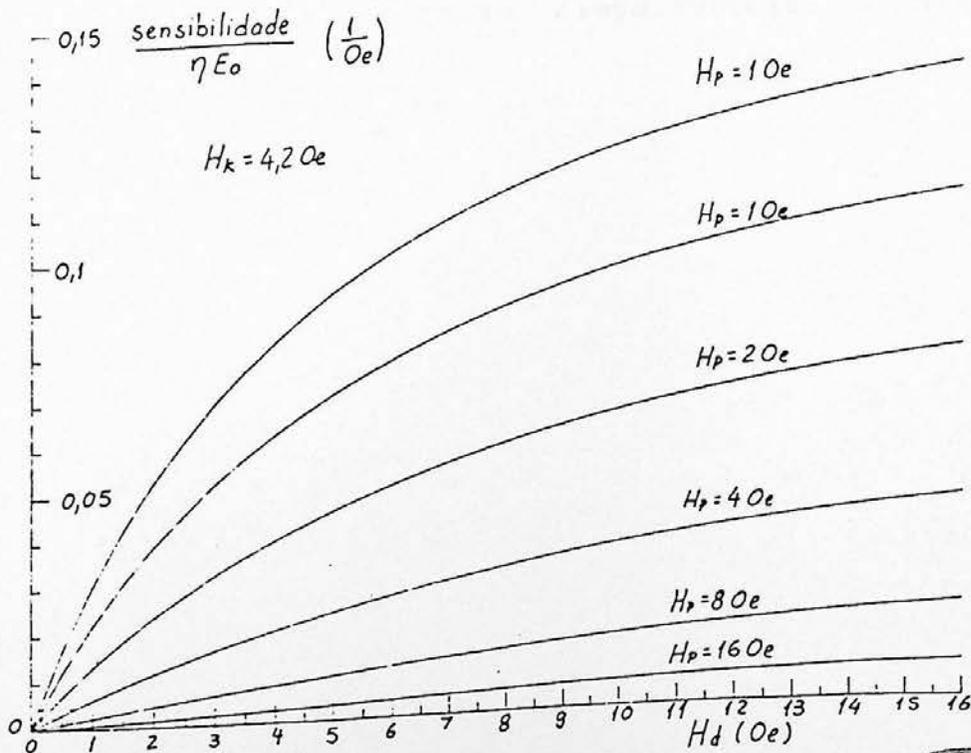


Figura 8.18: Sensibilidade em função de H_d .



Um problema que tivemos com transdutores desse tipo foi a produção de muito ruído quando utilizávamos filmes magnetostrictivos. Isto acontece, pois o enrolamento acaba comprimindo os substratos e o esforço mecânico, aliado a magnetostricção, desorienta os domínios do filme. A solução deste problema consiste em enrolar cuidadosamente a bobina de excitação do transdutor, de maneira que seus fios não fiquem tracionados.

ORTOGONALIDADE E LINEARIDADE

Foram realizados alguns testes de linearidade com o magnetômetro do primeiro tipo, mostrando a influência do campo de polarização (figura 8.19). Observa-se que para pequenos campos aplicados o desvio da linearidade é muito pequeno, porém com o aumento da intensidade destes campos, os dois transdutores que compõe o magnetômetro ficam progressivamente mais desbalanceados ($dL_1/dH_m \neq dL_2/dH_m$) e a linearidade é progressivamente deteriorada. Para ampliar a faixa linear de utilização do magnetômetro devemos aumentar a intensidade do campo de polarização, como já vimos anteriormente, quando calculamos teoricamente o desvio da linearidade.

Na figura 8.20 temos o sinal de saída do magnetômetro sujeito a influência de um campo aplicado na direção ortogonal a sua direção normal de medida. Observa-se que quanto maior é o campo de polarização, menor é a sensibilidade do magnetômetro ao campo aplicado na direção ortogonal.



Figura 8.20 - Sinal de saída do magnetômetro sujeito a influência de um campo aplicado na direção ortogonal a sua direção normal de medida.

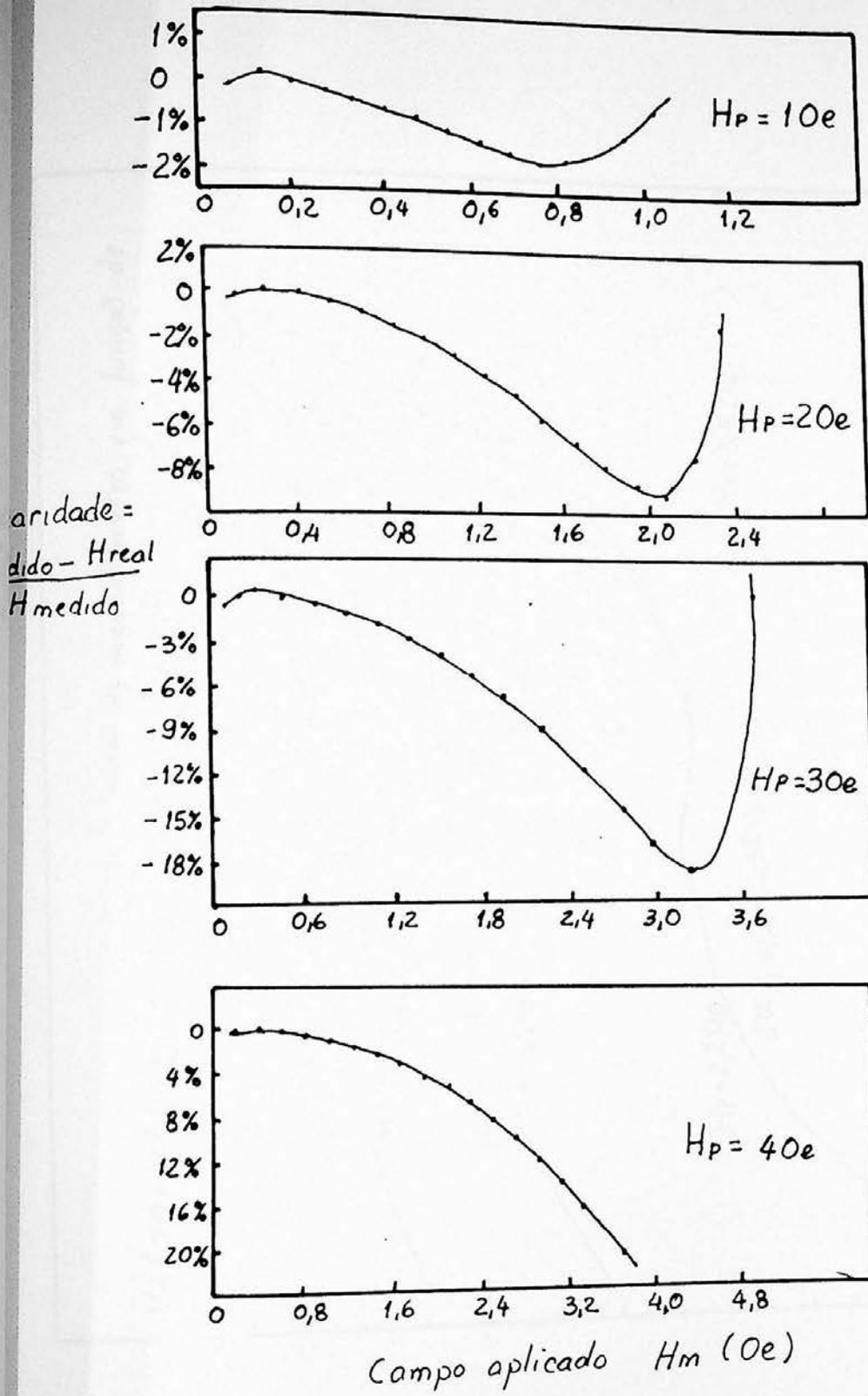


Figura 8.19 : Linearidade para vários campos de polarização.

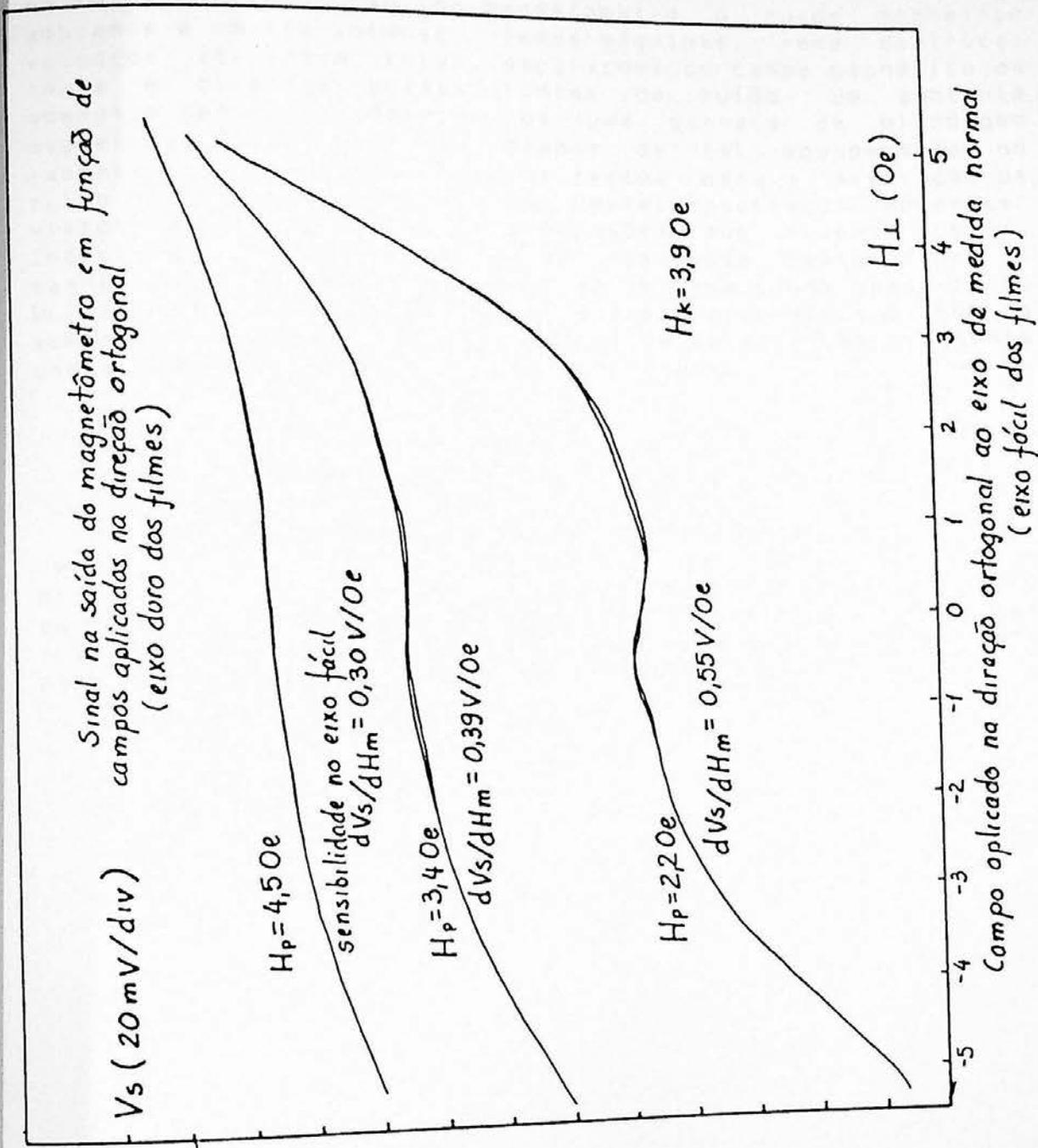


Figura 8.20: Influência de campos ortogonais.

RUÍDO/RESOLUÇÃO

A medida de ruído apresenta grandes dificuldades pois na faixa de resolução do magnetômetro o ruído magnético ambiente é muito intenso. Temos máquinas, rede elétrica, veículos, atividade solar, oscilações do campo magnético da terra e diversas outras fontes de ruído. Um ambiente adequado seria o interior de uma garrafa de blindagem magnética. Apesar de não dispor de tal equipamento no laboratório, realizamos alguns testes para a avaliação de ruído no magnetômetro. Alguns destes resultados podem ser vistos na figura 8.21. As conclusões que pudemos obter, indicam que o limite mínimo de resolução deste tipo de magnetômetro situa-se em torno de 1r, com banda passante de DC até 10Hz. Nota-se também que o ruído diminui com o aumento da intensidade dos campos de polarização e aumenta com o desbalanceamento entre transdutores.

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

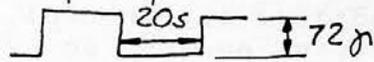
Monitorando a modulação do sinal de excitação (12MHz) pela ação do campo aplicado, diretamente com um osciloscópio, obtivemos a curva de resposta do magnetômetro em relação a campos aplicados de frequências crescentes (figura 8.22). Vemos que a resposta é aproximadamente plana para campos aplicados com frequências de até 1.5MHz.



Sinal de um magnetômetro com baixo nível de ruído.

Resolução avaliada: 1μ

* Campo aplicado:



Sinal de um magnetômetro com médio nível de ruído.

Resolução avaliada: 3μ

Sinal de um magnetômetro muito ruidoso.

Resolução avaliada: 25μ

Figura 8.21: Alguns testes para avaliar o ruído dos magnetômetros.

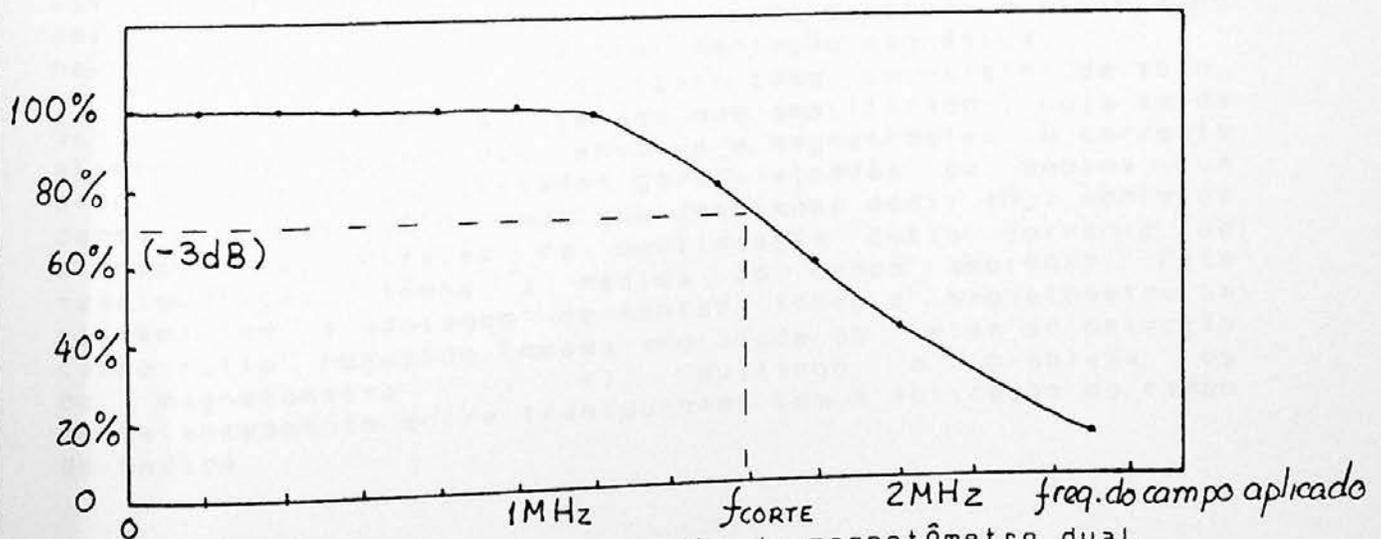
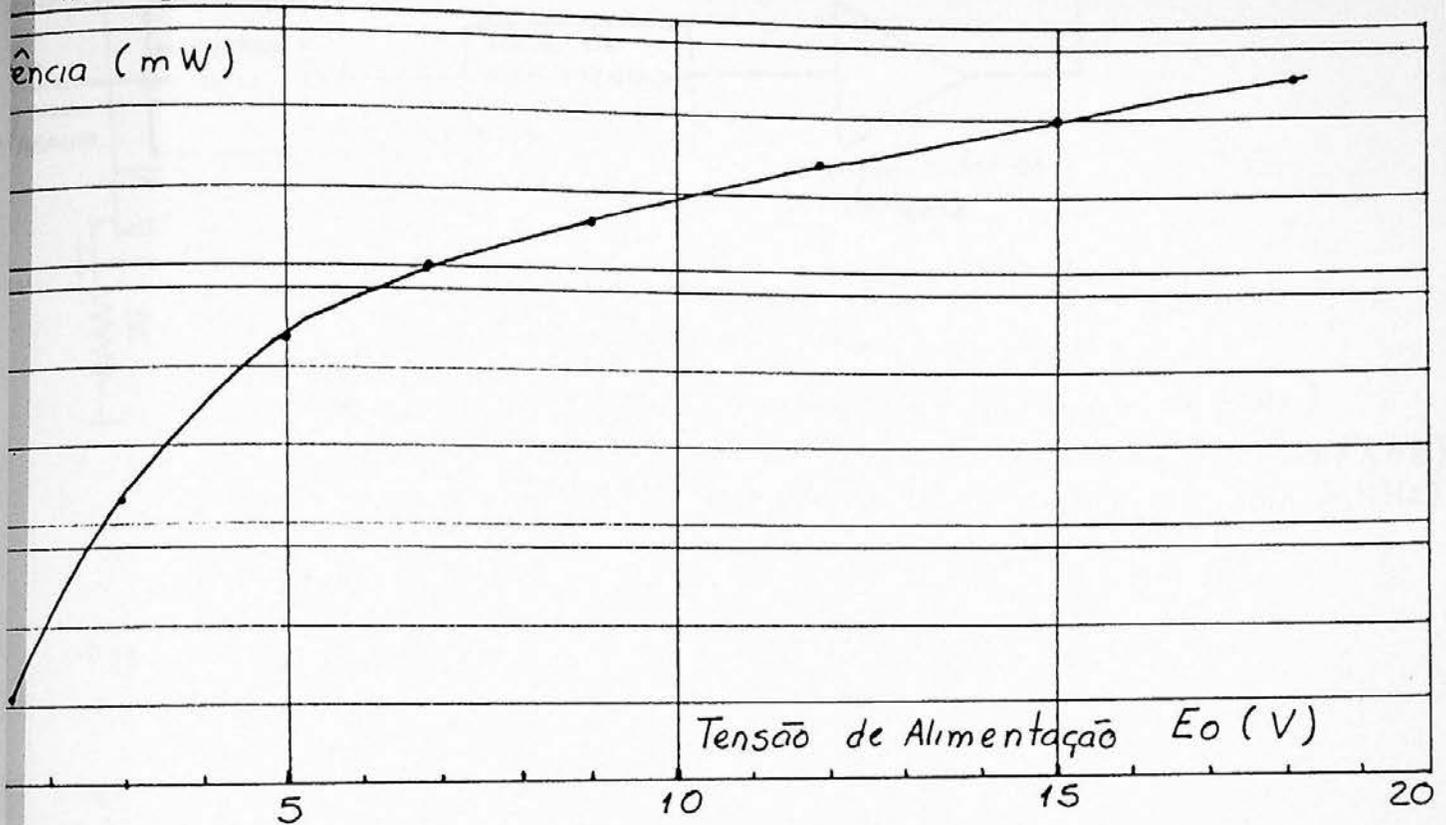


Figura 8.22: Resposta em frequência do magnetômetro dual.

