

# Magnetoresistência e sensores magnetoresistivos

MEFT: Laboratório de Física Experimental Avançada

2015/2016, 1º semestre (Grupo 4B, 4ª feira)

FREDERIK EISTRUP (75762), DIOGO CARVALHO (78456), RICARDO BARRUÉ (78955)

## Resumo

Com o objectivo de estudar os efeitos magnetoresistivos na base de sensores magnéticos, estudou-se o efeito de magnetoresistência anisotrópica (AMR) e magnetoresistência gigante (GMR) em filmes finos, estendendo-se depois estes conceitos a estruturas de multicamadas com diferentes configurações ou de dimensões micrométricas padronizadas - avaliando o efeito destes factores sobre a funcionalidade dos sensores.

## 1. Introdução Teórica

Altamente empregues hoje em dia, os sensores magnetoresistivos são dispositivos nanoestruturados para ter elevada sensibilidade, baseando-se na variação da resistência eléctrica com a presença de campo magnético.

### 1.1. Magnetoresistência Anisotrópica (AMR)

Descoberto por Thomson em 1827, o efeito de **Magnetoresistência Anisotrópica (AMR)** característico de materiais ferromagnéticos, é a variação da resistência eléctrica  $R$  em função do ângulo  $\theta$  entre a direcção de magnetização do material  $\mathbf{M}$  a direcção da corrente eléctrica  $\mathbf{J}$  aplicada - derivado do acoplamento spin-órbita, tem origem nas colisões dos electrões da banda-s de condução com os da banda-d com secção recta de *scattering* anisotrópica.

A probabilidade de colisão depende da orientação da magnetização em relação à corrente e é maior quando as orbitais (banda-d) estão no plano da corrente, maior resistividade  $\rho_{\parallel}$ ; e menor quando estão perpendiculares, menor resistividade  $\rho_{\perp}$  (Figura 1).

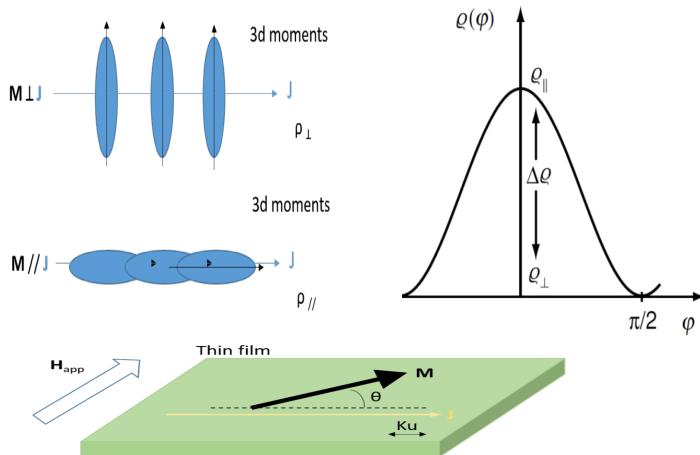


Figura 1: Efeito AMR: resistividade eléctrica para magnetização  $\mathbf{M}$  e corrente  $\mathbf{J}$  perpendiculares  $\rho_{\perp}$  ou paralelas  $\rho_{\parallel}$  e configurações com  $\theta$  intermédio.

No crescimento dos filmes finos deste tipo, aplica-se um campo magnético constante induzindo uma direcção preferencial de magnetização  $\mathbf{M}$ . Partindo de uma demonstração [1], pela minimização da energia (por unidade de volume) causada pela magnetização e do ângulo entre esta e o campo aplicado  $H_{app}$ , e ainda, no caso da magnetização preferencial ser a da corrente e em que não haja histerese, tem-se:

$$R(H_{app}) = R(0) - \Delta R \left( \frac{M_{sat} H_{app}}{2K_u} \right)^2 \quad (1)$$

com  $(M_{sat} H_{app}) / (2K_u) < 1$

em que  $R(0)$  é a resistência na ausência de  $H_{app}$ ;  $\Delta R = R(0) - R(H_{max})$ ;  $M_{sat}$  o campo de saturação e  $K_u$  o coeficiente de anisotropia (magnetização induzida no crescimento do filme). A grandeza, normalizada ao valor mínimo, utilizada para comparação entre diferentes filmes é  $MR(H)$ :

$$MR(H_{app}) = \frac{R(H_{app}) - R_{min}}{R_{min}} \quad (2)$$

### 1.2. Magnetoresistência Gigante (GMR)

Em 2007, Albert Fert e Peter Grünberg foram premiados com o prémio Nobel da Física pela descoberta do efeito de **Magnetoresistência Gigante (GMR)**, observado em filmes-finos compostos por camadas alternadas de ferromagnéticos e condutores não-magnéticos em que a resistência eléctrica varia significativamente de uma configuração em que os ferromagnéticos consecutivos tem as magnetizações anti-paralelas ( $R_{AP}$  alta) para uma em que elas estão paralelas ( $R_P$  baixa), Figura 3. Esta diferença deve-se a um *scattering* difuso dos electrões no interior das camadas ferromagnéticas e suas interfaces, que é assimétrico dependendo do sentido relativo das magnetizações que interage com o spin dos electrões na corrente (modelo das correntes de Mott).

A válvula de spin (SV) é um dispositivo que assenta neste efeito, tendo duas camadas ferromagnéticas FM1 e FM2 separadas por um condutor metálico. Uma das camadas FM é usada com referência (*pinned-layer* PL) cuja magnetização é fixada por uma camada antiferromagnética adicional (AF). A outra tem magnetização livre(*free-layer* FL) e orienta-se com campo exteriores fracos - gerando as configurações paralela ou anti-paralela entre as FM, Figura 3.

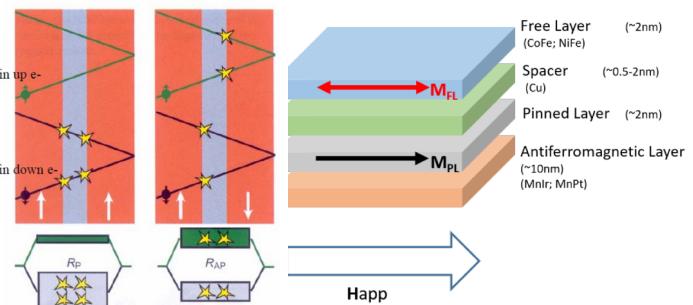


Figura 2: Efeito GMR:  $R$  para magnetizações das camadas FM paralelas  $R_P$  (baixa) ou anti-paralelas  $R_{AP}$  (alta); válvula de spin com AF, PL, espaçador e FL

A magnetoresistência define-se em função do campo exterior mas é caracterizada pelo seu máximo:

$$MR(H) = \frac{R(H) - R_P}{R_P} \quad MR_{max} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P} \quad (3)$$

Pode ajustar-se a espessura do espaçador para atenuar o desvio  $H_{off}$  por acoplamento magnetoestático. A histerese existente deriva do campo coercivo  $H_c$  da FL, relacionado com o seu  $K_u$  e eixo preferencial de magnetização.

### 1.3. Sensores Magnetoresistivos Micrométricos (SMM)

A magnetização dos domínios na superfície tende a ser tal que as linhas de campo se mantenham dentro do ferromagnético, portanto as suas orientações vão ser laterais, independentemente das magnetizações no interior do material mas afectando os domínios mais próximos. Como tal, pode-se ainda moldar a estrutura rectangularmente com um comprimento  $L$  muito superior à largura  $h$  e espessura  $t$  ( $L \gg h \gg t$ ), para que a magnetização preferencial da FL seja segundo o comprimento  $L$ , devido ao efeito predominante das magnetizações laterais.

Assim, em  $H = 0$ , as magnetizações de FL e PL são perpendiculares, e a transição entre  $R_{PR}$  e  $R_{AP}$  nesta configuração é gradual - linearizando a resposta  $MR(H)$ .