CONSUMO DE POTÊNCIA

O consumo do magnetômetro depende basicamente da tensão de alimentação. Com os valores dos componentes eletrônicos, dados anteriormente, obtemos a curva de consumo apresentada na figura 8.23.

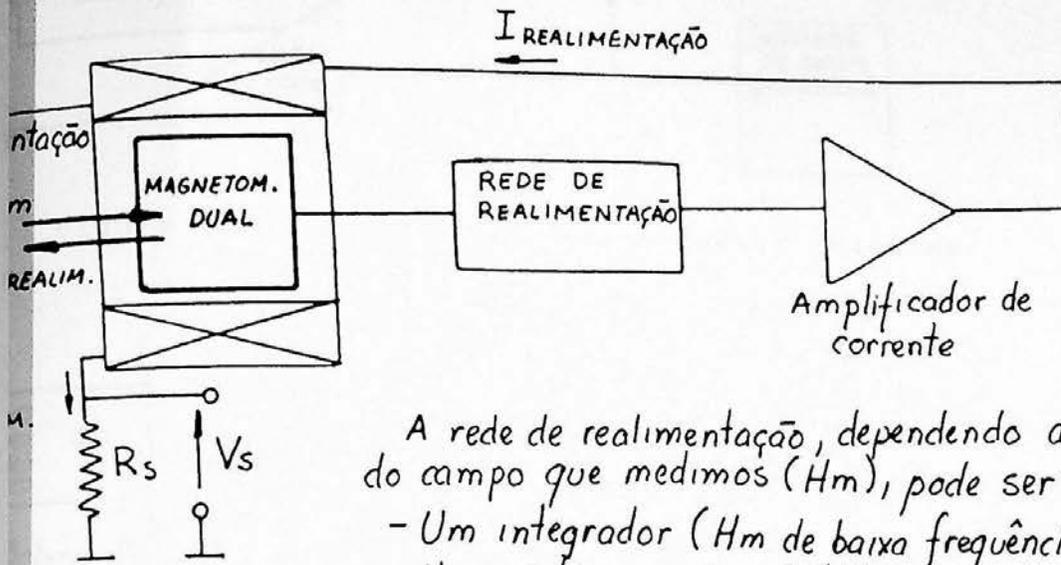


8.6 REALIMENTAÇÃO E RUIDO

O campo de medida (H_m) desbalanceia os dois transdutores do magnetômetro, pois a variação da indutância não é simétrica com H_m : $dL_1/dH_m \neq dL_2/dH_m$ para $L_1 \neq L_2$. Como vimos anteriormente o ruído é proporcional ao grau de desbalanceamento entre sensores. Este problema é minimizado pelo uso de um sistema de realimentação magnética.

O magnetômetro é utilizado como um detetor de zero. Seu sinal de saída é injetado num amplificador, cuja saída alimenta uma bobina que envolve o magnetômetro. A corrente produzida pelo amplificador gera, através da bobina, um campo que cancela o campo que desejamos medir (H_m) sobre os transdutores. Através da monitoração desta corrente de realimentação, temos a medida do campo ambiente. Este sistema tem a vantagem de manter sobre o magnetômetro um campo muito reduzido (mesma amplitude do limiar de detecção do magnetômetro $\rightarrow r$), evitando o problema do desbalanceamento entre transdutores com a aplicação do campo de medida.

Na figura 8.24 temos a implementação do magnetômetro realimentado.



A rede de realimentação, dependendo da frequência do campo que medimos (H_m), pode ser:

- Um integrador (H_m de baixa frequência ~ até 10Hz)
- Uma rede proporcional (H_m de média frequência ~ até KHz)
- Um diferenciador (H_m de alta frequência ~ acima de KHz)
- Rede mista (H_m numa banda passante larga)

Figura 8.24: Magnetômetro com realimentação magnética.

8.7 MAGNETÔMETRO CHAVEADO

O perfeito balanceamento dos sensores é um fator da maior importância na otimização do desempenho do magnetômetro. O emprego de capacitores de compensação soluciona parcialmente o problema, pois diminui principalmente o ruído gerado pela eletrônica, mas não compensa a dispersão dos parâmetros dos filmes. Outra possibilidade é a simulação da existência de dois sensores idênticos utilizando um único sensor. Isto é possível através de técnicas de chaveamento (figura 8.25). Os ímãs de polarização são substituídos por uma bobina que envolve um único transdutor. A corrente que alimenta esta bobina, assim como o detetor, são chaveados alternadamente em configurações que simulam os dois transdutores de campos opostos de polarização. A bobina é alimentada num ciclo com uma corrente constante que gera um campo estático de polarização, simulando um dos sensores. No ciclo seguinte, a corrente é invertida, simulando o outro sensor. Um sistema de detecção, sincronizado com o campo de polarização, encarrega-se de combinar adequadamente os sinais resultantes de cada ciclo.

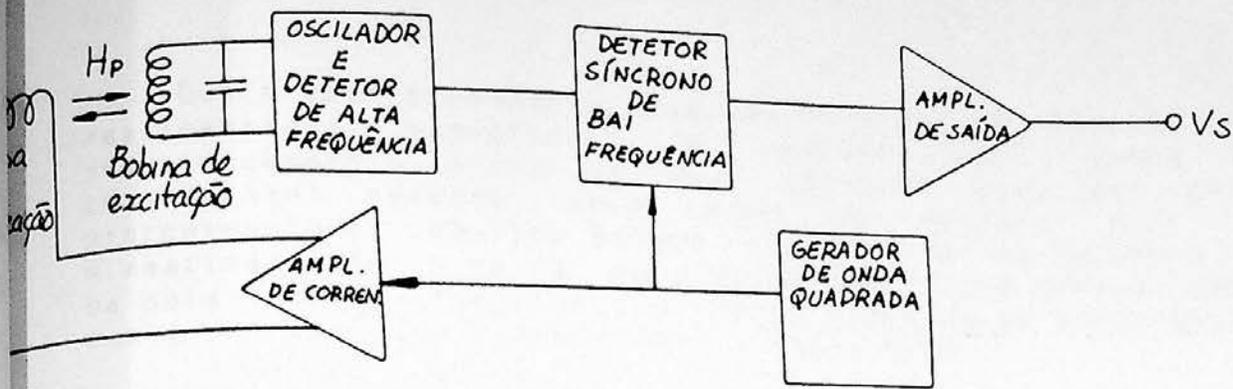


Figura 8.25: Diagrama do magnetômetro chaveado.

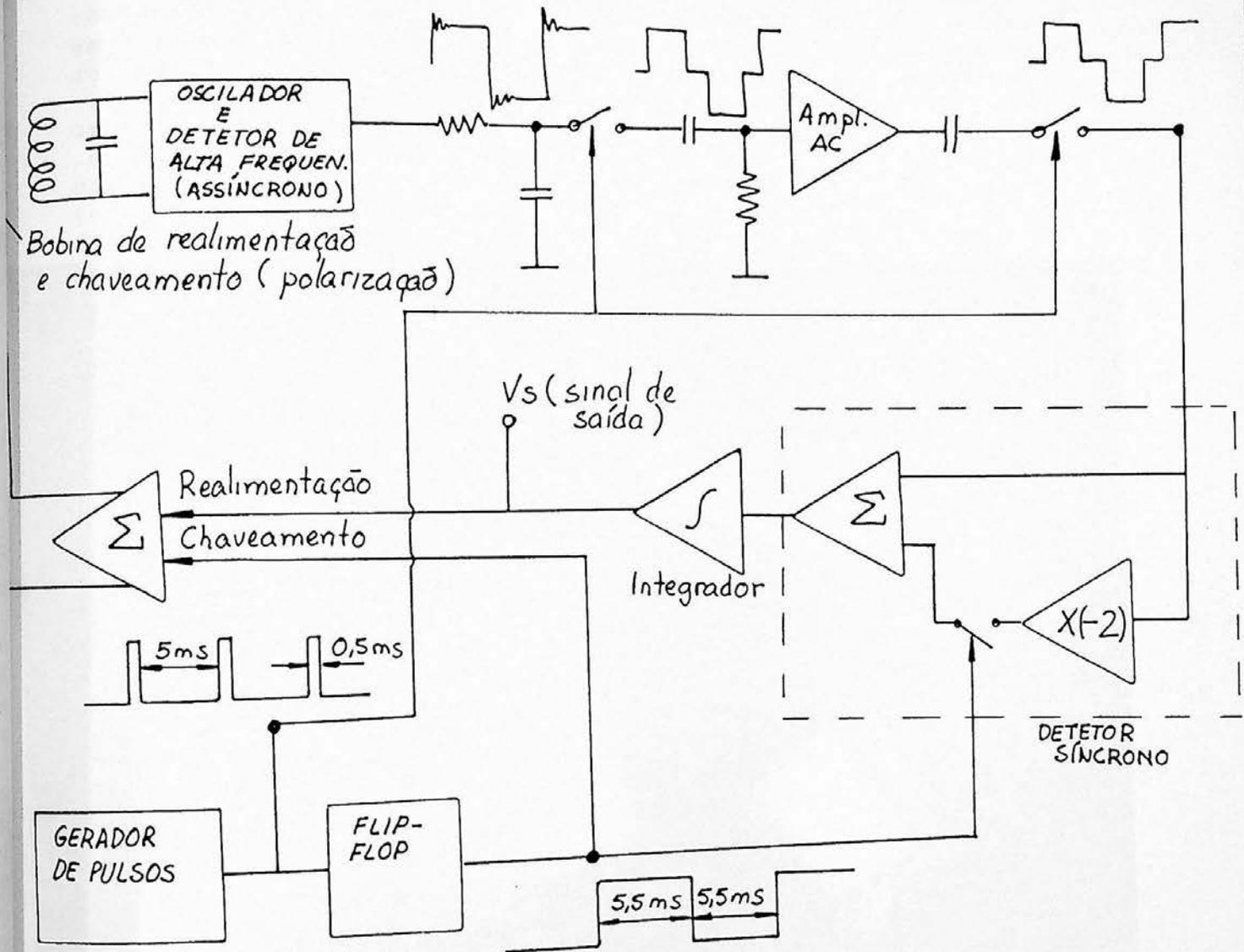


Figura 8.26: O magnetômetro chaveado com realimentação.

Outro aperfeiçoamento possível consiste em realizar uma realimentação magnética. A realimentação evita o desbalanceamento (entre os dois sensores simulados pelo chaveamento) causado pelo campo de medida (H_m). O procedimento é idêntico àquele apresentado na secção 8.6. A realimentação é feita pela mesma bobina que gera o campo de polarização, compondo a corrente chaveada de polarização com a corrente de realimentação (figura 8.26).

A melhor resolução, linearidade e rejeição à campos ortogonais seria obtida com o aumento da complexidade dos circuitos (aumento no consumo de potência e utilização de componentes de alto custo), além do sacrifício da resposta em frequência (limite imposto pela frequência de chaveamento do campo de polarização). Construimos o protótipo apresentado na figura 8.27, que entretanto, não apresentou bons resultados em termos de ruído (ruído 10x maior que o produzido pelo magnetômetro dual simples). Esta performance pobre, em termos de ruído, deve-se provavelmente a componentes inadequados utilizados nos circuitos eletrônicos (fontes geradoras de ruído).

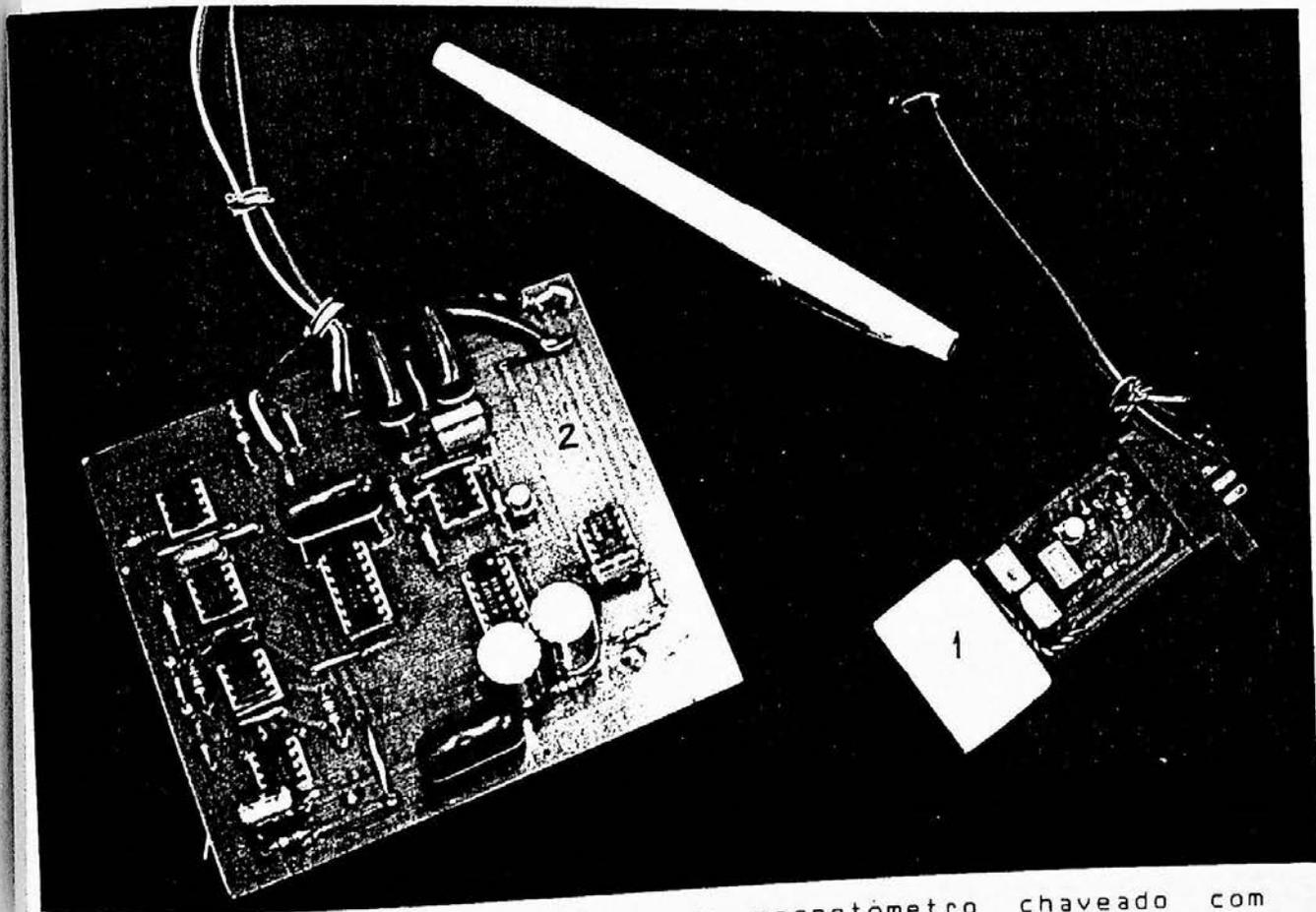


Figura 8.27: Protótipo de um magnetômetro chaveado com realimentação.

- 1 - Placa com o transdutor, a bobina de realimentação/polarização e o oscilador de rf.
 2 - Placa com a eletrônica de chaveamento e detecção.

CAPITULO 9

MAGNETÔMETROS RESISTIVOS9.1 INTRODUÇÃO

Uma outra família de magnetômetros pode ser construída a partir do fenômeno conhecido como magnetoresistência. Este é um efeito apresentado por materiais magnéticos que possuem uma anisotropia uniaxial. A resistividade varia de acordo com a direção em que é medida e com a aplicação de campos magnéticos.

Inicialmente este efeito foi utilizado na confecção de dispositivos detetores de pulsos magnéticos rápidos (largura de ns), mas como veremos adiante, o efeito presta-se a construção de magnetômetros com características peculiares:

- excelente resposta a campos de alta frequência,
- grande simplicidade,
- possibilidade de executar dispositivos de dimensões reduzidas.

Os primeiros estudos sobre a utilização do efeito magnetostrictivo na construção de magnetômetros foram feitos por R. S. Hebbert e L. J. Schwee, que desenvolveram um magnetômetro resistivo excitado por um sinal de 300MHz [9.1].

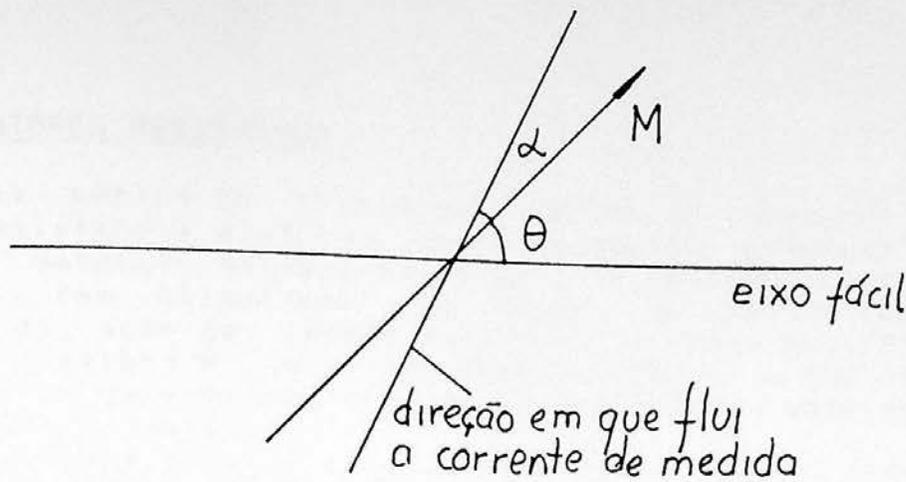
9.2 MAGNETORESISTÊNCIA

Em filmes com anisotropia uniaxial induzida a resistividade ao longo da direção de magnetização é ligeiramente maior (2-4%) que na direção ortogonal à magnetização. A distribuição angular da resistividade pode ser obtida pela expressão fenomenológica [9.2]:

$$R = R_0 + \frac{1}{2} \delta R \cdot \cos 2\alpha \quad 9.1$$

Onde: α = ângulo formado entre a direção de magnetização e a direção em que circula a corrente de medida da resistividade

δR - diferença entre a resistividade tomada no eixo fácil e no eixo duro, sem campos aplicados ao filme



A direção de magnetização é obtida através da minimização de energia (relação de Stoner-Wohlfarth), na posição de magnetização estável:

$$H_x \sin\theta - H_u \cos\theta + H_x \sin\theta \cos\theta = 0 ; \quad 9.2$$

Onde θ = ângulo entre a direção de magnetização e a direção do eixo fácil
 H_x, H_u = campos aplicados respectivamente no eixo fácil e no eixo duro,

DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DA CORRENTE DE MEDIDA

A sensibilidade de um transdutor magnetoresistivo, em relação à campos aplicados (provocam alteração na direção de magnetização), identifica-se com $dR/d\theta$, que por sua vez identifica-se com $dR/d\alpha$. A maximização desta sensibilidade ocorre no ponto de máximo (ou mínimo): $d^2R/d\alpha^2 = 0$. Como: $d^2R/d\alpha^2 = -\delta R \cdot \cos 2\alpha$; verificamos que a variação da resistividade com a aplicação de campos magnéticos é máxima, quando $\alpha = 45^\circ$. Em outras palavras, o efeito magnetoresistivo é maximizado quando a corrente de medida da resistividade flui a 45° em relação à direção de magnetização. Este resultado indica que para maximizar a sensibilidade do sensor magnetoresistivo, a corrente de medida deverá fluir através de trilhas de filme dispostas a 45° em relação ao eixo de fácil magnetização. Nestas condições:

$$\alpha = 45^\circ - \theta$$

Substituindo α em 9.1, obtemos:

$$R = R_0 + \delta R \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta$$

9.3

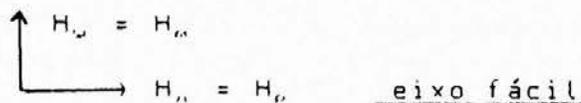
9.3 TRANSDUTORES RESISTIVOS

A ideia básica do transdutor resistivo consiste em medir a resistência elétrica de um elemento composto de trilhas de material magnetoresistivo. A resistência varia de acordo com orientação do vetor de magnetização, resultante da ação de campos externos: o campo aplicado a este campo e determinada através da dependência angular da resistividade do material.