A demonstração deste resultado parte também da minimização da energia total do sistema [1]. Sendo  $N_d = 4\pi t/h$  o termo desmagnetizante,  $H_k$  a energia interna anisotrópica e  $M_{sat}$  o campo de saturação: enquanto  $H_k > N_d M_{sat}$  existe histerese; para  $H_k < N_d M_{sat}$  existe troço linear sem histerese, num intervalo  $\Delta H = 2(H_k - N_d M_{sat})$ , aumentando com  $N_d$ , ou seja, com a diminuição da dimensão  $h$ ! Este tipo de padronização é aplicada no caso dos Sensores Magnetoresistivos Micrométricos (SMM).

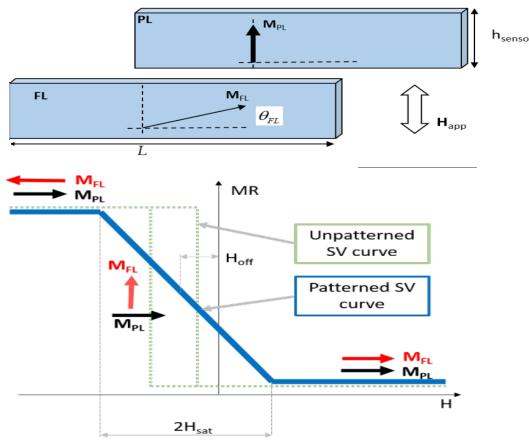


Figura 3: Padronização de Amostras SV: efeito da relação  $L \gg h$  sobre a linearização da curva  $MR(H)$ .

Importa, para todos estes casos, o parâmetro de sensibilidade  $S$  do sensor:

$$S = \frac{1}{R_{min}} \left( \frac{\Delta R}{\Delta H} \right)_{linear} = \left( \frac{\Delta MR}{\Delta H} \right)_{linear} \quad (4)$$

## 2. Montagem Experimental

Material Utilizado:

- Fonte de Corrente (hp - 6177C DC current source);
- Fonte de Corrente (Kepco - bipolar operational power supply / amplifier);
- 2 multímetros (Agilent - 34401A);
- Bobinas de Helmholtz (Electro-Metrics);
- 2 caixas de acrílico para as amostras: 1 contactos em cruz, 1 contactos paralelos;

- Chave de parafusos e pinça;
- PC com software de aquisição: "Magnetoresistência em filmes-finos" (Labview);

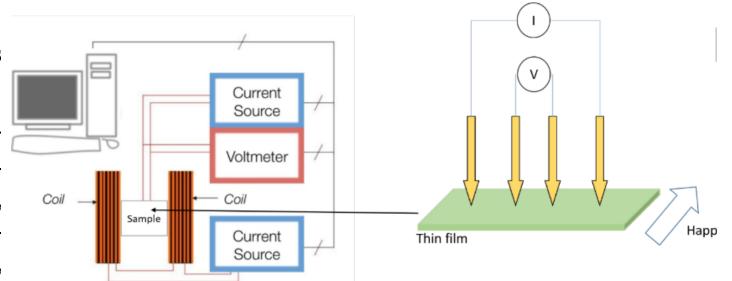


Figura 4: Esquema da Montagem para medições de amostras AMR e GMR.

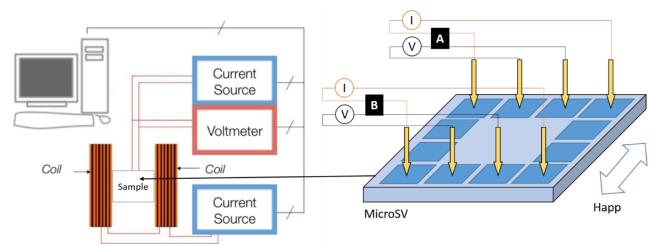


Figura 5: Esquema da Montagem para medições de amostras SMM.

A corrente fornecida pela fonte  $hp$  é medida auxiliarmente, de forma mais precisa, por um dos multímetros em série. Consideraram-se como erros das tensões e correntes os valores da incerteza de leitura (menor valor da escala do aparelho de leitura -  $10^{-4}$ mV e  $2 \times 10^{-4}$ mA, respectivamente). Escolheu-se esse erro, pois no caso de  $V$  não se observaram oscilações que justificassem outra escolha. Para além disso, não se saberia quantificar outros erros sistemáticos que existam, associados a variações das condições de leitura de medição para medição ou erros de instrumentação.

Na utilização do sistema gerador de campo (Software + Fonte de Corrente + Bobinas Helmholtz) considerámos uma incerteza de  $\pm 0.15$  Oe. Este valor provém da calibração feita pelo Grupo 2E que estudou a resolução mínima do sistema - e foi adoptado pelo nosso para o tratamento de dados em vez de considerado inicialmente  $\pm 0.5$ Oe.

Os contactos eléctricos sobre a amostra estão dispostos de forma a que a corrente seja injetada e circule pelos extremos e a tensão seja lida no par interior. Isto garante que o campo magnético criado pela injecção nos contactos de corrente (funcionam como um dipolo eléctrico) não afecte a medida dado que na zona mais interior as linhas de campo são aproximadamente paralelas e por isso a medida da diferença de potencial é mais correcta.

- Amostras utilizadas:

- Filme fino AMR,  $Ni_{80}Fe_{20}$  com 100nm espessura;
- SV1 sem camada de referência fixa (sem PL) composta por vidro /  $Ta(3.5\text{nm})/Ni_{80}Fe_{20}(4\text{nm})/Co_{80}Fe_{20}(2\text{nm})/Cu(2.4\text{nm})/Co_{80}Fe_{20}(2\text{nm})/Ta(2\text{nm})$ ;
- SV2 com camada de referência fixa (PL) por polarização de interface com um antiferromagnético ( $MnIr$ ) composta por vidro /  $Ta(1\text{nm})/Ni_{80}Fe_{20}(4\text{nm})$  /

$Co_{80}Fe_{20}(2\text{nm})/Cu(2.4\text{nm})/Co_{80}Fe_{20}(2\text{nm})/Mn_{70}Ir_{30}(8\text{nm})/Ta(2\text{nm})$ ;

- SV3 e SV4, composição igual a SV2, diferentes espessuras  $h$  (Tabela 1). NOTA: Na sessão 4<sup>a</sup> laboratorial, onde se fez aquisições com SV3, devido ao desgaste, foi necessário substituir a amostra por uma com composição igual excepto no substrato, silício no lugar de vidro.

Amostra	Elemento	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$L$ ( $\mu\text{m}$ )
SV3	1	2	100
	2		
	3	4	
	4		
SV4	A	6.5	
	B		
	C	10	
	D		

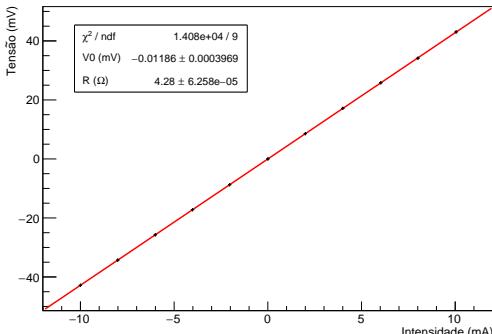
**Tabela 1:** Dimensões em SMM: largura  $h$  e comprimento  $L$  dos elementos nas amostras SV3 e SV4

### 3. Magnetoresistência Anisotrópica (AMR)

#### 3.1. (AMR) Resistência na ausência de campo magnético

Para determinar a resistência do filme na ausência de campo magnético varreu-se o intervalo de correntes de -10 mA a 10 mA, com um passo de 2 A, para fazer um ajuste linear aos dados  $V(I)$ , Figura 6 e Tabela 2.