Um campo estático de polarização (H_p) deve ser previsto no projeto de sensor com a finalidade de estabelecer uma direção inicial bem definida da magnetização (comportamento monodomínio). Há várias possibilidades envolvendo as direções de aplicação dos campos de polarização, campos a serem medidos e correntes de medida. Com a corrente fluindo a 45° com o eixo fácil, distinguimos dois casos para a aplicação de campos de polarização:

a) Polarização no eixo fácil

O campo desconhecido (H_m) é aplicado ao eixo duro e o campo estático de polarização no eixo fácil.



Podemos distinguir alguns casos em relação a magnitude do campo de polarização:

a.1) $H_p > H_k$

O termo envolvendo o campo de anisotropia na equação 9.2 é desprezado e a direção de magnetização é obtida por:

$$\tan\theta = H_m / H_p$$

Fazendo as substituições em 9.3, temos a resistividade em função dos campos aplicados:

$$R = R_0 + \delta R \cdot \frac{H_m H_p}{H_m^2 + H_p^2} \quad 9.4$$

Se o campo que medimos é pequeno ($H_m \ll H_p$), então o termo H_m^2 pode ser desprezado no denominador, e a sensibilidade passa a ser uma constante:

$$R = R_0 + \delta R \cdot \frac{H_m}{H_p} \quad 9.5$$

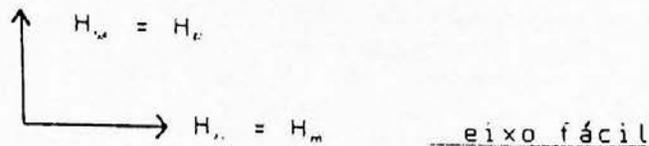
a.2) H_p da mesma ordem de grandeza de H_k

Para campos de medida pequenos, tais que $H_m \ll H_p + H_k$, θ é um ângulo muito pequeno, assim $\cos\theta \approx 1$. Da equação 9.2, $\sin\theta = H_m / (H_p + H_k)$, substituindo em 9.3:

$$R = R_0 + \delta R \cdot \frac{H_m}{H_p + H_k} \quad 9.6$$

b) Polarização no eixo duro

O campo a ser medido é aplicado ao eixo fácil e o campo estatico de polarização ao eixo duro.



Quanto a intensidade do campo de polarização, temos:

b.1) H_k < H_p

O resultado é idêntico ao caso anterior (H_p na direção fácil), pois quando desprezamos H_k , tornamos o problema simétrico em relação aos eixos característicos de magnetização.

b.2) H_p da mesma ordem de grandeza que H_k

Se o campo medido é de pequena intensidade, tal que $|H_m| \ll |H_p - H_k|$, então θ é um ângulo próximo de 90° . Neste caso $\sin\theta \approx 1$, e da equação 9.2 podemos escrever:

$$\cos\theta \approx H_m / (H_p - H_k),$$

substituindo em 9.3, temos:

$$R = R_0 + \delta R \cdot \frac{H_m}{H_p - H_k} \quad 9.7$$

Um ponto de operação interessante ocorre quando o campo de polarização é igual ao campo de anisotropia. Nesta situação, para um filme ideal, não seria necessário qualquer esforço para girar a magnetização e a sensibilidade seria infinita (equação 9.7 com $H_p = H_k$). Na prática a sensibilidade fica limitada a um valor máximo devido a uma série de fatores como: dispersão (em relação aos valores medios) dos domínios que compõe o filme, domínios de fechamento nas bordas e o campo desmagnetizante, que será estudado nas próximas secções.

9.4 O MAGNETÔMETRO RESISTIVO

Como vimos anteriormente, a máxima taxa de variação de resistividade em função do campo ocorre quando a corrente flui a 45° com a direção da magnetização. A corrente fluirá neste sentido, configurando o transdutor resistivo como uma trilha estreita de filme orientada a 45° em relação ao eixo fácil. Para aumentar a resistência total do sensor, podemos fazer um conjunto de trilhas paralelas interligadas entre si em serie. Essas configurações são obtidas através de técnicas fotolitográficas: gravação de uma emulsão fotográfica através de uma máscara e ataque químico com um produto corrosivo, que retira as partes expostas do filme [9.3].

Em princípio, as técnicas de extração de sinal (sinal de tensão ou frequência proporcional ao campo aplicado \rightarrow sinal proporcional à resistividade do sensor) poderiam ser análogas àquelas utilizadas para os sensores indutivos (sinal de tensão ou frequência proporcional à variação de indutância do sensor). O efeito magnetoresistivo é, entretanto, mais sutil que a mudança de permeabilidade do filme e outras técnicas, como o emprego da clássica configuração em ponte de Wheatstone (figura 9.1), mostram-se mais adequadas.

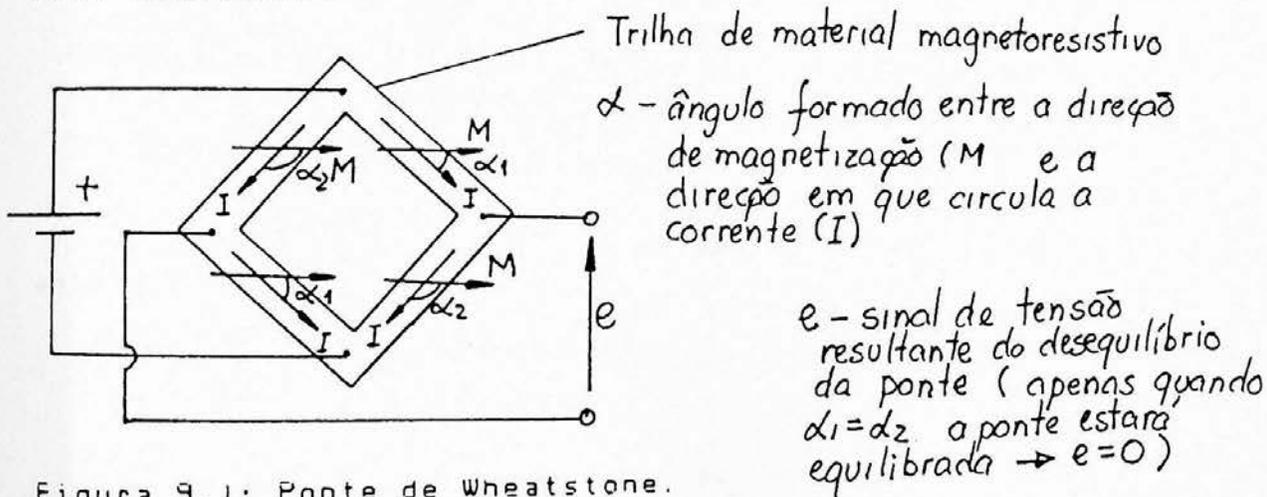
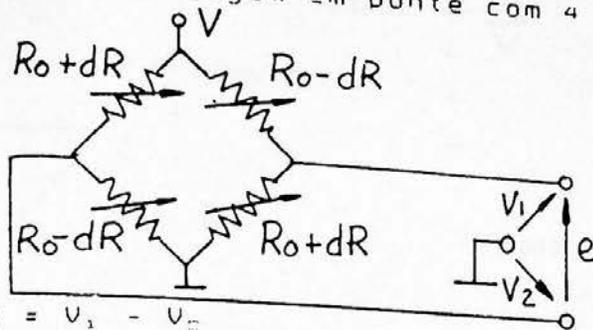


Figura 9.1: Ponte de Wheatstone.

A ponte resistiva tem vantagens, como: minimização do efeito de drifts térmicos e de longos períodos (se os drifts são iguais para todos transdutores que compõe a ponte, estes cancelam-se entre si); cancelamento do ruído proveniente da fonte de excitação (ocorre com a ponte perfeitamente balanceada); aumento da linearidade e rejeição a campos ortogonais.

a) Funções de transferência do magnetômetro

Para a montagem em ponte com 4 transdutores, temos:



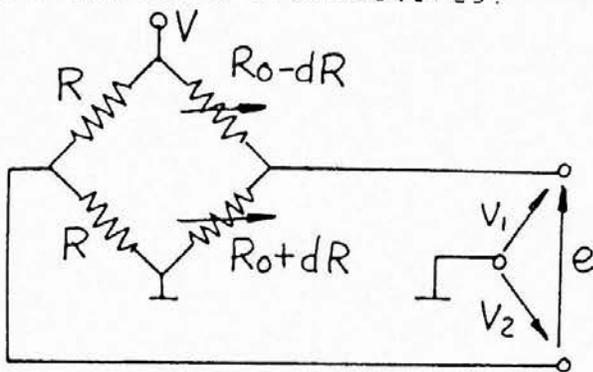
$$e = V_1 - V_2$$

$$e = (R_0 + dR) \cdot V / 2R_0 - (R_0 - dR) \cdot V / 2R_0$$

$$e = V \cdot dR / R_0$$

9.8

Com apenas 2 transdutores:



$$e = (R_0 + dR) \cdot V / 2R_0 - V / 2$$

$$e = V \cdot dR / 2R_0$$

9.9

(o sinal de saída é a metade do sinal obtido no caso anterior)

$$\text{De 9.1: } dR = \frac{1}{2} \cdot \delta R \cdot \cos 2\alpha$$

substituindo em 9.8:

$$e = V \cdot (\frac{1}{2} \cdot \delta R \cdot \cos 2\alpha) / R_0 \quad \text{ou}$$

$$e = V \cdot \delta R / R_0 \cdot \cos \theta \cdot \text{sen} \theta$$

9.10

Utilizando a fórmula 9.2 para obter a direção de magnetização, e substituindo em 9.10, obtemos numericamente as curvas características deste sensor. Verificamos, pela figura 9.2, que realmente este tipo de dispositivo pode ser utilizado para medir campos magnéticos, pois apresenta uma região linear na parte central de suas curvas características.

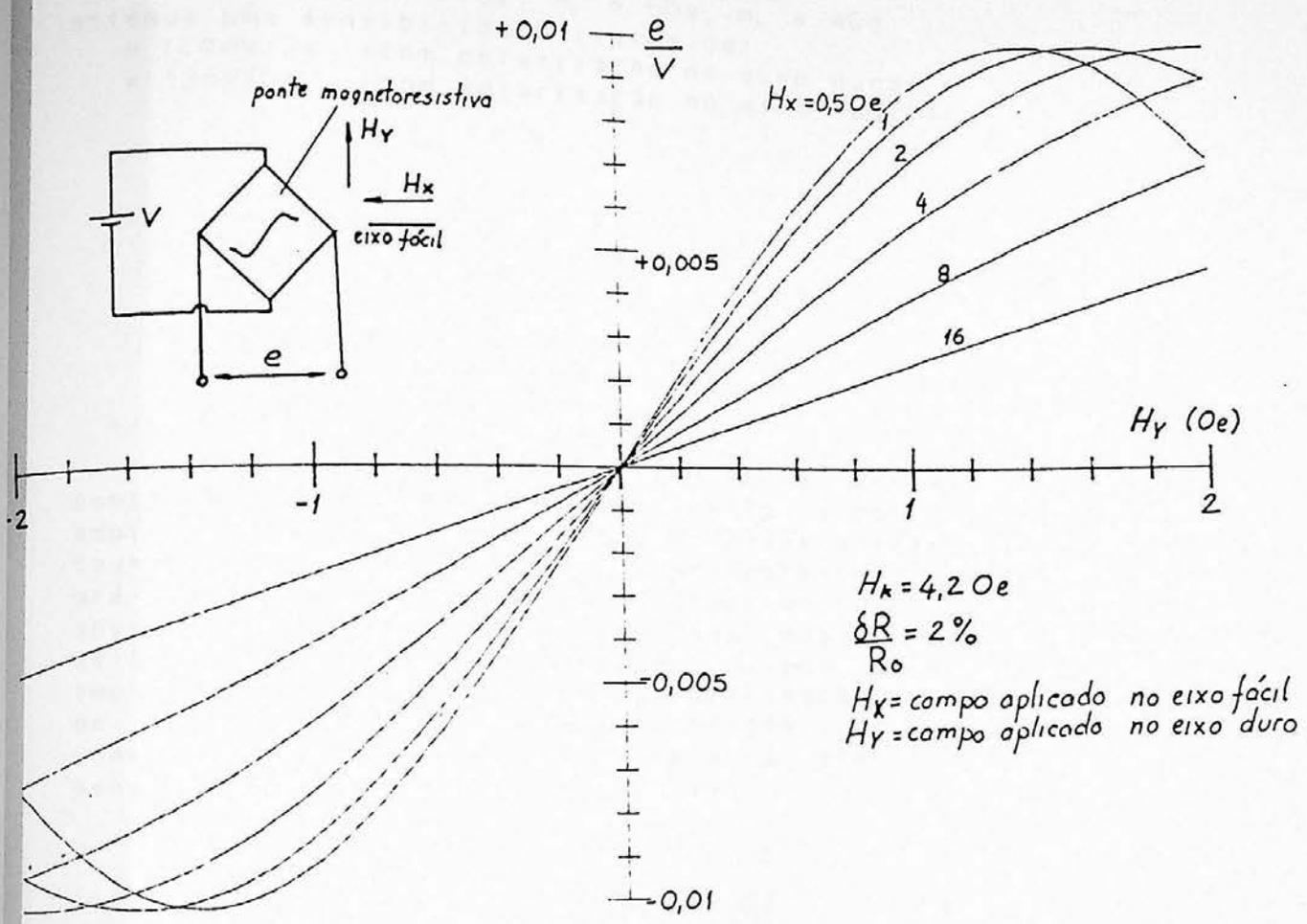


Figura 9.2: Curvas características do magnetômetro resistivo.

Se medimos campos de baixa amplitude ($H_m \ll H_k$), podemos escrever as expressões aproximadas:

- polarização no eixo fácil (expressão 9.6 em 9.8):

$$e = V \cdot \delta R / R_0 \cdot H_m / (H_k + H_e) \tag{9.11}$$

- polarização no eixo duro (expressão 9.7 em 9.8):

$$e = V \cdot \delta R / R_0 \cdot H_m / (H_k - H_e) \tag{9.12}$$

Supondo valores típicos:

$\delta R/R_s \approx 2\%$, $V \approx 5V$, $H_v \approx 50e$, $H_h \approx 40e$,
 obtemos uma sensibilidade típica de:
 $\approx 120mV/Oe$ (com polarização no eixo duro) e
 $\approx 13mV/Oe$ (com polarização no eixo fácil)

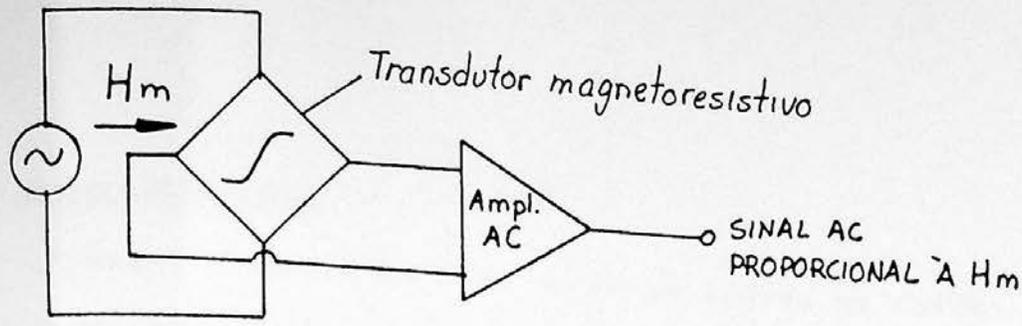
b) Modos de operação

OPERAÇÃO DC

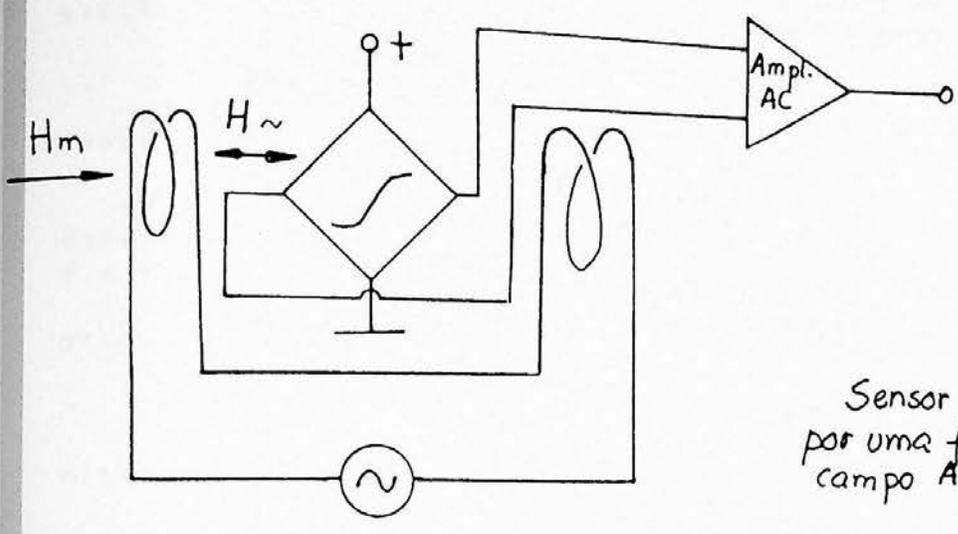
Uma das maneiras mais simples de extrair o sinal da ponte resistiva consiste em alimentá-la com uma tensão DC e amplificar o sinal resultante do desbalanceamento da ponte, causado pela aplicação do campo ambiente, por meio de um pré-amplificador diferencial de baixo ruído. Este modo de operação é inadequado quando medimos campos estáticos de baixa intensidade, devido à dificuldade em amplificar pequenos níveis DC (utilização de amplificadores de baixo drift DC ou utilização de amplificadores chaveados). Outro inconveniente é o elevado consumo com sensores de baixa resistência total.

OPERAÇÃO AC

Se os campos a serem medidos são estáticos, devemos introduzir uma modulação no sinal de saída da ponte (figura 9.3) para permitir a amplificação deste sinal com o uso de um amplificador AC. A modulação pode ser obtida alimentando a ponte com uma tensão AC (senoidal ou retangular) ou mantendo a alimentação DC, produzir através de uma bobina um campo alternado que modula o sinal de saída da ponte, relativo ao campo estático que desejamos medir. A detecção pode ser feita simplesmente pela retificação do sinal amplificado ou através de um detetor síncrono. Alimentação AC mostra-se também conveniente para melhorar a relação sinal/ruído na medida de campos alternados. Com excitação de 300MHz é possível detetar campos magnéticos de 65MHz [9.1].



Sensor magnetoresistivo excitado diretamente por uma fonte AC.



Sensor magnetoresistivo excitado por uma fonte DC e modulado com campo AC.

Figura 9.3: Magnetômetro resistivo em operação AC.

OPERAÇÃO COM PULSOS

Com sensores de baixa resistência temos um grande consumo de potência para alimentar a ponte (indesejável quando o magnetômetro é operado com baterias ou quando suas dimensões são reduzidas \rightarrow limitação na capacidade de dissipação de calor). A energia consumida transforma-se em calor, que provoca problemas de drift térmico e ruído. Em sensores de dimensões reduzidas, a dificuldade em dissipar o calor pode levar a danos nas trilhas. Uma solução é o emprego de alimentação pulsada: pulsos de curta duração (μs) são aplicados periodicamente (ms) e a detecção é feita por um circuito de amostragem e retenção. Um inconveniente deste sistema é a limitação da resposta em frequência (a frequência do campo medido deve ser bem menor que a taxa de aplicação dos pulsos).

9. RUÍDO/RESOLUÇÃO

Podemos identificar uma série de fontes de ruído:

a) Ruído de excitação:

É o ruído gerado na fonte de excitação da ponte. Com uma ponte de transdutores idênticos, operando num ponto próximo do equilíbrio (pequenos campos aplicados), este tipo de ruído tende a ser cancelado, pois uma mesma corrente de excitação circula através de todos os ramos da ponte.

b) Ruído térmico:

Proveniente da agitação térmica dos elementos resistivos:

$$V_t^2 = 4.k.T.R.B$$

onde V_t é o ruído em tensão rms, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura em °K, B é a banda passante e R é a resistência equivalente da ponte = $R_0/2$.

Nota-se que valores de resistências baixos, levam a produção de menos ruído.

c) Ruído de entrada do amplificador:

É gerado nos estágios iniciais do pré-amplificador diferencial ligado à ponte. Pode ser expresso como:

$$V_a^2 = 2e^2.B + i^2.R^2.B \quad \text{onde: } e, i \text{ são}$$

respectivamente a tensão e corrente de ruído de entrada do amplificador/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

d) Ruído gerado por domínios reversos:

Nas descontinuidades do filme (porosidades, granulações e bordas de trilha) o campo desmagnetizante torna-se muito intenso. Isto pode induzir a nucleação de domínios fora da orientação preferencial, que podem gerar ruído pelo mecanismo de movimento de paredes. Este tipo de ruído é minimizado com filmes de boa qualidade: depositados uniformemente, sem imperfeições; e com a adoção de geometrias adequadas (que diminuam o efeito do campo desmagnetizante): trilhas adjacentes bem próximas, sensor com a máxima dimensão possível.

Há outras fontes de ruído como: ruído gerado em contatos elétricos, ruído dos demais circuitos eletrônicos envolvidos. Com algum cuidado na confecção do magnetômetro, estas fontes de ruído tornam-se insignificantes.

Tomando valores típicos para as diversas fontes de ruído, temos que este tipo de magnetômetro deve apresentar um nível de resolução semelhante ao dos magnetômetros indutivos.

O sistema de realimentação magnética, descrito para o magnetômetro indutivo, pode também ser aqui utilizado para diminuir o ruído do magnetômetro. A situação de equilíbrio da ponte contribui para o cancelamento do ruído. Utilizamos a ponte como um detector de zero, cujo sinal de saída (devidamente amplificado) gera, através de uma bobina de realimentação, um campo de realimentação sobre a ponte de intensidade igual a do campo a ser medido. A medida do campo ambiente é feita através da monitoração da corrente que circula pela bobina de realimentação (figura 9.4).

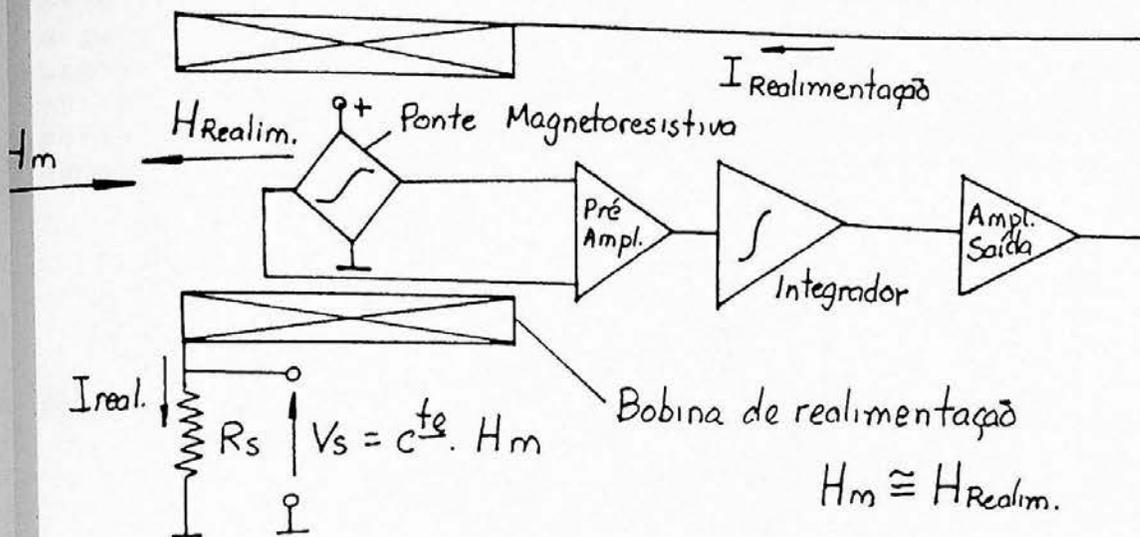


Figura 9.4: Magnetômetro resistivo realimentado.

9.6 CAMPO DESMAGNETIZANTE

Este é o principal fator que limita a miniaturização do sensor resistivo. Nas bordas laterais das faixas de material magnético são criados polos magnéticos, que geram campos desmagnetizantes muito intensos. Quanto mais estreita é a trilha (menor relação largura/espessura do filme), mais pronunciado é o efeito do campo desmagnetizante [9.4].

O intenso campo desmagnetizante nas bordas pode originar a formação de domínios reversos, que são importantes fontes geradoras de ruído. Outro efeito deste campo é a redução da sensibilidade do sensor. Isto ocorre pois a posição média da magnetização de saturação é deslocada da posição otimizada de saturação ($\alpha = 45^\circ - \theta$). A posição média otimizada de saturação da magnetização pode ser restaurada se utilizarmos uma polarização mista: campos estáticos de polarização aplicados simultaneamente nas direções fácil e ortogonal. Por exemplo: num sensor com polarização no eixo duro, a aplicação adicional de um campo estático de polarização no eixo fácil, pode (dependendo de sua intensidade) cancelar o deslocamento angular indesejável da posição média otimizada da magnetização. Na prática esta polarização mista pode ser obtida por um par de ímãs permanentes, cuja posição angular possa ser alterada de modo a maximizar a sensibilidade do sensor (figura 9.5)

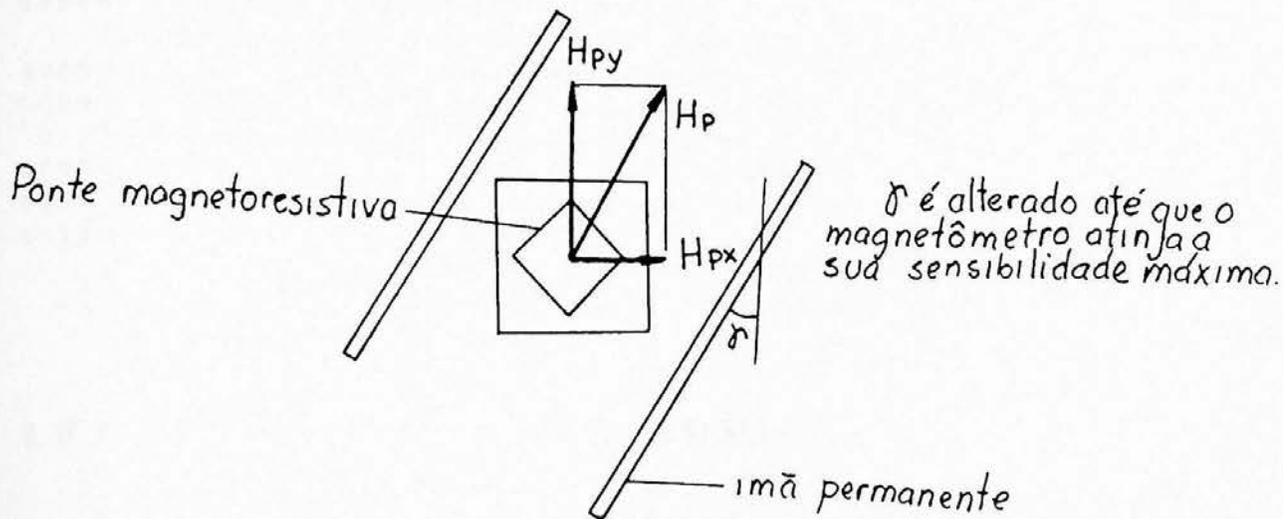


Figura 9.5: Sensor com polarização mista.

O efeito do campo desmagnetizante na determinação da direção da magnetização pode ser calculado a partir da equação de Stoner-Wohlfarth modificada [9.4]:

$$0 = |\bar{H}_x + \bar{H}_d \cdot \sin(\theta - 45^\circ)| \sin\theta - |\bar{H}_y - \bar{H}_d \cdot \sin(\theta - 45^\circ)| \cos\theta + \frac{1}{2} \cdot \sin 2\theta$$

$$\bar{H}_d = \frac{H_d}{H_k} = \text{campo desmagnetizante médio normalizado}$$

9.7 ESPECIFICAÇÃO DOS FILMES MAGNETORESISTIVOS

Os filmes mais adequados à construção de magnetômetros resistivos diferem daqueles empregados nos magnetômetros indutivos. A primeira característica a destacar, refere-se a espessura. Enquanto no sensor indutivo procuramos aumentar a quantidade de material magnético do núcleo a fim de aumentar o fluxo magnético, no sensor resistivo empregamos uma quantidade bem menor de material. Isto é feito pois trata-se de um material metálico, que apresenta resistividade muito baixa. Um sensor com filmes espessos apresenta uma resistência total muito baixa. Filmes espessos, além do problema da baixa resistência elétrica e maior dispersão de domínios, têm o inconveniente do aumento do campo desmagnetizante. Filmes muito finos têm problemas de descontinuidades e granulação. São criadas fontes de ruído que deterioram a relação sinal/ruído do sensor. Um ponto, que otimiza a relação sinal/ruído, é obtido com espessuras em torno de 350 Angstroms.

A composição química do filme pode ser alterada para aumentar o efeito magnetoresistivo. Com a inclusão de cobalto, temos a liga de baixa magnetostricção Ni-Fe-Co 73-16-11, que apresenta um efeito magnetoresistivo mais pronunciado que a liga Ni-Fe 81-19. O cobalto também determina um aumento do campo coercivo e energia de anisotropia:

Ni-Fe 80-20 ----->	Hc \approx 20e;	Hk \approx 40e
Ni-Fe-Co 73-16-11 ---->	Hc \approx 40e;	Hk \approx 120e

9.8 PROTÓTIPOS DO MAGNETÔMETRO RESISTIVO

Construímos alguns protótipos para verificar a possibilidade prática da utilização destes dispositivos na medida de campos magnéticos de pequena intensidade. Estes protótipos encontram-se ainda na fase inicial de testes de funcionamento, mas alguns resultados experimentais serão apresentados a título de ilustração.

Os magnetômetros foram confeccionados através de técnicas fotolitográficas. Com o auxílio de uma máscara ótica (obtida pela redução fotográfica - 10X - do desenho do sensor), uma camada de emulsão fotográfica (espalhada sobre o filme magnético sob a forma de uma fina película) é sensibilizada. Após a revelação desta emulsão é feito um ataque químico (corrosão) nas regiões do filme que não estão protegidas pela emulsão. Nas áreas protegidas do filme magnético temos as trilhas do magnetômetro resistivo. Este processo, com excessão da elaboração da máscara ótica, foi realizado no Laboratório de Microeletrônica do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP.

a) Tipos de protótipos desenvolvidos

Basicamente construímos dois tipos de magnetômetros resistivos. O primeiro tipo, de trilha única (figura 9.6), destina-se à um estudo da influência do campo desmagnetizante. Foi feita uma série de magnetômetros deste tipo com trilhas de largura diferente (quanto menor é a largura da trilha, mais intenso é o efeito do campo desmagnetizante no sensor).

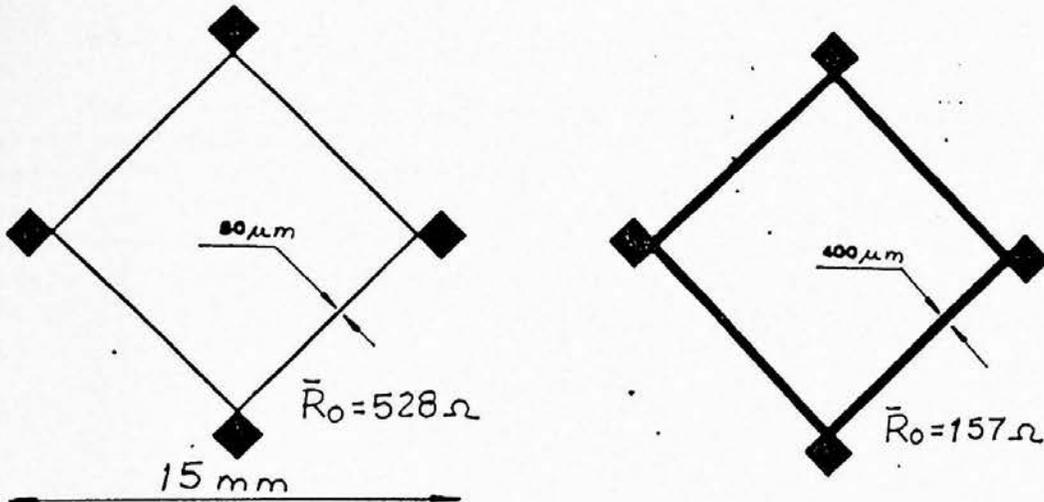
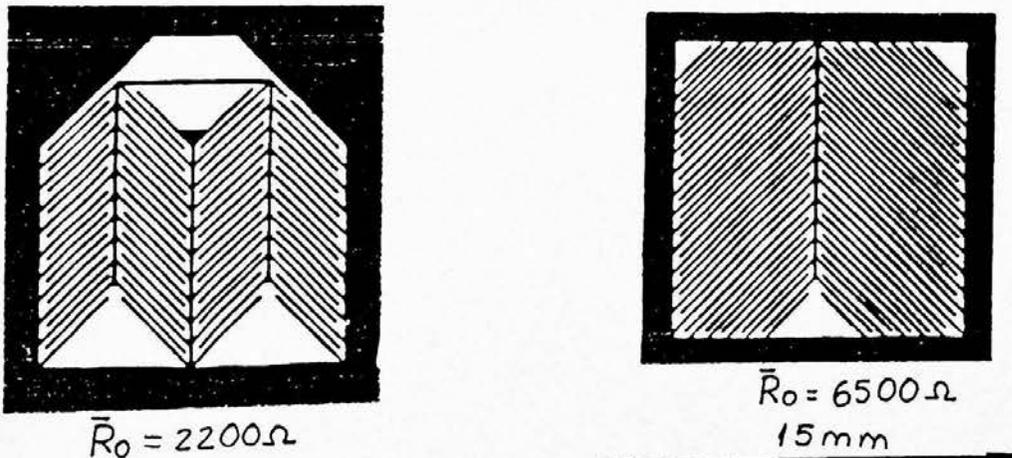


Figura 9.6: Protótipos do primeiro tipo.

No segundo tipo procuramos construir um magnetômetro de alta resistência, que pudesse ser alimentado diretamente com uma fonte de tensão elevada (aumento da sensibilidade) sem problemas de dissipação de calor (figura 9.7).



\bar{R}_0 - Resistência média de cada ramo da ponte

Figura 9.7: Protótipo do segundo tipo.

Estes magnetômetros foram confeccionados com filmes de permalloy $Fe_{80}Ni_{20}$ de 350\AA de espessura. Nestes filmes o efeito magnetoresistivo não é tão pronunciado quanto aquele observado em filmes que contêm Co. Com os sensores construídos obtivemos: $\delta R/R_0 \approx 2\%$. Já conseguimos produzir filmes com Co de boas características, mas nenhum prototipo foi ainda construído com estes filmes.

b) Curvas características

As curvas características típicas foram obtidas com um arranjo experimental semelhante ao utilizado para avaliar o desempenho dos magnetômetros indutivos (figura 9.8). O campo de polarização foi produzido por uma bobina de helmholtz e uma resistência limitadora foi acrescentada para manter baixa a potência dissipada sobre os transdutores (evitar efeitos térmicos). As curvas obtidas para estes dispositivos são mostradas nas figuras 9.9 e 9.10.

Observando-se estas curvas temos que quando a polarização é aplicada ao eixo duro, o ruído apresentado pelo dispositivo é muito grande (a curva apresenta histerese). Este ruído é reduzido apenas para campos de polarização de grande intensidade. Comentamos anteriormente que com polarização no eixo duro e fazendo $H_p \approx H_k$, a sensibilidade seria máxima. Este resultado não se aplica para dispositivos práticos. Como observamos nas curvas em que a polarização é feita no eixo duro e o campo de polarização aproxima-se do valor de H_k , o estado de magnetização dos filmes é muito instável.