O valor elevado de  $\chi^2/n_{gl}$ , Tabela 2, deve-se ao erro muito baixo das medidas da intensidade de corrente e da tensão.



**Figura 6:** AMR: Ajuste linear  $V(I)$  para determinação de  $R(0)$

$R$ ( $\Omega$ )	$V_0$ (V)	$\chi^2/n_{gl}$
$4.279930 \pm 0.000063$	$-0.01860 \pm 0.00040$	1564

**Tabela 2:** AMR: Parâmetros de Ajuste Figura 6

Antes de se iniciar o trabalho, estudou-se este efeito de modo a podermos obter previsões que pudessem ser comparadas com a experiência a efectuar. As principais previsões a testar foram as seguintes:

- curva de  $MR(H)$  apresenta saturação, i.e. não altera o seu valor para os dois sentidos do varrimento, a partir de um certo  $|H|$
- valores de  $MR(H)_{max}$  entre 2 a 3 %

- a curva  $MR(H)$  tem um comportamento aproximadamente simétrico, centrada em  $H=0$

Após obter-se a curva  $V(H)$ , cujos pontos são extraídos directamente do software para as duas passagens, obteve-se a curva  $R(H)$  e extraíram-se desta várias quantidades relevantes:  $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $R_{H_{max}}$ ,  $R_{H_{min}}$  e para além disso, fizeram-se ajustes para calcular os outros parâmetros relevantes, refira-se,  $K_u$  e sensibilidade  $S$ . De seguida, obteve-se a curva de  $MR(H)$ .

Para se extrair o valor da sensibilidade  $S$ , fizeram-se ajustes ao troço da curva que se observava linear, à esquerda e à direita de  $R_{max}$ , fazendo a média das sensibilidades para cada uma das passagens e majorando o erro com o maior valor dos desvios individuais à média.

Para o valor de  $K_u$ , fizeram-se ajustes a uma expressão do tipo (5), onde  $M_{sat}$  é fixo com um valor de  $880 \text{ erg cm}^{-3}$  (dados no protocolo) e se espera que  $a = R(0)$  e  $H_{off} = 0$ , além de  $d < 0$ , visto termos uma parábola voltada para baixo. Tem-se assim

$$R(H) = a + d \times \left( \frac{M_{sat}}{2} \right)^2 (H - H_{off})^2 \quad (5)$$

$$-d = \frac{\Delta R}{K_u^2} \Leftrightarrow K_u = \sqrt{\frac{\Delta R}{-d}} \quad (6)$$

Dado que estamos a estudar o comportamento de materiais na aplicação de um campo magnético, observam-se facilmente fenómenos de histerese, em que os domínios magnéticos se comportam de forma diferente quando se faz um varrimento do campo em sentidos diferentes.

O programa de aquisição de dados faz essas duas medições e, de modo a não misturar medidas ou ajustes que seriam feitos em estados diferentes do material, optou-se por apresentar os resultados (e fazer ajustes) para os dois sentidos do varrimento.

De referir que, dado o número muito reduzido de testes feitos para os mesmos valores de corrente no sensor (por volta de 3), não é feita uma análise estatística dos resultados, tendo sido verificada a compatibilidade dos dados e escolhido um teste para análise. Verificou-se apenas que cada um dos pontos se afasta menos de 1% do valor médio (1% escolhido arbitrariamente) escolhendo depois um dos testes para análise mais profunda.

Por fim, estudou-se o comportamento da curva (em termos de valores máximos e  $H(R_{max})$ ) com a colocação de um íman nas suas proximidades. Esta propriedade é de relevo para aplicações, pois muitas vezes poderá ser necessário fazer-se uma manipulação dessa curva para propósitos de calibração do sensor. Para isso, colocou-se um íman a duas distâncias diferentes do sensor e com as duas faces viradas para o mesmo, medindo-se o offset da curva em relação a 0.

#### 3.2. (AMR) Variação da Resistência com a aplicação de Campo Magnético

Antes dos testes feitos, damos uma sugestão para as direções entre os vectores de Magnetização  $\mathbf{M}$ , Magnetização Preferencial  $\mathbf{K}_u$ , Campo aplicado  $\mathbf{H}_{app}$  e Corrente  $\mathbf{J}$ , em relação ao comprimento da amostra, nas posições A e B, Figura 7.

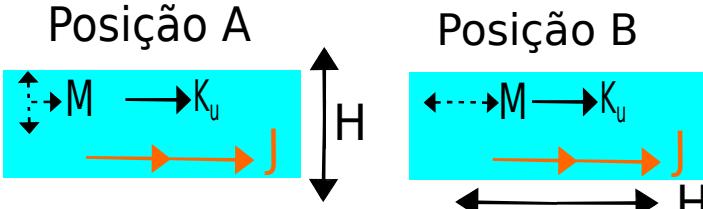


Figura 7: Esquema de Direcções relativas de  $M$ ,  $K_u$ ,  $H_{app}$  e  $J$ , nas posições A e B da amostra AMR

### 3.2.1 (AMR) Posição A

Após recolha dos dados da curva  $V(H)$  do software calculou-se a curva  $R(H)$  para uma corrente na amostra de  $i = 1.0043 \pm 0.0002mA$ , extraíndo da mesma os parâmetros necessários para a análise que se segue, Tabela 3.

Identificaram-se as duas zonas lineares da curva  $R(H)$  e extraíu-se a sensibilidade em cada caso, fazendo uma média, Tabela 4. Omitimos os gráficos de ajuste linear para a sensibilidade.

$R1_{min}(\Omega)$	$R1_{max}(\Omega)$	$\Delta R_1(\Omega)$
$4.1601 \pm 0.0013$	$4.2607 \pm 0.0013$	$0.09957 \pm 0.0019$
$R2_{min}(\Omega)$	$R2_{max}(\Omega)$	$\Delta R_2(\Omega)$
$4.1611 \pm 0.0013$	$4.2647 \pm 0.0013$	$0.1036 \pm 0.0019$

Tabela 3: Parâmetros relevantes extraídos para as duas passagens

Posição (Sentido)	Sensibilidade (% Oe $^{-1}$ )	
	Sentido	Média
Esquerda (1)	$0.4336 \pm 0.0095$	
Esquerda (2)	$0.463 \pm 0.017$	$0.4481 \pm 0.017$
Direita (1)	$-0.392 \pm 0.015$	$-0.3967 \pm 0.015$
Direita (2)	$-0.402 \pm 0.015$	

Tabela 4: Sensibilidades para os dois lados da curva, ambos sentidos, e respectiva média

Para a determinação de  $K_u$ , foram feitos ajustes por (5) para a curva nos dois sentidos, Figura 8 com parâmetros de ajuste na Tabela 5 (onde se observam diferenças por histerese, menores que 1 Oe). Valores finais de  $K_u$ , Tabela 6.

Como os valores  $K_u$  dos dois sentidos são diferentes, calculou-se o valor médio de  $K_u$  apresentando como a incerteza para este valor metade da diferença entre os valores para os dois ajustes, uma janela de erro menor indicaria que os valores dos ajustes estariam mais próximos um do outro.

De referir que o comportamento quadrático explica apenas uma parte da curva ( $\approx [-3,7] \text{ Oe}$ ).