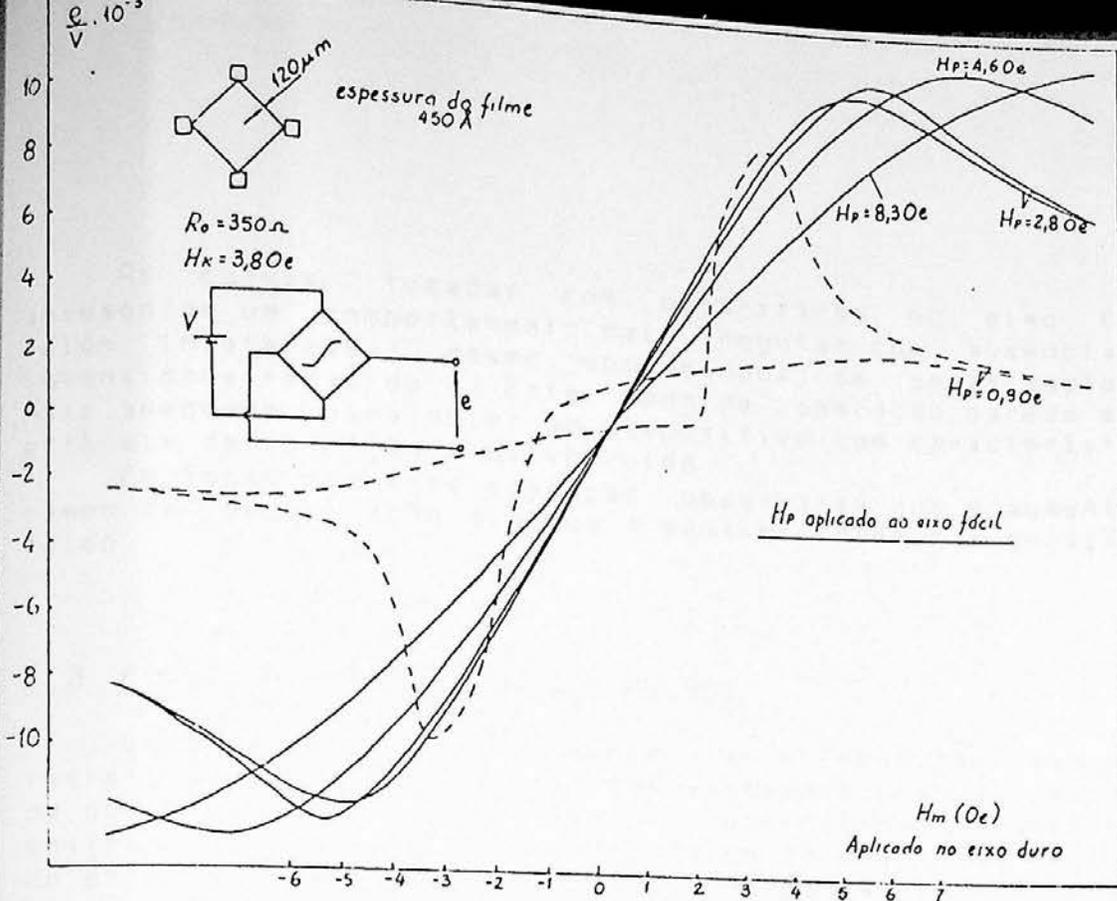


Figura 9.9: Curvas características típicas dos prototipos dos magnetômetros resistivos com polarização no eixo fácil.

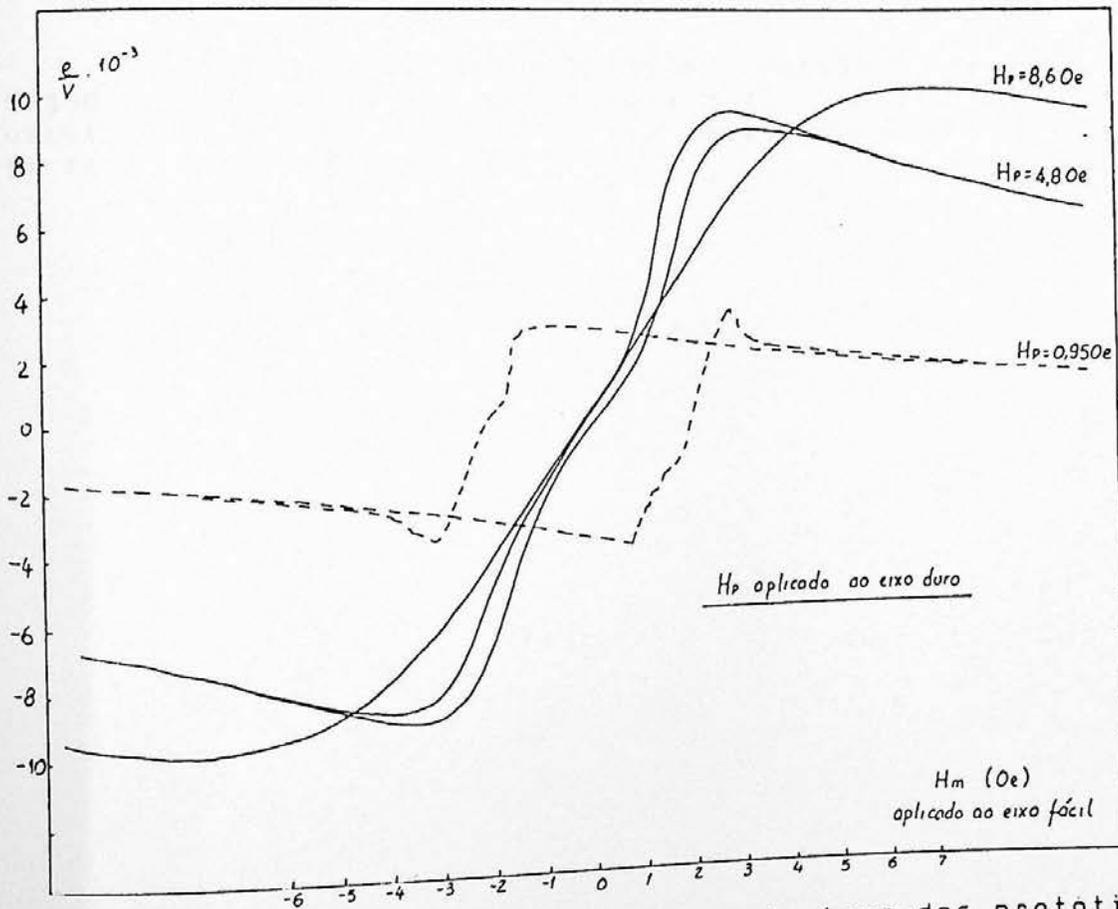


Figura 9.10: Curvas características típicas dos prototipos dos magnetômetros resistivos com polarização no eixo duro.

As curvas, tomadas com polarização no eixo fácil, apresentam um comportamento mais regular, com ausência de ruído (histerese), mesmo com campos de polarização de intensidade reduzida. Este modo de operação parece ser o mais adequado para obter um dispositivo com características estáveis de operação e baixo ruído.

Em todos modos de operação observa-se que o aumento do campo de polarização diminui a sensibilidade e a geração de ruído.

9.9 PROTÓTIPO ALIMENTADO COM PULSOS

Como vimos anteriormente, a alimentação da ponte resistiva através de pulsos tem vantagens como a diminuição da potência dissipada no sensor. Construímos o magnetômetro mostrado na figura 9.11, constituído de uma ponte resistiva do primeiro tipo e da eletrônica responsável pela produção dos pulsos e tratamento do sinal da ponte. Com a alimentação pulsada a potência dissipada no sensor é de apenas alguns μW . O esquema do magnetômetro é dado na figura 9.12.

As curvas características obtidas para este magnetômetro são dadas na figura 9.13. Com a eletrônica utilizada a sensibilidade típica deste protótipo situou-se em torno de 1 V/Oe .

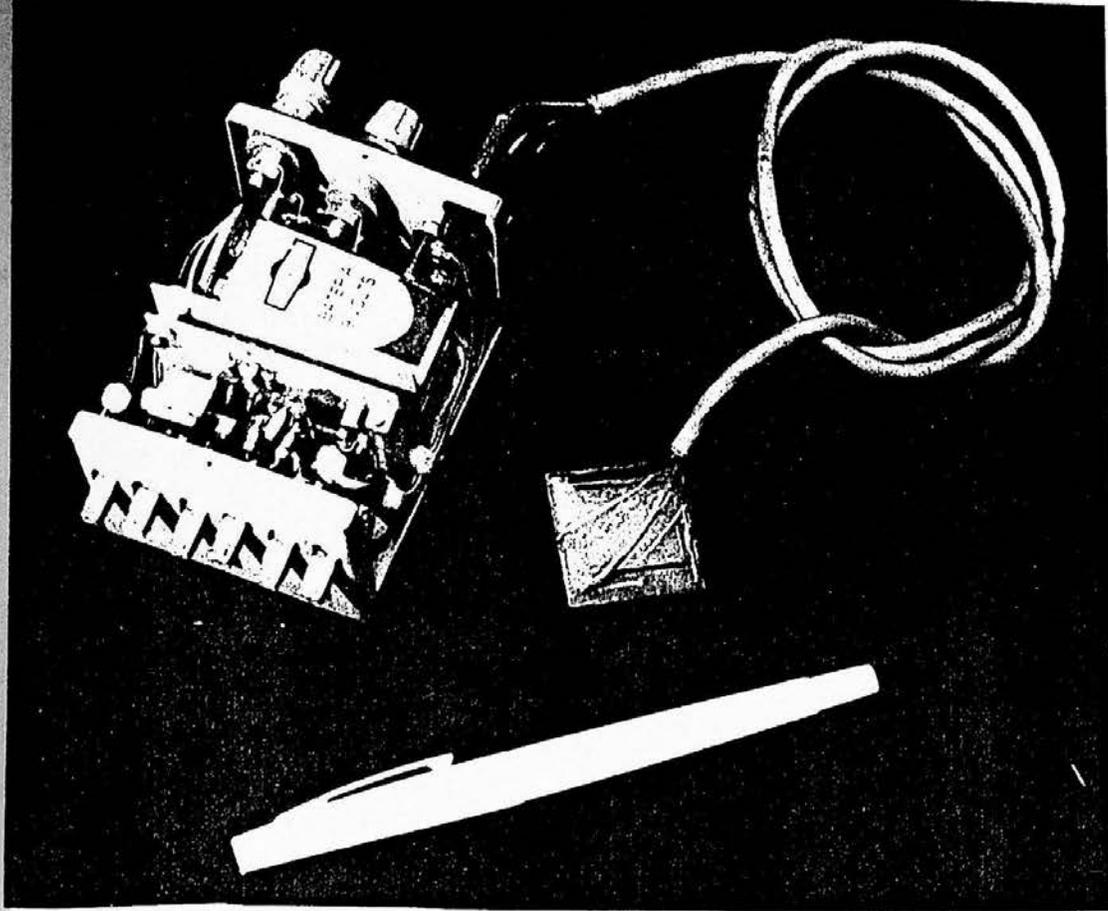


Figura 9.11: Prototipo de magnetômetro resistivo alimentado por pulsos.

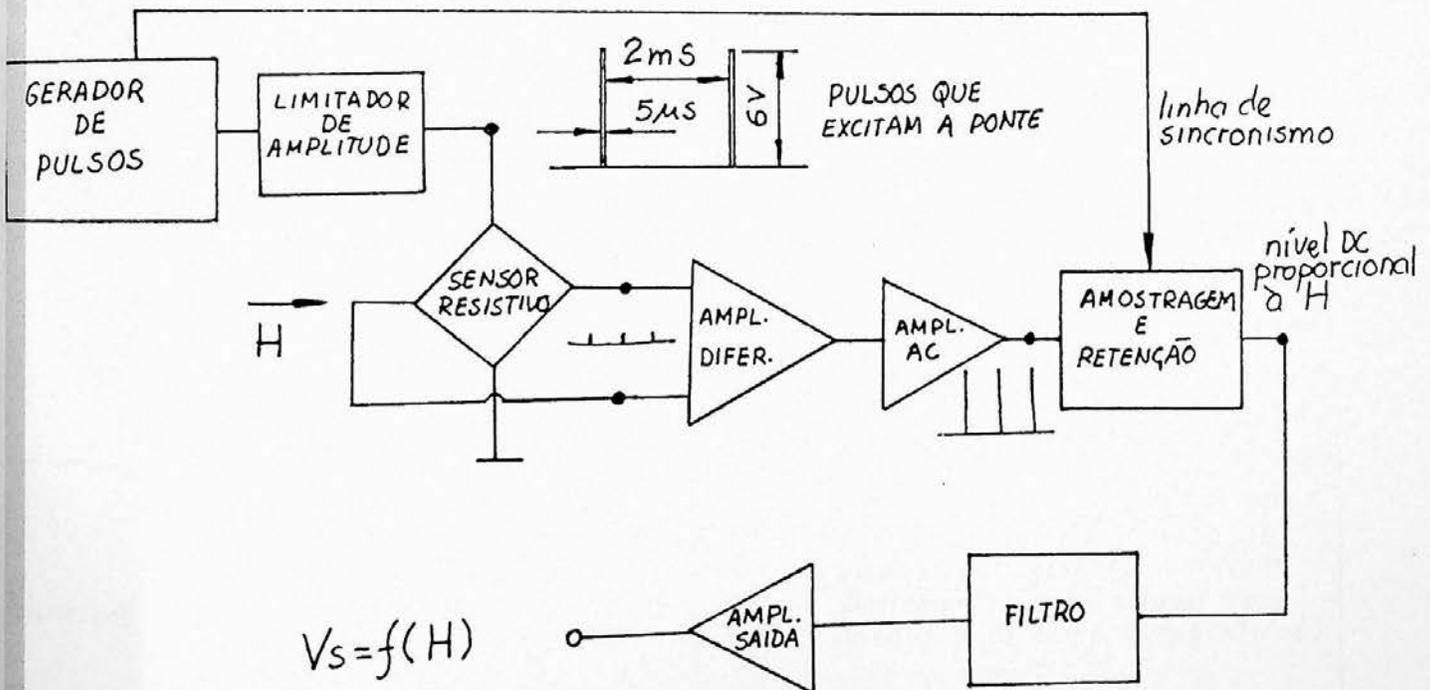


Figura 9.12 : Esquema do magnetômetro alimentado por pulsos.

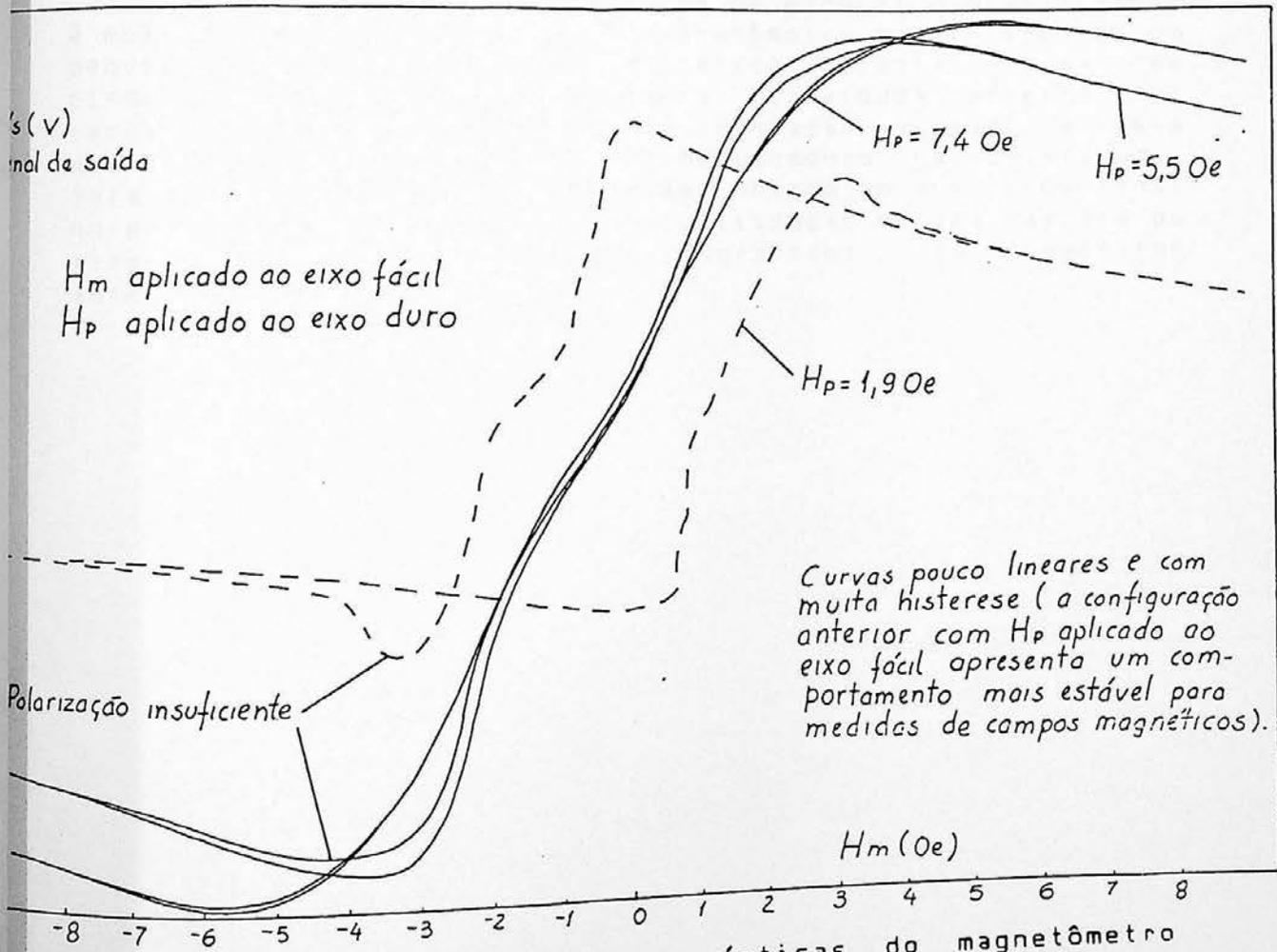
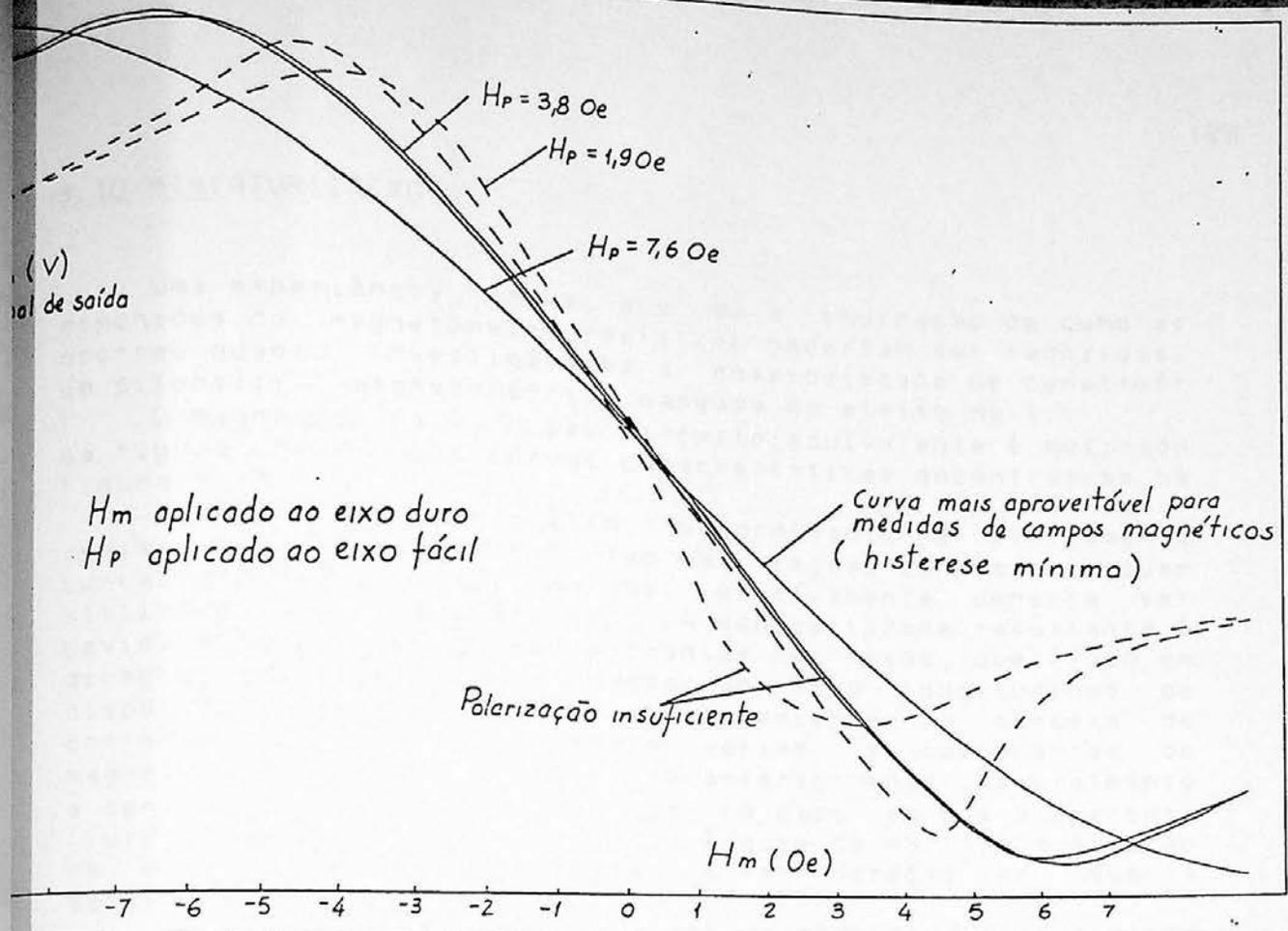


Figura 9.13 : Curvas características do magnetômetro resistivo alimentado por pulsos.