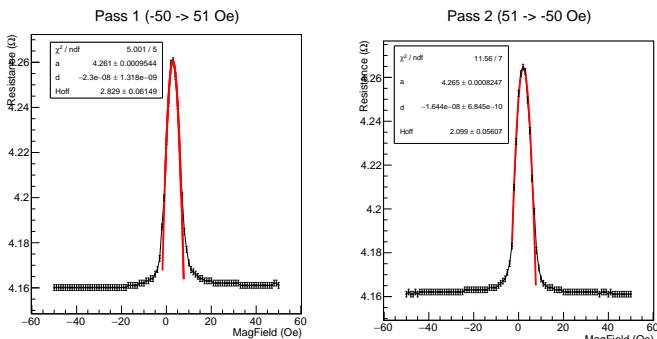


Figura 8: Ajustes para determinação de  $K_u$

	a ( $\Omega$ )	d ( $\Omega \text{ erg}^{-2} \text{cm}^{-6}$ )	$H_{off}(\text{Oe})$	$\chi^2 / \text{ngl}$
Esquerda	$4.261 \pm 0.0010$	$(-2.3 \pm 0.1) \times 10^{-8}$	$2.829 \pm 0.061$	1.0002
Direita	$4.265 \pm 0.0010$	$(-1.644 \pm 0.068) \times 10^{-8}$	$2.099 \pm 0.056$	1.6514

Tabela 5: Valores dos parâmetros obtidos por ajuste para determinação de  $K_u$

$K_{u_1}$	$K_{u_2}$	$K_{u_{med}}$
$2080.68 \pm 56.85$	$2509.77 \pm 62.67$	$2295.2 \pm 214.5$

Tabela 6: Determinação de  $K_u$  médio, unidades  $\text{erg cm}^{-3}$

O  $K_{u_{med}}$  é algo diferente do esperado,  $\sim 1000 \text{ erg cm}^{-3}$ , apesar de compatível em ordem de grandeza.

O modelo (5) não descreve a totalidade da curva pois, para além de não descrever a saturação, não é aplicável na zona onde existe "smearing", achatamento da curva. Este "smearing" é explicado pelo facto de que, ainda que possamos considerar o material em estudo como um único domínio magnético para campos pequenos, este é na verdade composto por nano-domínios, que não têm exactamente o mesmo comportamento na aproximação à saturação, daí haver este comportamento misto. Este efeito está presente em todas as amostras testadas neste trabalho.

Por fim, obtém-se através da expressão (2) os gráficos MR(H), Figura 9, e respectivos parâmetros de interesse Tabela 7.

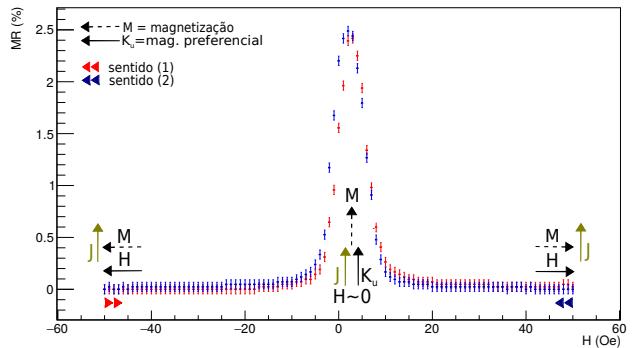


Figura 9: Curvas MR(H) para os dois sentidos do varrimento

$H_{Sat1^-}(\text{Oe})$	$H_{Sat1^+}(\text{Oe})$	$MR1_{Max}(\%)$
$-17 \pm 2$	$21 \pm 2$	$2.417 \pm 0.045$
$H_{Sat2^-}(\text{Oe})$	$H_{Sat2^+}(\text{Oe})$	$MR2_{Max}(\%)$
$-15 \pm 2$	$19 \pm 2$	$2.489 \pm 0.045$

Tabela 7: Parâmetros extraídos da curva MR(H) para o sensor na posição A

São confirmadas algumas das previsões feitas, nomeadamente os valores de MR máximo à volta dos 2.5% e a saturação para campos elevados (a partir dos quais MR não varia significativamente).

Para todos os gráficos de curvas MR feitos, que se previa terem uma simetria em torno de 0 Oe, notou-se um offset constante.

Para campos elevados, que orientam uma esmagadora parte dos domínios na sua direcção, observou-se que a resistência é baixa, com pouca variação, o que nos indica que  $M \perp Jm$ .

Ao aproximarmo-nos de  $H(R_{max})$ , os domínios começam a ter liberdade para se orientar segundo a sua direcção pre-

ferencial, paralela a  $J$  - a resistência aproxima-se de um máximo, Figura 9.

O facto de o sensor não transitar directamente de um estado de saturação para um estado de resistência máxima mostra-nos que os domínios não se alteram simultaneamente e da mesma forma, havendo para além disso, o "smearing" explicado em cima. A transição progressiva é desejada na aplicação a sensores!

Estes resultados mostram que a direcção de magnetização preferencial é a mesma da passagem da corrente, o que pode ser confirmado, por absurdo, testando a amostra na posição B.

### 3.2.2 (AMR) Posição B

A característica  $MR(H)$  da Figura 10 tem duas características que a distinguem:

A diminuição de  $MR(H)$  para campos próximos de 0 deve-se à configuração intermédia em que  $M$  é perpendicular a  $J$ , na transição entre duas configurações paralelas nos extremos, de  $MR(H)$  superior.

Notemos também que os valores  $MR$  são muito menores que anteriormente e  $\max|MR|_B \ll \max|MR|_A$  (talvez devido propriedades intrínsecas).

Desta curva extraíram-se apenas os valores de  $MR_{max}$  para as duas passagens que coincidem em  $MR_{max} = 0.14 \pm 0.04\%$ , tendo-se no centro o valor mínimo de  $MR = 0$ .

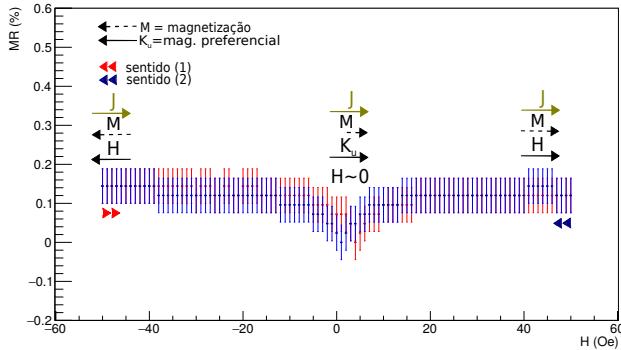


Figura 10: Curvas  $MR(H)$  para os dois sentidos do varrimento

Não se estudou esta configuração em profundidade, já que se observa no gráfico anterior que não existindo um troço linear evidente não tem aliciação (além de variação  $MR$  muito pequena e para campos muito pequenos).

Apesar de difícil determinar a dependência entre  $M$ ,  $B$  e  $J$ , consegue-se perceber que para campos elevados,  $M \parallel J \parallel H$ , e temos  $MR_{max}$ . A diminuição de  $MR$  para  $H \approx 0$  deve-se à transição entre as duas configurações paralelas extremas, que provavelmente passa por uma intermédia em que  $M \perp J$ . Todavia não existe contradição a que a magnetização preferencial seja paralela a  $J$ , como ilustra a Figura 10.

### 3.2.3 (AMR) Magnetorrestência na presença de Íman

Apresentam-se de seguida os resultados dos ajustes para algumas distâncias/face do íman e ainda os resultados para uma amostra de controlo, com o íman a uma distância tal que o seu campo se possa considerar desprezável. De referir que se

fizeram estes ajustes apenas para uma das passagens (passagem 1:  $-50 \rightarrow 50$  Oe) pois isso seria o suficiente para comparar com as curvas obtidas anteriormente. Apenas se tratou parte dos conjuntos extraídos - já que não se pretendia estudar em profundidade a variação com a distância (estima-se que seja  $\Delta H_{off} \propto 1/r^2$ )

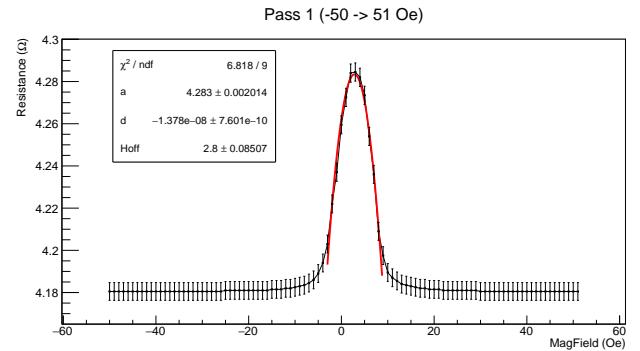


Figura 11: Resultado para  $H_{off}$  para distâncias muito grandes do íman ( $\gg 20$ cm)

Observa-se que o valor de  $H_{off} = 2.80 \pm 0.10$  é semelhante ao valor obtido nas secções anteriores para a passagem 1 (o íman não tem efeito e estamos na mesma situação).

De seguida apresentam-se na Figura 12 as curvas para várias distâncias sobrepostas e os respectivos valores de  $H_{off}$  e  $\chi^2/n_{gl}$  dos respectivos ajustes, Tabela 8.

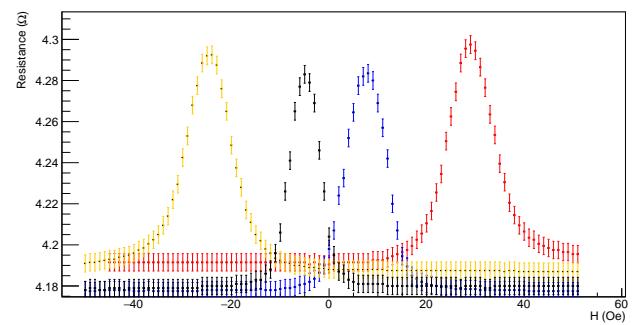


Figura 12: Curvas  $R(H)$  para as várias posições e faces do íman

Face/distância (cm)	Côr	$H_{off}(\text{Oe})$	$\chi^2/\text{n}_{gl}$
A/0	Vermelho	$29.00 \pm 0.11$	0.93
A/3	Azul	$7.67 \pm 0.18$	1.03
B/0	Preto	$-24.61 \pm 0.10$	0.98
B/3	Amarelo	$-5.003 \pm 0.094$	1.01

Tabela 8: Valores do  $H_{off}$  e  $\chi^2/\text{n}_{gl}$  do ajuste para várias distâncias do íman (Figura ??)

### 3.2.4 (AMR) Quantificação e justificação do offset

O grupo pensou em várias ideias que permitissem justificar este offset:

1. efeitos de histerese e magnetização residuais muito superiores ao esperado (esperava-se que fossem desprezáveis, estando a curva centrada no 0);
2. magnetização preferencial  $K_u$  desalinhada com a direção de  $J$  ( $R$  é máxima para  $H \neq 0$ );

3. erro na calibração do software de aquisição de dados ( $I = 0$  na apresentada fonte de corrente não corresponde a  $H = 0$ );
4. presença de campos magnéticos desconhecidos/não contabilizados;

Para se verificar 1., o material teria que ter um tempo de relaxação magnético superior a 24 horas, o que é improvável. Não poderá haver magnetização acumulada por medidas feitas na mesma sessão, pois observa-se este *offset* para o primeiro conjunto de medidas tiradas. Para este sensor ter qualquer aplicação possível, o tempo de relaxação teria de ser desprezável, de modo a reduzir o efeito de "memória", que para um sensor ligado a um sistema de controlo, é algo muito indesejável.

O fenómeno causado por 2. obriga à aplicação de um campo adicional ( $H_{off}$ ) para deslocar a magnetização para a direcção de  $J$ . Este deslocamento deveria ser alterado ao movermos a amostra dentro da caixa, devido às folgas do encaixe, alterando minimamente o ângulo em causa. Tal não se verificou.

Para 3. é necessário saber como foi montada a experiência e criado o software de aquisição: para obter a correspondência entre corrente  $I$  nas bobinas de Helmholtz e campo magnético  $B$  criado entre elas, foram medidos manualmente com uma sonda de Hall, tendo sido feita uma regressão linear ( $B = aI + b$ ) para obter todos os outros valores, que foram inseridos no programa de dados.

Um erro desta calibração teria de ser mostrado através de mais pontos para o ajuste ou medir externamente o campo magnético para os vários valores do varrimento.

Porém, se acontecesse, o valor da resistência seria diferente para corrente  $I = 0$  apresentada na fonte (valor dado pelo programa) e para as bobinas realmente desligadas. Isto não se verifica, obrigando a desprezar toda esta hipótese.

Por fim, 4. não é esmiuçável directamente, já que além de medições rudimentares não temos disponível equipamento para detecção precisa de campo magnético na sala. O íman utilizado foi afastado suficientemente para não interferir. Um grupo com o mesmo problema, descobriu por intuição que colocando o íman perto da lateral do computador este se orientava segundo linhas de campo magnéticas com origem na fonte de alimentação, cujo bloco principal é um transformador.

Dado a variação do *offset* com a posição do computador era semelhante ao efeito do íman. Podemos assumir que até campos pequenos alteram as condições, sendo essa a causa do *offset*! Isto revela a sensibilidade do aparato e do fenómeno em si.

### 3.2.5 (AMR) Configuração Alternativa

A qualidade do sensor dependerá da orientação relativa entre a magnetização preferencial e o campo magnético tendo o seu melhor uso quando os colocamos perpendiculares. Não é possível distinguir o sinal do campo, pela simetria de MR em torno de zero - a não ser que o sensor seja projectado com memória e possa discriminar as variações em  $H < 0$  e  $H > 0$ , em que o declive,  $R_{min}$  e  $R_{max}$  são trocados

Estas considerações são para a situação em que a magnetização preferencial é paralela à corrente mas, ainda assim, a compreensão adquirida deixa prever uma situação semelhante

quando se configura a magnetização perpendicular preferencial à corrente - mantendo a perpendicularidade entre  $K_u$  e o campo (Figura 13 - porém a resistência mínima para  $H = 0$  e resistência máxima nos extremos. Figura 14).

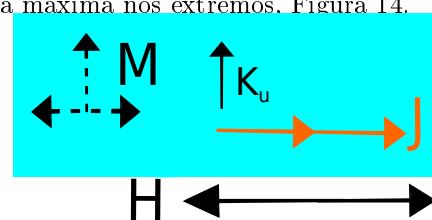


Figura 13: Orientações relativas de  $J$ ,  $H$  e  $K_u$  para a configuração alternativa

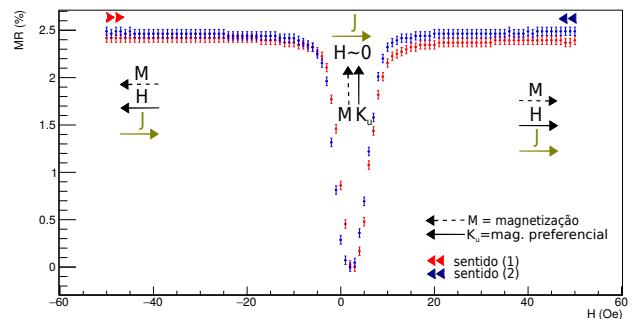


Figura 14: Curva  $MR(H)$  simulada para a configuração alternativa

## 4. Magnetoresistência Gigante (GMR)

### 4.1. (GMR) Resistência na ausência de campo magnético

Nesta secção analisam-se duas válvulas de spin, SV1 (sem PL) e SV2 (com PL) e procede-se como na secção anterior, para obter  $R(0)$ , com ajustes na Figura 15 e 16.