9.10 MINIATURIZAÇÃO

Uma experiência chave, que dá a indicação de como as dimensões do magnetômetro resistivo poderiam ser reduzidas, ocorreu quando investigávamos a possibilidade de construir um dispositivo magnetométrico baseado no efeito Hall.

O magnetômetro e o seu circuito equivalente é mostrado na figura 9.14. Suas curvas características encontram-se na figura 9.15.

Nota-se que o efeito predominante é tipicamente resistivo e o dispositivo tem uma região central em suas curvas características, na qual efetivamente poderia ser utilizado como um magnetômetro. A sensibilidade resultante é devida a distribuição de correntes no filme, que fluem em direções inclinadas em relação ao eixo longitudinal do dispositivo. As resistências, equivalentes a parcela de corrente que flui obliquamente, seriam as componentes do magnetômetro em ponte discutido anteriormente. Naturalmente a sensibilidade é menor do que no caso em que a corrente flui formando exclusivamente um ângulo de 45° com a direção de magnetização, pois esta é a direção em que a sensibilidade é otimizada.

A sugestão para a construção de modelos miniaturizados é mostrada na figura 9.16. O magnetômetro consistiria de um pequeno quadrado de filme magnético orientado numa das direções diagonais. A potência dissipada poderia ser reduzida com a aplicação de alimentação pulsada e pela diminuição da espessura do filme (aumento da resistência total). O dispositivo poderia ser obtido em sua forma final no processo de evaporação com a utilização de uma máscara ou através de métodos fotolitográficos, já descritos anteriormente.

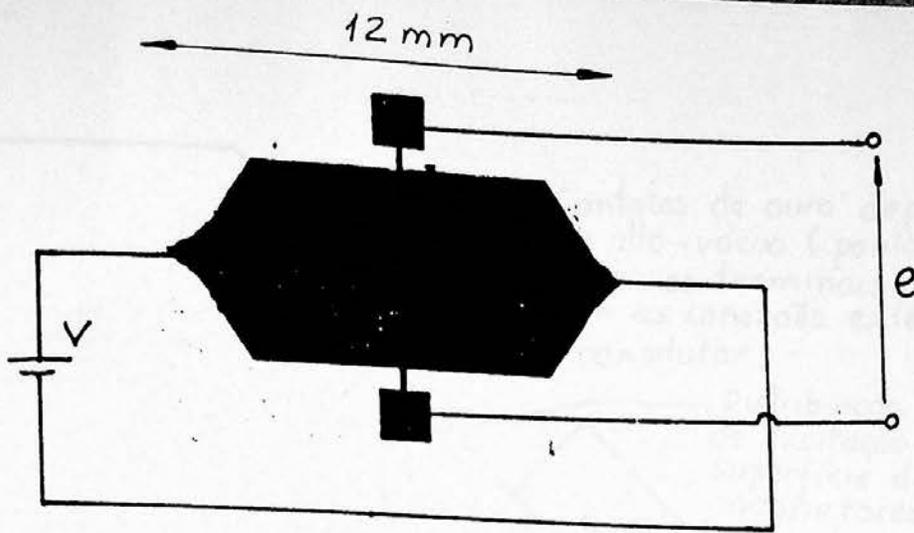


Figura 9.14: O dispositivo magnetoresistivo que inspirou a possibilidade de reduzir as dimensões do sensor resistivo.

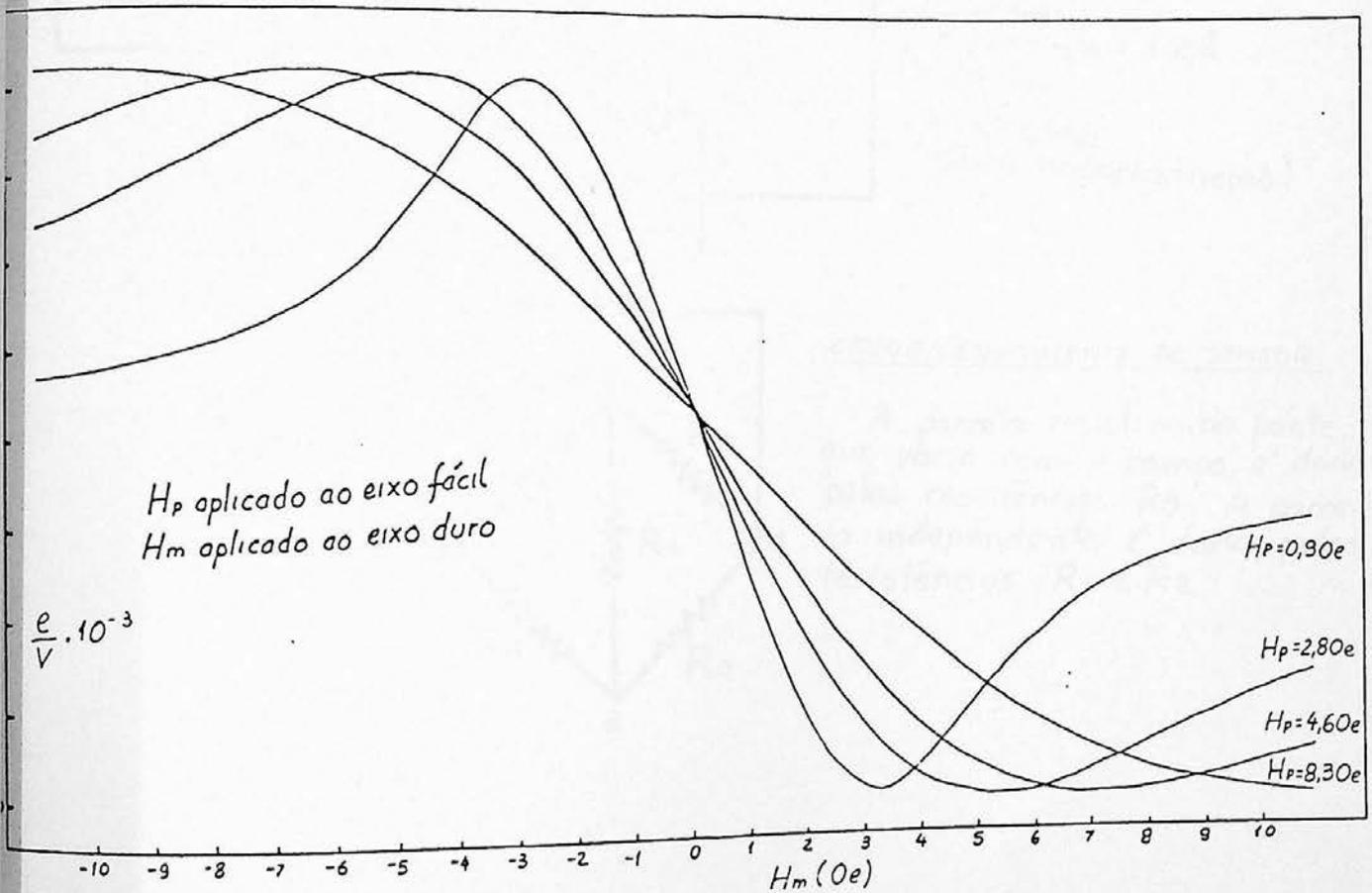
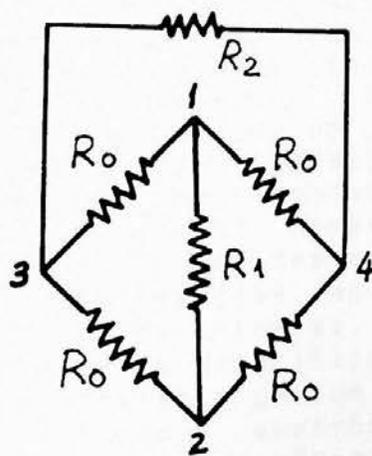
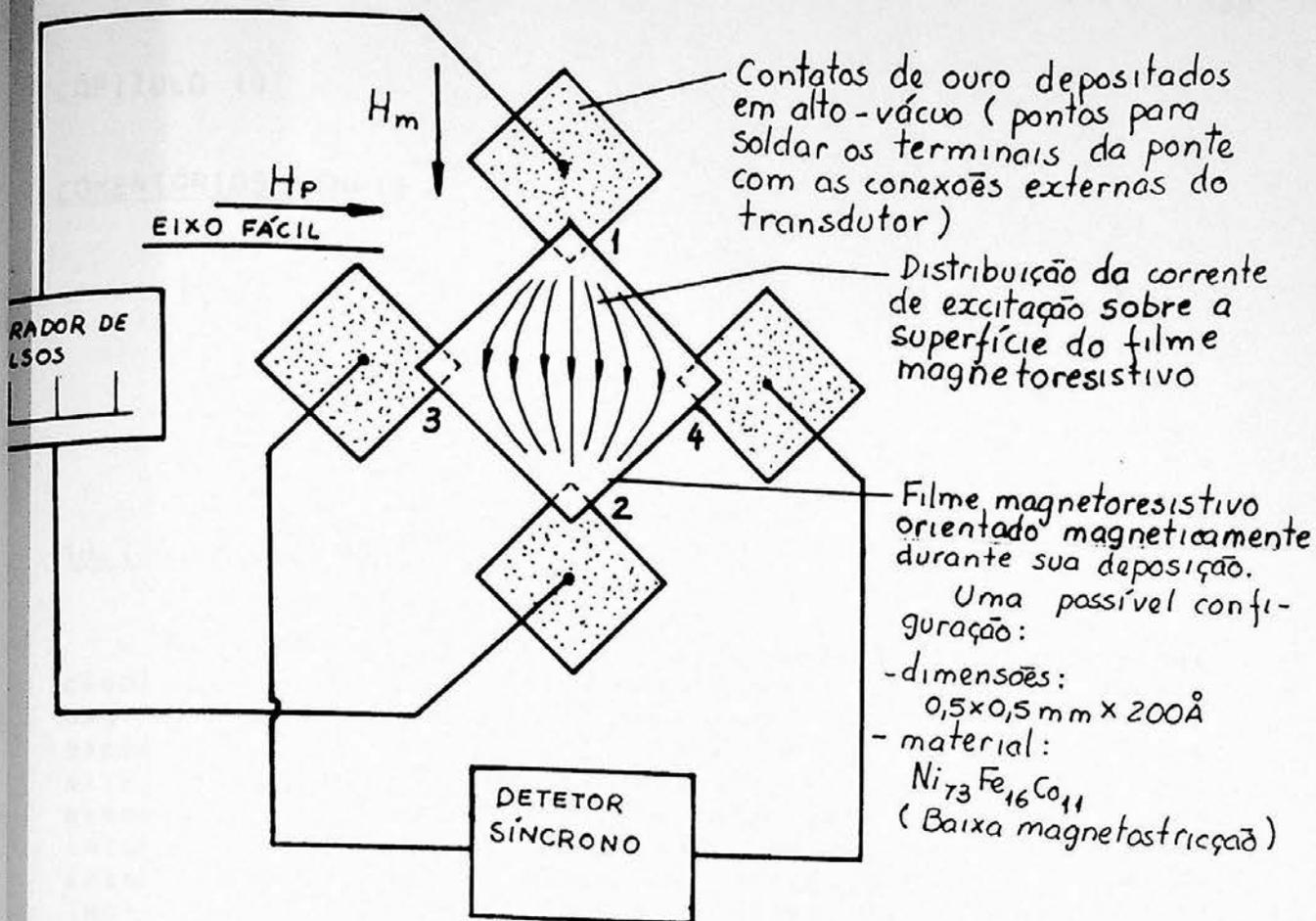


Figura 9.15: Curvas características obtidas para o dispositivo.



CIRCUITO EQUIVALENTE DO SENSOR

A parcela resistiva da ponte, que varia com o campo, é dada pelas resistências R_0 . A parcela independente é dada pelas resistências R_1 e R_2 .

Figura 9.16: Magnetometro resistivo sugerido.

CAPITULO 10

COMENTÁRIOS FINAIS10.1 COMENTÁRIOS GERAIS

No primeiro capítulo listamos uma série de atividades científicas e industriais, nas quais a medida de campos magnéticos de pequena intensidade era necessária. As especificações dos dispositivos, que se presta a tais atividades, são diferentes para cada caso em particular, por exemplo: em algumas circunstâncias podemos estar interessados na máxima resolução, em outras, na resposta em frequência. Esta diversidade, aliada as múltiplas opções de implementação de magnetômetros e produção do filme, abre um leque muito grande de possibilidades. Mesmo dentro de uma família específica de magnetômetros indutivos ou resistivos de filmes finos, as opções são variadas, como vimos anteriormente. Neste trabalho procuramos, apesar da especificidade em relação ao uso de filmes finos, dar uma visão geral do assunto para possibilitar a um possível usuário dos magnetômetros apresentados, a implementação do dispositivo específico à suas necessidades. Esta idéia de flexibilidade é característica deste trabalho e talvez deixe a impressão de que os assuntos apresentados estão muito soltos, sem conexão rígida entre si.

Se o trabalho é muito específico por um lado, sob outro ponto de vista ele transita por um grande número de áreas. Sistemas de alto-vácuo, eletrônica e técnicas de instrumentação, dispositivos mecânicos e estudos aplicados de magnetismo são alguns dos tópicos abordados no trabalho. Isto é justificável pois estamos estudando um particular problema (medidas de campos magnéticos de pequena intensidade), cuja solução requer o emprego de um longo processo. Descrevemos neste trabalho, principalmente o processo: como produzir, caracterizar e empregar os filmes nos dispositivos práticos de medida.

As opções feitas durante este processo vieram da literatura especializada, onde encontramos a descrição de alguns tipos de magnetômetros, inicialmente desenvolvidos na década de 60; mas soluções inéditas surgiram com as limitações que se apresentaram a medida que o nosso trabalho evoluía.

Este é um trabalho inicial, que ainda exigirá muito esforço para seu desenvolvimento. Procuramos deixar algumas idéias que permitam uma continuidade e principalmente muitos problemas específicos que possam originar uma infindável quantidade de outros trabalhos.

10.2 COMENTÁRIOS ESPECÍFICOS

Vamos agora comentar alguns aspectos particulares do trabalho apresentado:

a) Processo de fabricação do filme

O equipamento que construímos não tem grande eficiência em termos da porcentagem de aproveitamento dos filmes produzidos. Naturalmente este aproveitamento depende da qualidade exigida para os filmes, que é estabelecida pelas necessidades do dispositivo de utilização. Como estamos construindo protótipos é sempre interessante ter filmes tão bons, quanto seja possível.

A dispersão das características observadas nos filmes produzidos é resultado da ação combinada de um grande número de parâmetros que variam durante a deposição destes filmes. Em grande parte, o sucesso da evaporação depende muito da habilidade do operador no manejo do equipamento. Para atender às nossas necessidades (o estudo do comportamento magnético dos filmes e o desenvolvimento de alguns protótipos) este equipamento é suficiente e a questão do aproveitamento não é tão relevante. Por exemplo, se uma evaporação é bem sucedida, temos filmes suficientes para a construção de muitos protótipos. Com 32 filmes podemos construir cerca de 8 magnetômetros indutivos ou 32 resistivos. Caso grande quantidade de filmes com características bem controladas sejam necessários, outro tipo de equipamento mais sofisticado deveria ser implementado.

b) Caracterização do filme

O equipamento desenvolvido teve um desempenho satisfatório na caracterização dos filmes dentro dos parâmetros que nos interessavam. Modificações poderiam ser feitas para acoplar o sistema de medida à um microcomputador. Com o auxílio de programas específicos poderíamos medir as características dos filmes mais rapidamente e de maneira mais confiável, pois eliminaríamos o aspecto subjetivo da medida introduzido por cada operador (mesmo que o procedimento de medida seja muito bem definido sempre existe a influência do operador). Outra vantagem do sistema informatizado seria a facilidade de documentação e análise dos resultados das evaporações.

Os parâmetros medidos mostraram-se suficientes para caracterizar os filmes macroscopicamente, mas são insuficientes para estudar o comportamento localizado das suas propriedades. A adoção de técnicas para visualização dos domínios e estrutura do filme seria interessante para tentar entender como funcionam os mecanismos que determinam as propriedades apresentadas pelo filme.

c) Os protótipos

A construção de alguns protótipos de sensores de campo magnético nos permitiu visualizar o efeito das propriedades magnéticas especiais apresentadas por este filmes, confirmando as previsões das modelagens matemáticas simplificadas, apresentadas ao longo do trabalho.