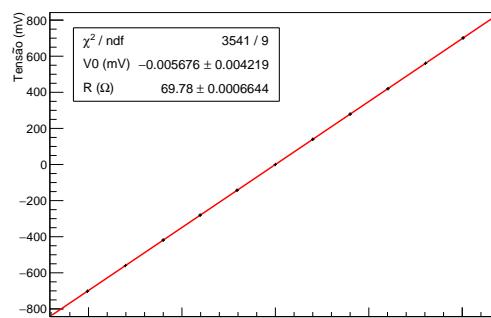


Figura 15: SV1: Ajuste linear  $V(I)$  para determinação de  $R(0)$

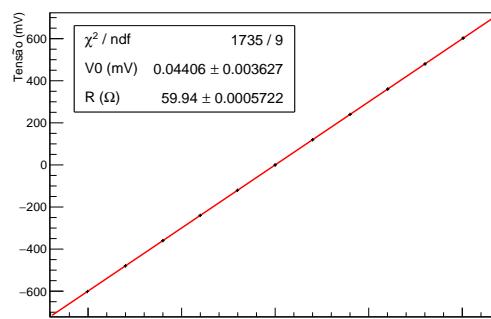


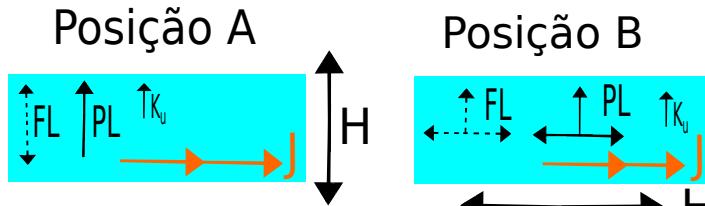
Figura 16: SV2: Ajuste linear  $V(I)$  para determinação de  $R(0)$

Válvula	R ( $\Omega$ )	V0 (V)	$\chi^2/n_{gl}$
SV1	$69.78060 \pm 0.00066$	$-0.0057 \pm 0.0042$	393
SV2	$59.94480 \pm 0.00057$	$0.0441 \pm 0.0036$	193

**Tabela 9:** Parâmetros de Ajuste relativos às Figuras 15 e 16

#### 4.2. (GMR) Variação da Resistência com campo magnético

Apresentam-se de seguida as configurações a estudar com sugestões das direcções relativas, Figura 17 (a direcção de  $K_u$  é relativa à magnetização predefinida para PL).



**Figura 17:** Esquema de Direcções relativas de  $M$ ,  $K_u$ ,  $H_{app}$  e  $J$ , nas posições A e B das amostras GMR

Extraiu-se a característica  $V(H)$  em ambas as amostras, numa gama de  $[-40; 40]$  Oe, extraíndo os parâmetros desejados, e numa gama de  $[-400; 400]$  Oe para comparação aprofundada. No caso da SV2,  $R_{AP}$  era atingida acima de 40 Oe pelo que se repetiu a aquisição mas para uma gama de  $[-80; 80]$  Oe.

Pela metodologia anterior ( $V(H) \leftrightarrow R(H)$ ) determina-se  $MR(H)$  e  $MR_{max}$  por 3.

O campo coercivo  $H_c$  é determinado a partir da largura da curva de histerese a meia altura - usando os dados  $V(H)$  e não os  $MR(H)$  para contornar a propagação de erro.

Considerou-se o ponto médio da curva de histerese  $V_M = (V_{max} - V_{min})/2$ . No entanto, as curvas no sentido (1) e (2) apresentam valores ligeiramente diferentes logo definiu-se  $\bar{V}_M = (V_{M1} + V_{M2})/2$ . Interpolando por um spline cúbico os pontos da curva  $H(V)$  obteve-se  $H(\bar{V}_M)$  para os dois sentidos, bem como  $H(V_{M1})$  e  $H(V_{M2})$ . Calculado  $H_c$ , calcula-se o campo de offset,  $H_{off}$ :

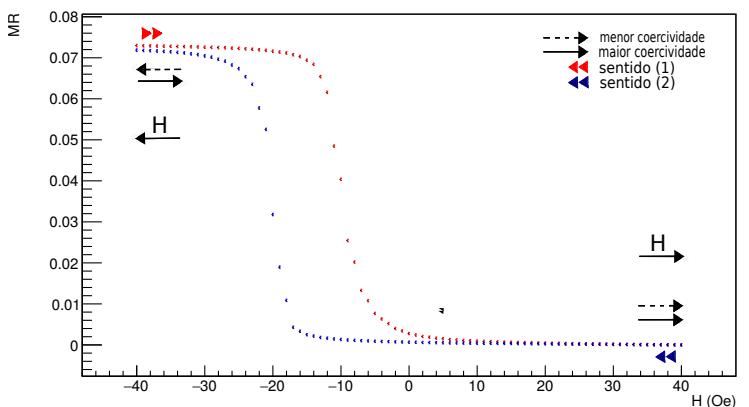
$$H_c = \frac{|H_1(\bar{V}_M) - H_2(\bar{V}_M)|}{2} \quad (7)$$

$$H_{off} = H_1(\bar{V}_M) + H_c \quad (8)$$

Os gráficos  $MR(H)$  estão nas Figuras 18 e 19 (para SV1), 20 e 21 (para SV2). Os parâmetros desejados na Tabela 10.

#### 4.2.1 Resultados e Análise

Curva  $MR(H)$  de SV1



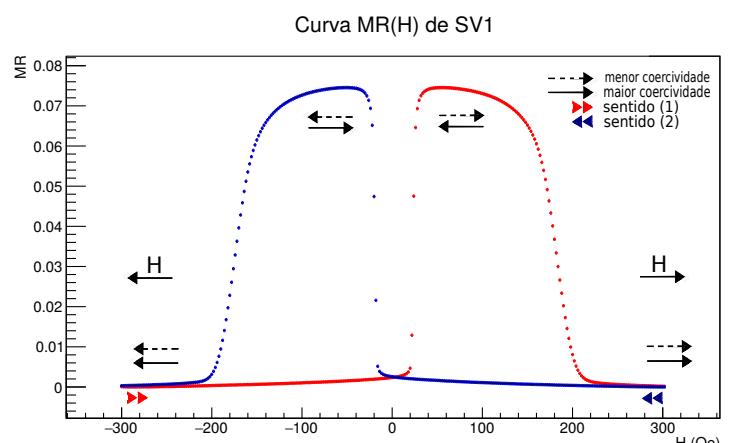
**Figura 18:** Curva  $MR(H)$  da amostra SV1,  $[-40; 40]$  Oe, passo de 1 Oe

Numa análise grosseira da Figura 18, para o sentido 2, ao começar a diminuir  $H$  (a partir de 16 Oe) até que a magnetização de FM1 (menos coerciva) esteja completamente reorientada, observa-se um comportamento linear da curva ( $-18$  e  $-24$  Oe).

Tendo a magnetização de FM1 completamente reorientada, a configuração é antiparalela e atinge-se  $MR_{max}$ .

No sentido oposto tem-se o comportamento inverso, a única diferença revelada no aspecto de histerese, que se deve à inércia de rotação de FM1 perante a variação em sentido oposto.

O offset em relação a  $H = 0$  deve-se ao acoplamento magnetoestático entre FM1 e FM2 - a magnetização desta última "segura" a da primeira e é necessário um campo de módulo superior, para iniciar a reorientação da magnetização de FM2.



**Figura 19:** Curva  $MR(H)$  da amostra SV1,  $[-300; 300]$  Oe, passo de 2 Oe

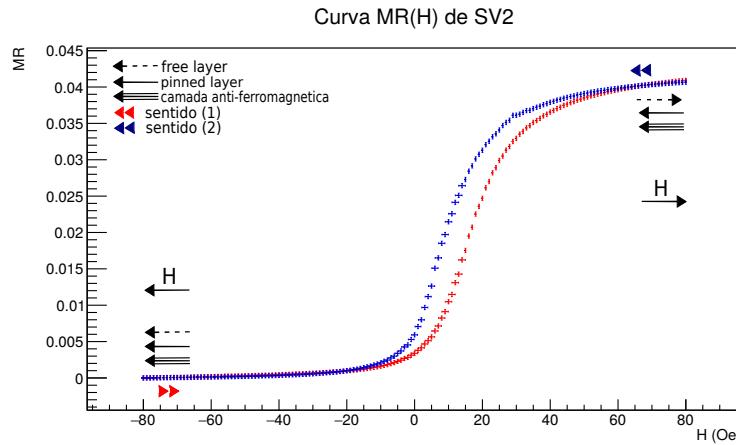
Na análise da Figura 19 para o sentido (1), tem-se inicialmente uma configuração paralela das magnetizações de FM1 e de FM2, ambas no sentido de  $H$ , e observa-se um patamar de  $MR$  aproximadamente constante.

Quando a magnetização de FM1 começa a ser reorientada segundo  $H$ , agora de sentido contrário, por ser menos coerciva que FM2, tem-se um troço linear de  $MR(H)$  (20 - 30 Oe) e com a reorientação completa, atinge-se o patamar de  $MR_{max}$  visto anteriormente.

Porém, a partir de um certo ponto,  $H$  começa a afectar também a magnetização de FM2 (o que não se verificava na Figura 18) e tem-se um troço linear semelhante ao anterior (160 - 200 Oe). No fim, a magnetização de FM2 está completamente reorientada com  $H$ , tal como a de FM1, e a configuração é de novo paralela e  $MR$  é mínima.

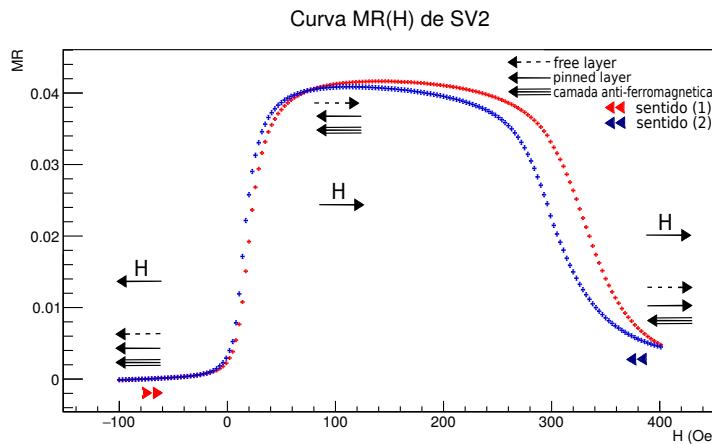
No sentido inverso, acontece exactamente o mesmo mas com valores de  $H$  simétricos.

Observa-se simetria em torno de 0 pois, ao afectar a magnetização de FM2 nos extremos, espelhámos a configuração da amostra. O troço linear primário pode ser usado para pequenos valores  $H$ , positivos e negativos, conforme a orientação da magnetização de FM2! Esta apenas pode ser modificada por campos fortes (acima de  $\approx 100$  Oe). Se não se verificar a histerese, este troço primário só pode ser utilizado para sensorização com a garantia de que o campo a medir nunca afecte a magnetização de FM2.



**Figura 20:** Curva  $MR(H)$  da amostra SV2,  $[-80; 80]$  Oe, passo de 3 Oe

Apesar da introdução de uma camada anti-ferromagnética (SV2), temos na Figura 20 um aspecto semelhante a (SV1) na Figura 18 e apenas algumas diferenças no que toca à largura do troço linear, campo coercivo e offset.



**Figura 21:** Curva  $MR(H)$  da amostra SV2,  $[-100; 400]$  Oe, passo de 3 Oe

Na Figura 21 já não se verifica o "espelhamento" que se verificou em SV1, Figura 19, pois a camada mais coerciva (agora PL) é fixada pela antiferromagnética (AF).

Seguindo o sentido (1), começa-se numa configuração paralela de FL e PL no sentido de  $H$ . Ao atingir  $H = 0$ , dá-se a

reorientação da FL e tem-se o troço linear primário; seguido do patamar de  $MR_{max}$  de configuração antiparalela entre as magnetizações de FL e PL.

Porém este patamar estende-se bastante além do anterior (para SV1), antes da magnetização PL se reorientar, pois é preciso um  $H_{app}$  superior para vencer a "fixação" da AF sobre a magnetização de PL.

Entre certos valores de  $H$  pode-se considerar um troço linear secundário (a partir de  $\approx 300$  Oe). Não foi possível continuar além de 400 Oe, porém prevê-se que  $MR(H)$  estabilizaria num patamar de configuração paralela entre as magnetizações de FL e PL, contrárias à de AF.

A diferença importante dá-se no facto de, no sentido oposto se ter um comportamento aproximadamente igual, com histerese: ao voltar a diminuir  $H$ , a magnetização de PL volta a orientar-se segundo a imposta por AF, e regressa à configuração antiparalela.

Concluímos que a presença de AF fixa realmente a magnetização da PL para  $H < 250$  Oe, impedindo-a de se orientar em dois sentidos e limitando o troço linear primário a apenas um sinal de  $H$ .

Desprezando a histerese, um sensor construído com SV2 seria resistente a campos que afectem a magnetização de PL já que esta regressa à original por imposição de AF.

Em SV2, tem-se menor coercividade da histerese no troço linear primário, apesar da introdução da camada AF não o justificar directamente. O troço linear secundário só pode ser considerado para essa utilização em SV2, já que em SV1 só existe num sentido.

Grandeza	SV1	SV2
$R1_P$ ( $\Omega$ )	$69.601 \pm 0.014$	$59.639 \pm 0.012$
$R1_{AP}$ ( $\Omega$ )	$74.680 \pm 0.015$	$62.042 \pm 0.012$
$MR1_{max}$ (%)	$7.298 \pm 0.030$	$4.029 \pm 0.029$
$R2_P$ ( $\Omega$ )	$69.600 \pm 0.014$	$59.653 \pm 0.012$
$R2_{AP}$ ( $\Omega$ )	$74.601 \pm 0.015$	$62.058 \pm 0.012$
$MR2_{max}$ (%)	$7.186 \pm 0.030$	$4.032 \pm 0.029$
$H_c$ (Oe)	$5.2459 \pm 0.0067$	$2.5582 \pm 0.0029$
$H_{off}$ (Oe)	$(-14.971 \pm 0.014)$	$18.2212 \pm 0.0057$

**Tabela 10:** Parâmetros  $R_P$ ,  $R_{AP}$  e  $MR_{max}$  (sentidos (1) e (2) do varrimento),  $H_c$  e  $H_{off}$ , obtidos para as amostras SV1 e SV2 através da análise das Figuras 18 e 20.

Notar que tanto  $R1_P$  e  $R2_P$  estão concordantes a menos de 0.5% com os valores retirados para  $R(0)$ .

O valor negativo de  $H_{off}$  para SV1 é determinado pela magnetização inicial de FM2 no teste da Figura 18, esse sinal não é fixo.

Por fim, calculamos a sensibilidade  $S$  por (4) das amostras no seu troço linear primário ajustando uma reta, tomando dados do sentido (1) e (2) nas aquisições das Figuras 18 e 20.

Amostra	Sentido	$\Delta H$ (Oe)	Sensibilidade ( $\% Oe^{-1}$ )
SV1	1	$[-13; -7]$	$-0.9948 \pm 0.0037$
	2	$[-22; -16]$	$-1.3129 \pm 0.0061$
SV2	1	$[5; 23]$	$1.36646 \pm 0.00016$
	2	$[-1; 13]$	$1.56898 \pm 0.00025$

**Tabela 11:** Sensibilidades obtidas para as amostras SV1 e SV2 com os dados do sentido (1) nas Figuras 18 e 20.

Para a observação do troço linear das curvas  $MR(H)$  foi importante manter o passo dos varrimentos em  $H$  pequenos,

caso contrário a zona de transição fica não-resolvida e não é possível discernir essa linearidade.