O magnetômetro indutivo (dual) encontra-se num estágio já bastante desenvolvido. Os magnetômetros duais construídos com bobinas de excitação enroladas diretamente sobre os substratos apresentam altos valores de H_c , permitindo elevada sensibilidade e resolução (deteta campos na faixa de 1r) com uma eletrônica muito simples e baixo consumo de potência. Um aperfeiçoamento possível seria a utilização de filmes multicamadas, compostos por camadas de permalloy intercaladas com camadas de material isolante, como SiO. Com este tipo de filme, através do emprego de múltiplas camadas de material magnético, poderíamos obter valores mais elevados de H_c (melhor acoplamento) e portanto sensibilidades mais altas, com incremento da relação sinal/ruído. Magnetômetros indutivos poderiam também ser construídos com núcleos de outros materiais magnéticos orientados, como por exemplo as fitas amorfas descritas por H. J. de Wit [10.1], capazes de operar com excitações na faixa de MHz. Neste caso como não temos o substrato que dá suporte ao material magnético, poderíamos obter um melhor acoplamento do núcleo com a bobina, resultando em transdutores com altos valores de H_c (altas sensibilidades). Outros tipos de magnetômetros de filme fino em configurações diversas tem sido desenvolvidos ultimamente, como por

exemplo os magnetômetros de núcleos cilíndricos descritos por G. Chiron e G. DeLapierre [10.2]

Os magnetômetros realimentados e chaveados ainda vão exigir muito esforço para a elaboração de uma eletrônica menos ruidosa do que aquela que construímos.

Quanto aos magnetômetros resistivos, estes encontram-se ainda muito pouco desenvolvidos e estudados, mas suas possibilidades efetivas de utilização são evidentes. Se a miniaturização deste magnetômetro for realmente possível, sua montagem poderia ser feita num "chip" que já contivesse o gerador de pulsos e os circuitos amplificadores e detetores, possibilitando a construção de um magnetômetro completo de reduzidas dimensões e baixo custo.

APÊNDICES

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os resultados obtidos em uma pesquisa realizada com o intuito de avaliar o conhecimento dos alunos em relação ao tema em questão. A metodologia utilizada foi a de questionário aplicado a uma amostra de 100 alunos matriculados em uma disciplina de Física. Os dados foram analisados estatisticamente e os resultados são apresentados a seguir.

Os resultados da pesquisa indicam que a maioria dos alunos possui um conhecimento básico sobre o assunto, porém há uma necessidade de aprofundamento em determinados aspectos. Isso pode ser observado a partir da análise das respostas às perguntas de maior dificuldade.

Em conclusão, a pesquisa demonstrou a importância de se trabalhar com conteúdos que despertem o interesse dos alunos e que sejam apresentados de forma clara e objetiva. Além disso, é fundamental a utilização de recursos didáticos que auxiliem na compreensão dos conceitos abordados.

APENDICE A.1.1O MAGNETÔMETRO "FLUX-GATE"

O magnetômetro "flux-gate" é um dos mais utilizados para a medida de campos magnéticos de baixa intensidade [a.1.1]. Seu princípio de funcionamento é bastante simples: Um núcleo de material ferromagnético, orientado e de alta permeabilidade, é submetido a um campo magnético alternado com intensidade superior àquela necessária à sua saturação. Quando um campo externo é aplicado ao sensor, a simetria ímpar do fluxo magnético presente no núcleo é quebrada. Acoplado um enrolamento secundário a este núcleo (figura 1.1), teremos a indução de harmônicas com o dobro da frequência do sinal de excitação. A amplitude das harmônicas pares induzidas é proporcional à intensidade do campo aplicado.

Na montagem apresentada na figura 1.2, o cancelamento das harmônicas ímpares é obtido pela adequada disposição de um conjunto de bobinas. O núcleo, dividido em dois segmentos, é excitado por dois enrolamentos interligados com polaridades opostas e o sinal é extraído através de dois secundários.

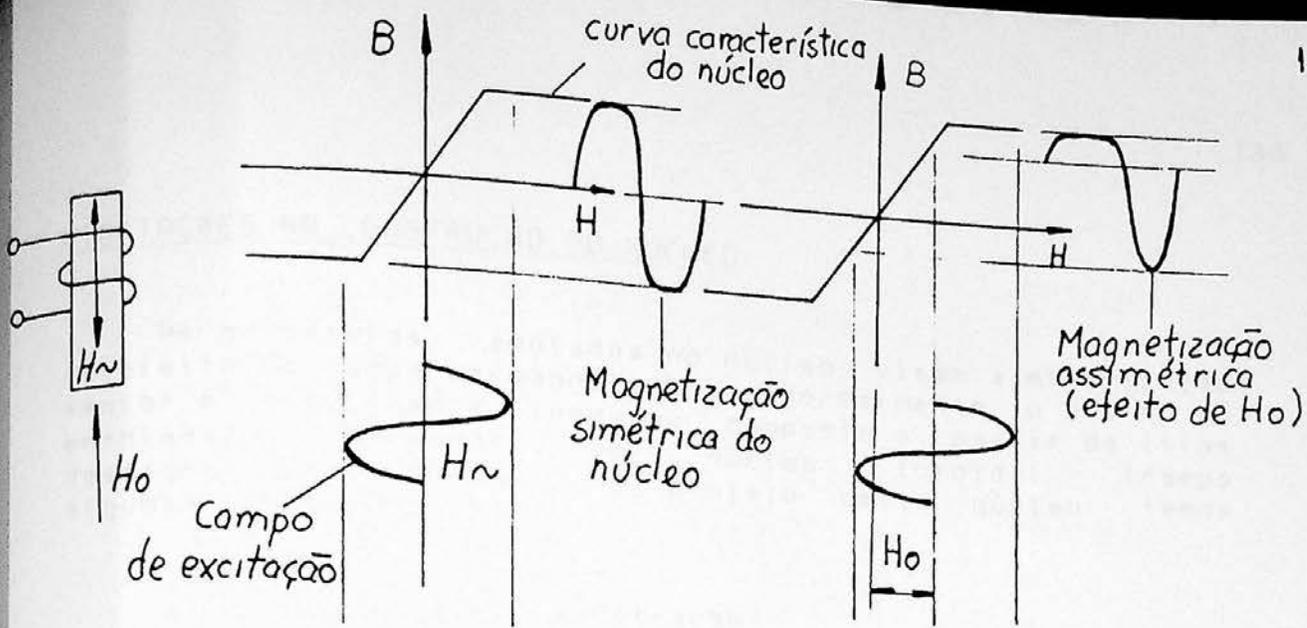


Figura 1.1: Princípio de funcionamento do magnetômetro "flux-gate".

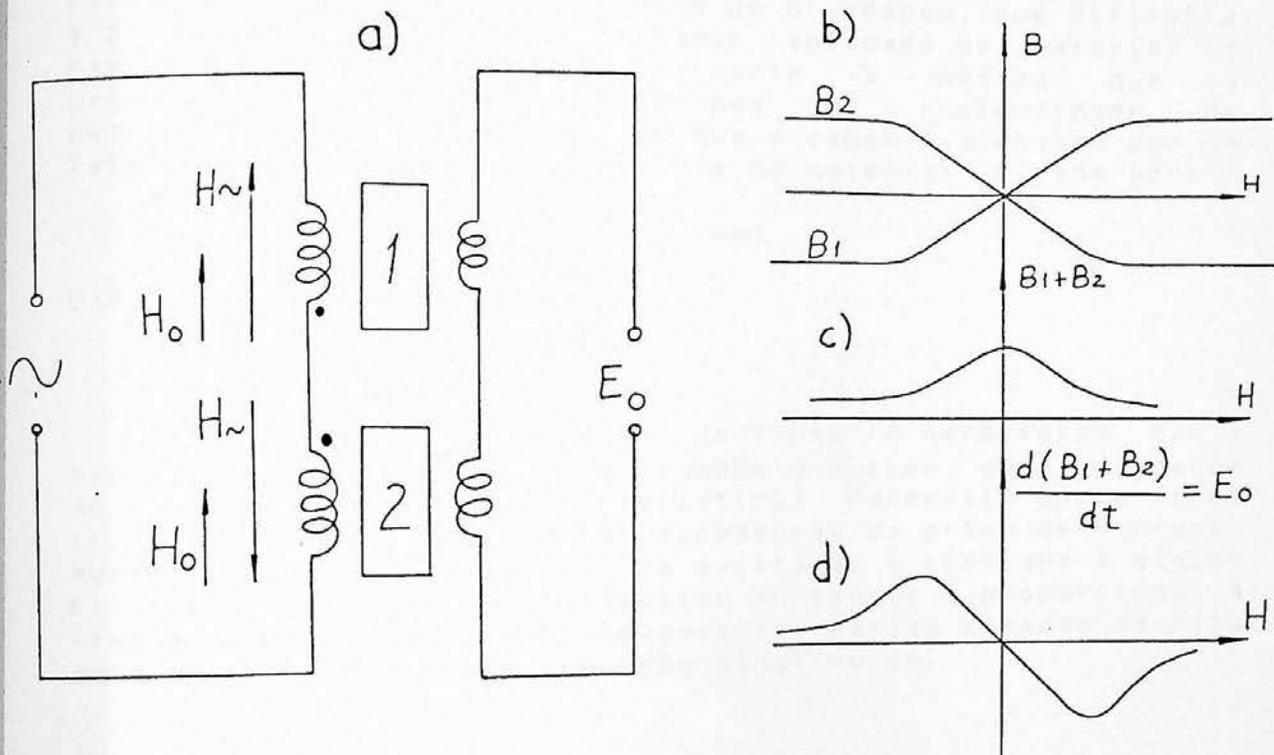


Figura A.1.2: Magnetômetro "flux-gate" aperfeiçoado:
 a) Montagem típica; b) Curvas características de cada seção do núcleo; c) Composição dos sinais das duas seções do núcleo; d) Curva característica do sinal obtido nos enrolamentos secundários do magnetômetro ($E_o \times H$).

LIMITAÇÕES NA CONSTRUÇÃO DO NÚCLEO

As geometrias adotadas no núcleo visam a minimização do efeito do campo desmagnetizante. Normalmente, o núcleo do sensor é retilíneo e longo ou composto a partir de tiras enroladas, formando um núcleo toroidal (campo desmagnetizante nulo). No projeto deste núcleo temos algumas limitações:

a) Profundidade de penetração:

Sendo o núcleo composto de material metálico, sua resistividade é baixa. Quando o núcleo está sujeito a um campo magnético AC, haverá a indução de correntes parasitas. Estas correntes criam um efeito de blindagem, que dificulta a penetração das linhas do campo aplicado no material (o campo é atenuado exponencialmente à medida que a profundidade aumenta). Definimos uma profundidade de penetração característica, em que o campo é atenuado por um fator e^{-1} em relação à superfície do material. É dada por:

$$\delta = 503 \sqrt{(\rho / \mu f)} \quad (\text{mm})$$

Onde: ρ = resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$)

μ = permeabilidade

f = frequência (Hz)

Para uma boa penetração de fluxo é necessário que a espessura do material, que compõe o núcleo, seja bem menor do que a profundidade característica). Materiais muito finos (fitas amorfas) apresentam espessuras da ordem de microns. Nestes casos a frequência de excitação é limitada à alguns KiloHertz. Como o sinal induzido no sensor é proporcional à frequência de excitação, devemos ter várias camadas de fita para obter uma razoável relação sinal/ruído.

b) Histerese:

Outro problema, causado pelas correntes induzidas, é a introdução de uma histerese extra nas curvas características do núcleo. Há dissipação de potência por efeito Joule (área extra da curva de histerese = energia dissipada). Este efeito é também proporcional à frequência de operação.

c) Campo desmagnetizante:

No projeto do núcleo são adotadas geometrias que procuram minimizar o efeito do campo desmagnetizante: toróides, cilindros alongados. O campo desmagnetizante interfere no funcionamento do sensor, pois cria polos em que as condições de magnetização do núcleo são alteradas, podendo assumir configurações indesejáveis ao bom desempenho do sensor.

Esta série de limitações levam a restrições no uso do magnetômetro "flux-gate":

- A limitação da frequência de excitação, devido às correntes parasitas, exige muito material para a confecção do núcleo (aumentar a relação sinal/ruído) e limita a frequência máxima do campo que o sensor é capaz de medir.

- Devido a grande quantidade de material do núcleo, um grande consumo de potência é exigido para excitá-lo. Somando-se a potência gasta para alimentar os complexos circuitos eletrônicos de apoio, temos um consumo que restringe o uso deste magnetômetro com baterias (trabalho de campo).

APENDICE A.1.2RUIDO BARKHAUSEN

O movimento de paredes é um processo irreversível e descontínuo. O deslocamento das paredes ocorre com atritos internos e perdas. O mecanismo de magnetização, associado a esse movimento de paredes, é intrinsecamente ruidoso. O ruído gerado pelo movimento de paredes é conhecido como efeito Barkhausen: Por mais lenta e contínua que seja a variação do campo aplicado à amostra, a magnetização sempre varia de maneira descontínua, através de pequenos saltos discretos. Na figura 2.1 temos uma experiência que evidencia este processo. Em 2.1.a observa-se no sinal não integrado que a reversão da magnetização ocorre como resultado de uma sequência de pequenos pulsos gerados pela súbita mudança da posição das paredes. O efeito Barkhausen pode ser explicado com o auxílio da figura 2.1.d: Cada domínio necessita vencer as barreiras de potencial, originadas na estrutura cristalina, com a finalidade de obter uma nova configuração, que minimiza a energia magnética potencial total da amostra sujeita à aplicação de um campo externo. Isto somente é possível quando a energia proveniente do campo externo e da agitação térmica é suficiente para que a parede transponha a barreira de potencial. A nova configuração de domínios pode não ser a de menor energia e assim, sucessivos movimentos de paredes serão executados (dependendo da energia disponível em cada domínio) até que o sistema se acomode.

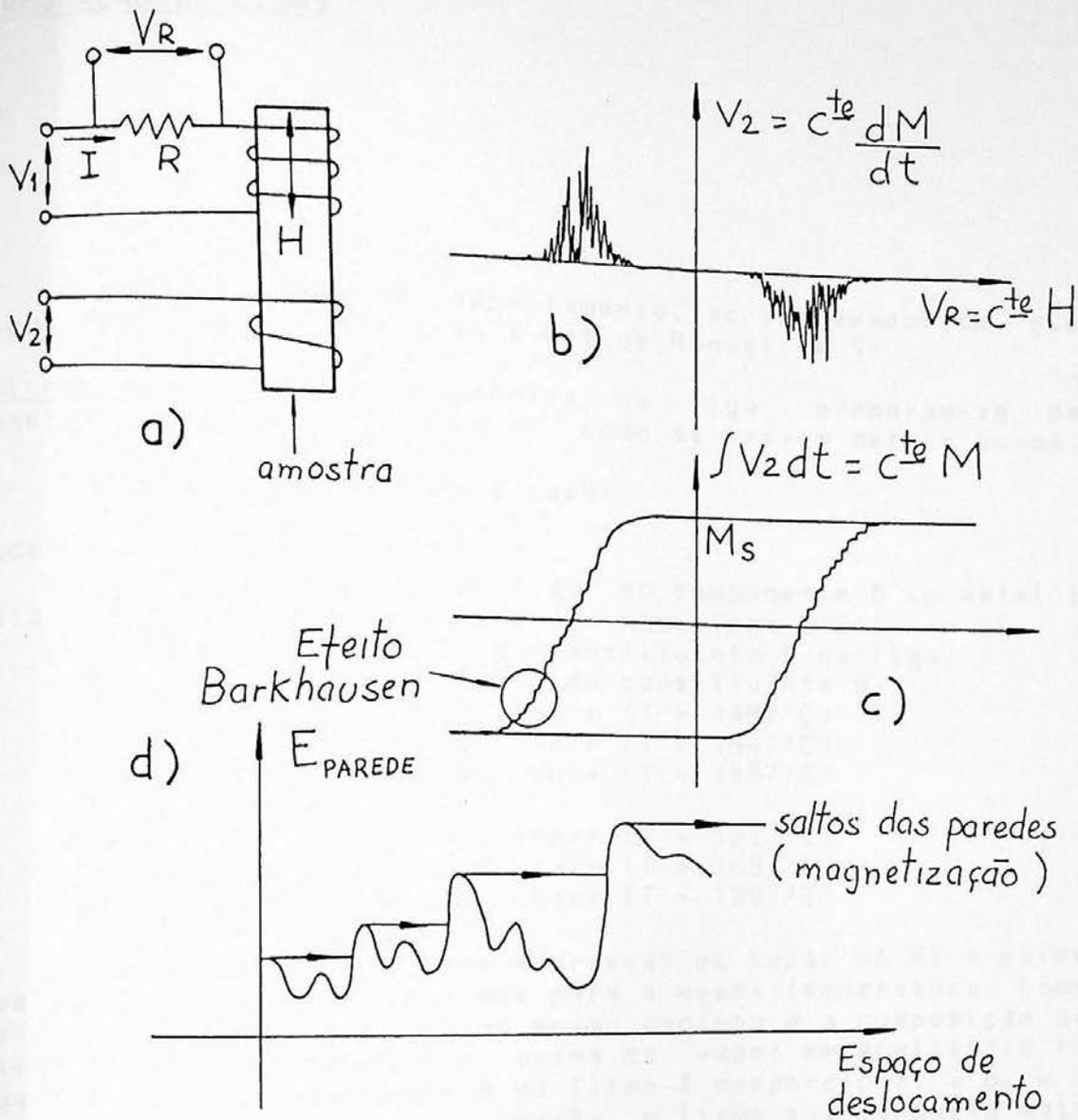


Figura 2.1: Efeito Barkhausen: a) Montagem experimental; b) $dM/dt \times H$; c) $M \times H$; d) Barreiras de potencial que as paredes de domínios devem vencer.

EVAPORAÇÃO DE LIGAS

O permalloy tem um comportamento, ao ser evaporado, que segue com razoável precisão a Lei de Raoult [4.1].

Lei de Raoult: Os componentes da liga evaporam-se de maneira independente, entre si, como se fossem metais puros.

Podemos escrever, neste caso:

$$p_B = x_B p_B^*$$

onde:

p_B = pressão parcial do componente B (o metal B esta dissolvido em outro metal A, numa liga A-B).

x_B = fração molar do constituinte B na liga.

p_B^* = pressão de vapor do constituinte B:

Fe: 10^{-2} torr (T = 1487°C)
 10^{-1} torr (T = 1647°C)
 1 torr (T = 1857°C)

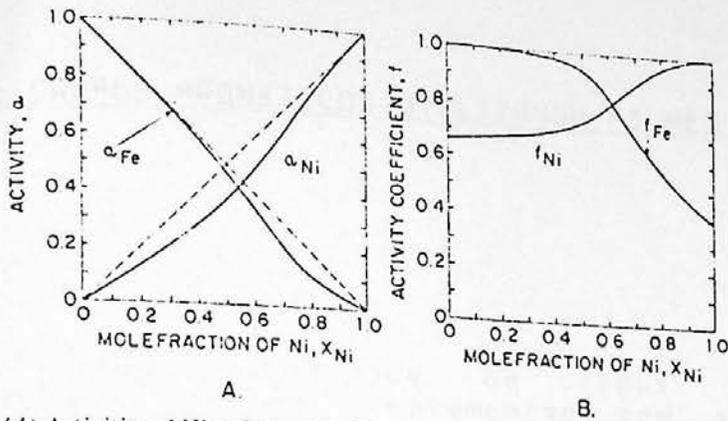
Ni: 10^{-2} torr (T = 1527°C)
 10^{-1} torr (T = 1697°C)
 1 torr (T = 1907°C)

Observa-se acima, que a pressão de vapor do Ni é maior que a do Fe se interpolarmos para a mesma temperatura. Como os dois componentes estão no mesmo cadinho e a composição do filme é aproximadamente a mesma do vapor em equilíbrio (a quantidade do componente B no filme é proporcional a p_B e a de A, proporcional a p_A), então o filme sairia muito mais rico em Fe do que a liga no cadinho. Na realidade o filme sai apenas ligeiramente mais rico de Fe (em torno de 2% a mais de Fe). A diferença observada ocorre pois a liga não segue exatamente o comportamento previsto pela Lei de Raoult. Para ilustrar esta diferença vamos introduzir o conceito de atividade (a) e coeficiente de atividade (f), como:

$$a_B = p_B / p_B^*$$

$$a_B = f_B x_B$$

Na figura 4.1 notamos, que na realidade, a taxa de evaporação do Fe é bem menor que a prevista, pois em torno da composição em que trabalhamos ($Fe_{1.7} Ni_{8.1}$) o coeficiente de atividade do Fe é bem menor que o do Ni, o que compensa a diferença nas pressões de vapor do Fe e do Ni.



(A) Activities of Ni and Fe in liquid nickel-iron alloys at 1600°C. Ideal behavior according to Raoult's law: broken lines. Experimentally determined: solid lines. (B) Activity coefficients for the same conditions. (After data from Zellars, Payne, Morris, and Kipp.¹³)

Figura 4.1: Extraído da referência 4.1.

Uma última observação, quanto a evaporação da liga, refere-se a taxa de evaporação. Se a taxa de evaporação é alterada, significa que a temperatura da liga no cadinho mudou. A atividade e as pressões de vapor dos componentes da liga serão alteradas, o que implica que a composição de partida no cadinho (para obtenção de um filme sem magnetostricção será diferente também. A melhor maneira de determinar a composição adequada, a cada taxa de evaporação, consiste em fazer uma série de tentativas no equipamento de evaporação em uso.

APENDICE A.7.1

MEDIDA DE CAMPOS MAGNÉTICOS UTILIZANDO FILMES FINOS

Uma grande quantidade de tipos diferentes de magnetômetros pode ser implementada com a utilização de filmes magnéticos finos. A seguir são listados alguns dos tipos desenvolvidos por vários pesquisadores, segundo uma coletânea feita por H. R. Irons e L. J. Schewee [A.7.1]:

A.7.1 MAGNETÔMETROS COM SATURAÇÃO DO NÚCLEO

Nesta classificação estão os magnetômetros que são submetidos a um sinal de excitação ligeiramente superior ao valor de H_c :

a) Um campo de excitação senoidal ou quadrado de 4.2MHz é aplicado ao longo do eixo duro e o sinal é induzido numa bobina acoplada ao eixo fácil do filme, que também é o eixo de medida. Se um campo estático é presente no eixo fácil, as rotações da magnetização serão assimétricas provocando a indução de um sinal com o dobro da frequência da excitação. A fase deste sinal depende do sentido e a amplitude é proporcional à intensidade do campo estático. O princípio de funcionamento deste tipo de magnetômetro é muito semelhante ao flux-gate convencional.

Limite de detecção: 10^{-6}Oe

b) Um campo de excitação de 390KHz é aplicado no eixo fácil e a quarta harmônica par (1.56MHz) é induzida no eixo duro, ao longo do qual também é feita a medida do campo estático. Numa variação similar, o substrato do filme é substituído por um cilindro com anisotropia circunferencial (eixo duro ao longo do cilindro) e a medida é feita pela segunda harmônica de uma excitação de 550KHz.

Limite de detecção: 10^{-5}Oe

c) Neste magnetômetro um campo estático de intensidade aproximadamente igual à H_k é aplicado ao longo do eixo duro. Pode-se dizer que o potencial do campo de anisotropia (que orienta a magnetização ao longo do eixo fácil) é "compensado" por esse campo estático. O resultado é uma alta sensibilidade da direção de magnetização em relação ao campo ambiente (medido ao longo da direção fácil). A medida é feita pela determinação da direção da magnetização. Isto é possível com a aplicação de um campo modulador de 500MHz sobre o eixo fácil e uma bobina pick-up no eixo duro. Nesta bobina são induzidas harmônicas pares, cuja amplitude depende da direção de magnetização (máxima para M a 45° com os eixos do filme e mínima para M paralela ao eixo duro).
Limite de detecção: $10^{-5} Oe$

A.7.2 MAGNETÔMETRO DE RESSONÂNCIA FERROMAGNÉTICA

d) A determinação da intensidade do campo é feita pela medida da impedância do filme operando próximo da frequência de ressonância ferromagnética. Esta frequência é dada por: $\omega = cte. [B(H_x + H_p \pm H_s)]^{1/2}$, onde H_x é o campo desconhecido e H_p é o campo de polarização e o sinal \pm depende da direção de aplicação de H_x . Medidas de campos de baixa intensidade podem ser feitas com frequência de operação em torno de 300MHz e banda passante de 100MHz.
Limite de detecção: $10^{-4} Oe$

A.7.3 MAGNETÔMETROS PASSIVOS

e) Filmes isotrópicos são depositados sobre pequenas esferas de rubi. Estas esferas são inicialmente desmagnetizadas e colocadas em grande número, num encapsulamento isolante exposto ao pulso magnético, cuja amplitude e direção desejamos medir. A medida é feita através da comparação entre o efeito do pulso desconhecido sobre a magnetização das esferas e o efeito de um pulso de calibração bem determinado sobre as mesmas esferas. Como o processo de magnetização no filme é muito rápido podemos medir as características de pulsos de poucos nanosegundos.
Limite de detecção: 50e

A.7.4 MAGNETÔMETROS RESISTIVOS

f) Este tipo de magnetômetro aproveita o mecanismo da magnetoresistência que consiste na variação da resistividade de acordo com o ângulo formado entre a direção em que é feita sua medida e a direção em que se encontra a magnetização: $R=R_0+(1/2).\alpha R.\cos 2\delta$, onde δ é o ângulo formado entre a magnetização e a corrente de medida, e αR é a diferença entre a resistividade obtida na direção de magnetização e na direção ortogonal. Estes magnetômetros podem assumir várias configurações, sendo a mais comum a ponte resistiva obtida através de técnica fotolitográfica aplicada diretamente sobre o filme. Este tipo de magnetômetro será estudado detalhadamente no capítulo 9.

Limite de detecção: $10^{-4}Oe$

A.7.5 MAGNETÔMETROS COM REDUZIDA EXCITAÇÃO

g) Magnetômetros, utilizando uma composição de vários campos de excitação, podem ser implementados de maneira a obter na saída uma composição dos sinais originados destes campos. Excitações de 4.2 e 6.5MHz são aplicadas ao eixo fácil e a composição dos sinais (10.7MHz) é extraída no eixo duro, que também é o eixo de medida.

Limite de detecção: $5.10^{-4}Oe$

h) Aplicando um campo de excitação de 10-20MHz numa bobina acoplada ao eixo duro e o campo a ser medido no eixo fácil, temos um transdutor cuja indutância (medida na mesma bobina de excitação) varia com o campo aplicado. Este transdutor será estudado detalhadamente no capítulo 8, devido a sua excelente performance aliada à simplicidade construtiva.

Limite de detecção: $10^{-4}Oe$

MÉTODOS DE DETECÇÃO DA VARIAÇÃO DA INDUTÂNCIA

A variação de indutância do transdutor indutivo, submetido a ação de campo externos, deve ser convertida num sinal utilizavel de tensão ou frequência. Pode-se fazer a medida apenas com o uso de uma ponte de indutância, entretanto, métodos simples de detecção são mais convenientes, principalmente pela praticidade e pelas sensibilidades obtidas nestes métodos:

a) DETETOR POR FREQUÊNCIA

O sensor e um capacitor formam um circuito ressonante, cuja frequência característica determina a frequência de operação de um oscilador. Um frequencímetro acoplada à saída do oscilador fornece uma leitura proporcional ao campo:

$$f(H_m) = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

b) DETETOR POR BORDA

Um oscilador de frequência fixa, ligeiramente diferente da frequência de ressonância do circuito LC (formado pelo sensor e um capacitor), produz uma corrente constante de excitação. Esta corrente, fluindo através do circuito ressonante, gera um nível de tensão proporcional ao campo aplicado (figura 7.1). A curva de transferência é bastante linear para sinais pequenos. O método oferece grande sensibilidade, pois o efeito indutivo é multiplicado pelo alto valor do fator de qualidade (Q) do circuito ressonante. Há porém desvantagens:

- A frequência do oscilador deve ser muito estável, o que requer o emprego de componentes sensíveis e de custo elevado (oscilador controlado a cristal).

- O sistema é altamente sensível a desvios na frequência do circuito ressonante e a amplitude do sinal de excitação (drift térmico e drift de longo período), exigindo componentes especiais e calibrações periódicas.

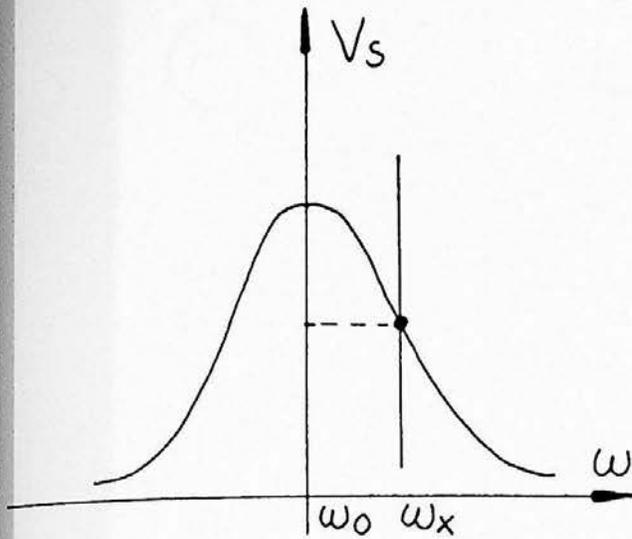
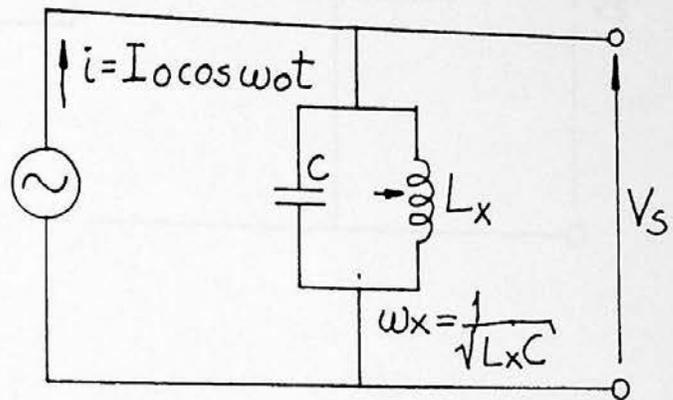


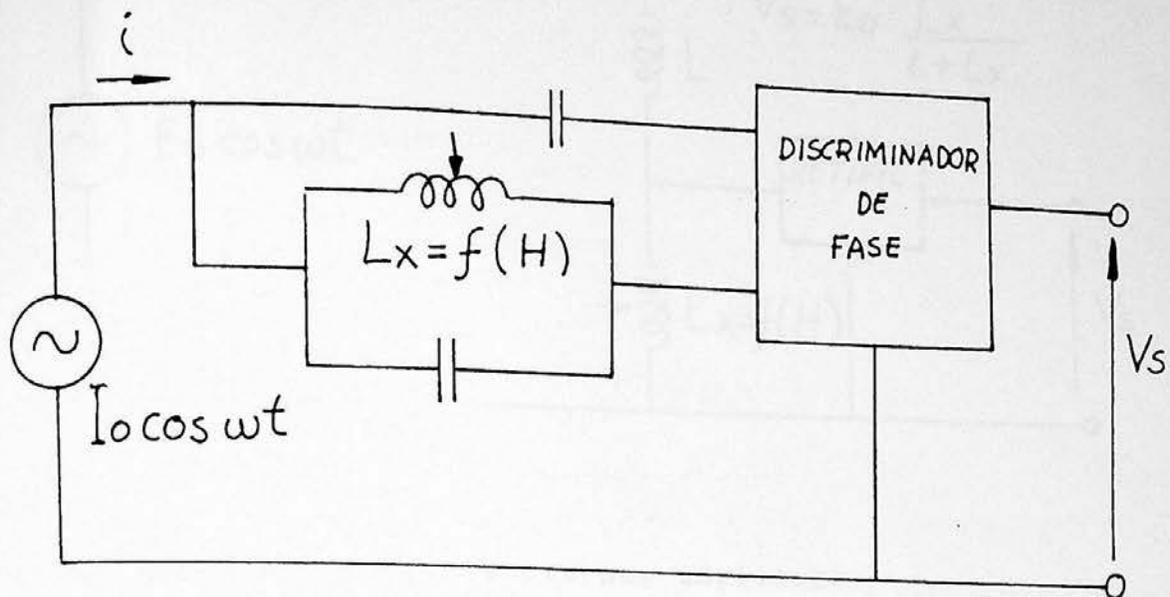
Figura 7.1: Detetor por borda.



$$V_s = f(\omega_x) = f(L_x) \\ = f(H)$$

c) DETETOR POR FASE

Este tipo de detetor pode apresentar várias configurações. A ideia básica consiste em montar uma rede, na qual, um dos ramos seja constituído por um circuito LC (figura 7.2). Um sinal de excitação atravessa a rede e as defasagens introduzidas pelos vários ramos são detetadas por um discriminador de fase. O sistema apresenta boa linearidade e sensibilidade, mas o grande número de componentes envolvidos implica em drifts e recalibrações periódicas.



$$V_s = f(L_x)$$

Figura 7.2: Detetor por fase.

d) DETETOR POR AMPLITUDE

Neste sistema medimos a impedância do sensor. Configura-se um divisor de tensão, cujos elementos são impedâncias de valor conhecido e o sensor (figura 7.3). Após a retificação do sinal de excitação aplicado sobre ao divisor, temos um nível de tensão proporcional à indutância. Este sistema tem a grande vantagem de ser insensível à frequência do oscilador, se os dois elementos são da mesma natureza (indutivos).

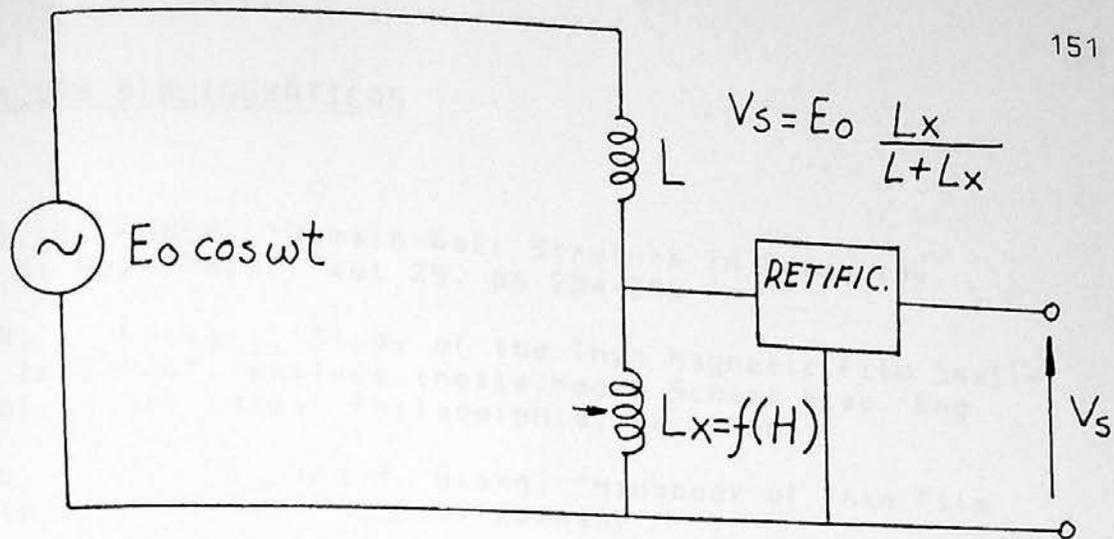


Figura 7.3: Detecção da indutância por amplitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [3.1] E. E. HUBER, "Domain-Wall Structure in Permalloy Films", J. Appl. Phys., vol 29, pp 294-296
- [3.2] R. L. Fussell, "Study of the Thin Magnetic Film Small-Signal Inductor", masters thesis, Moore School Elec. Eng., Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, Dec. 1965
- [4.1] L. I. Maissel and R. Glang, "Handbook of Thin Film Technology", McGRAW-Hill Book Company
- [4.2] J. A. Freedman, "Soft Magnetic Thin-Film Memory Materials", IEEE Trans. Magnetics, vol MAG-5, pp 754-764
- [4.3] C.H. Wilts, Proc. Int. Symp. Thin Film Ph., Clausthal, Germany, 1965, pp 422
- [4.4] G. R. Hoffman, "Minimising the Noise in a Thin Film Inductance variation Magnetometer", J. Phys. Sci. Instrum., vol 13, 1980, pp 1200-1204
- [8.1] C. J. Bader and C.S. DeRenzi, "Recent Advances in Thin Film Inductance Variation Magnetometer", IEEE Trans. Magnetics, vol MAG- , 1974, pp 524-527
- [8.2] G.R. Hoffman "Some Factors Affecting The Performance of a Thin Film Inductance Variation Magnetometer", IEEE Trans. Magnetics, vol MAG-17, 1981, pp 3367-3369
- [9.1] R.S. Hebbert and L.J. Schewe, "The Thin Magnetoresistance Magnetometer", The Rev. Scien. Instr., Vol 37, 1966, pp 1321-1323
- [9.2] J. P. Jan, "Solid State Physics", Eds. Academic Press Inc., New York, 1963, Vol 5
- [9.3] Catálogo de Fotofabricação, Kodak Brasileira
- [9.4] G. R. Hoffman, "Factors Affecting the Performance of a Thin Film Magnetoresistive Vector Magnetometer", J. Appl. Phys., 1982, pp 8266-8268
- [10.1] H.J. Wit, "Domain Patterns and High-Frequency Magnetic Properties of Amorphous Metal Ribbons", J. Appl. Phys., 1985, pp 3560-3562
- [10.2] G. Chiron, "Description of a Film Directional Magnetometer", IEEE Trans. Magnetics, vol-15, 1979, pp 1815-1817

1A.1.11 W. J. Ohl, "Estudo Sobre Magnetômetros do Tipo Flux-Gate", Tese de Mestrado, 1984, Ins. de Física da USP, São Paulo

1A.2.11 H. R. Irons, "Magnetic Thin-Film Magnetometers for Magnetic-Field Measurement", IEEE Trans. Magnetics, vol MAG-8, 1972, pp61-65