Relativamente à amostra AMR, obteve-se melhores resultados, visto termos valores de  $MR$  na ordem de 7% (SV1) e 4% (SV2) quando em AMR se tinha  $\approx 2.5\%$ . Além disso, a sensibilidade ( $\sim 1.3\% Oe^{-1}$ ) nos troços lineares é maior que para sensores AMR.

## 5. Sensores Magnetoresistivos Micrométricos

Temos uma estrutura de multicamadas padronizada (igual a SV2) em ambas amostras (SV3 e SV4) a utilizar, porém temos diferentes padronizações, em termos de dimensões  $L$  (comprimento) e  $h$  (espessura) dos filmes, Tabela 1.

O esquema da Figura 22 explícita como as posições testadas na caixa de acrílico aplicam campo  $H$  e corrente  $J$  sobre as amostras. Ter em conta que a direcção de magnetização preferencial apontada por  $K_u$  é a da magnetização da camada antiferromagnética AF.

Nas amostras em que  $H$  e  $J$  são paralelos e perpendiculares a  $K_u$  (SV3-3, SV3-1, SV4-A, SV4-C), o efeito de  $H$  sobre as magnetizações da camada FL e PL do filme é imprevisível.

O funcionamento coerente das válvulas de spin existirá nas posições em que temos  $J$  e  $H$  perpendiculares e este paralelo a  $K_u$  (SV3-2, SV3-4, SV3-B, SV3-D), de forma a influenciar articuladamente a magnetização da FL. Em particular, a padronização feita ( $L \gg h$ ) aumenta a linearização dos gráficos  $MR(H)$  - explicado na secção "Introdução".

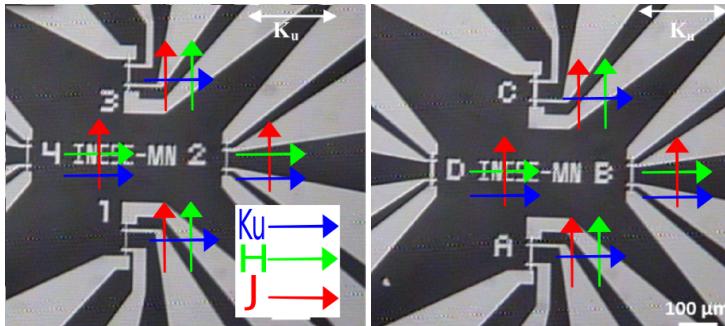


Figura 22: Ampliação das amostras SV3 (esq.) e SV4 (dir.): posições elementos relativas às direcções de  $J$ ,  $H_{app}$  e  $K_u$  (sentidos arbitrários)

A todas as amostras são feitos os testes habituais de varimento de  $H_{app}$  em  $[-50, 50] Oe$  e em  $[-400, 400] Oe$ , produzindo as respectivas curvas  $MR(H)$ , além dos parâmetros habituais ( $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $MR_{max}$ ,  $H_c$ ,  $H_{off}$ ). Nos casos adequados são extraídos igualmente  $S$ ,  $H_c$  e  $H_{off}$ .

### 5.1. Resultados e Análise

Apesar de na Figura 31 a SV4-A mostrar um troço minimamente linear num sentido, o sentido oposto é diferente e com alguma histerese. Na Figura 32 vê-se como os patamares de  $MR_{max}$  e  $MR_{min}$  são instáveis. Não é equacionável a construção de um sensor com base nesta configuração. As Figuras 33 e 34 são semelhantes, logo também descartamos SV4-C.

Por sua vez, as Figuras 23 e 24 têm o mesmo tipo de curva que as obtidas na secção "2. GMR"(comportamento coerente) - existe agora um troço linear de qualidade superior, causado pela transição gradual entre configuração para-

lela e antiparalela passando pela configuração intermédia de perpendicularidade entre as magnetizações de FL e PL.

Podemos, por isso, considerar a configuração de SV4-B para a construção de um sensor. Por semelhança de argumentos, nas Figuras 25 e 26, SV4-D também é considerado. O comportamento é semelhante para ambas amostras, diferindo apenas na histerese, ligeiramente menor para SV4-D, que tem uma espessura  $h$  do filme superior.

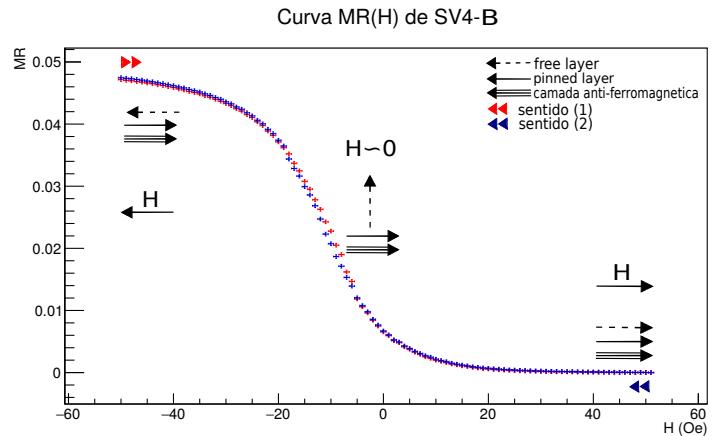


Figura 23:  $MR(H)$  de SV4-B,  $[-50; 50] Oe$  passo 1 Oe

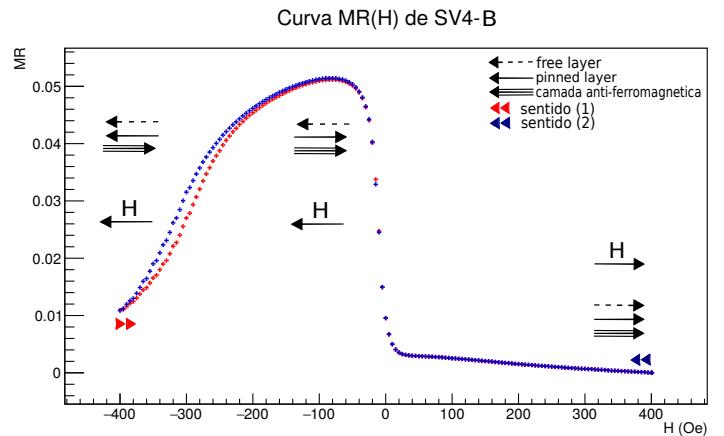


Figura 24:  $MR(H)$  de SV4-B,  $[-400; 400] Oe$  passo 5 Oe

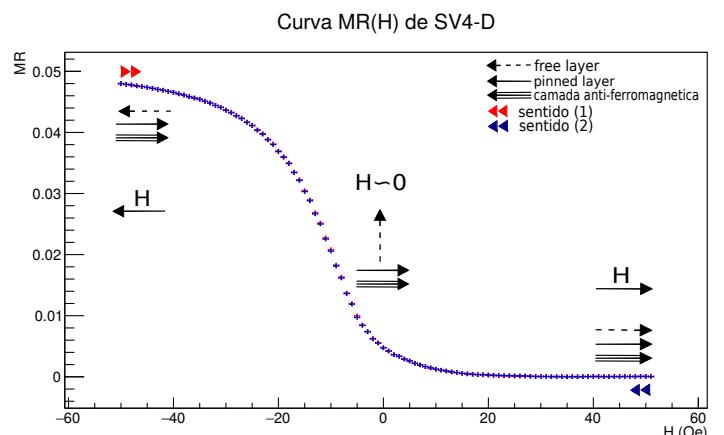


Figura 25:  $MR(H)$  de SV4-D,  $[-50; 50] Oe$  passo 1 Oe

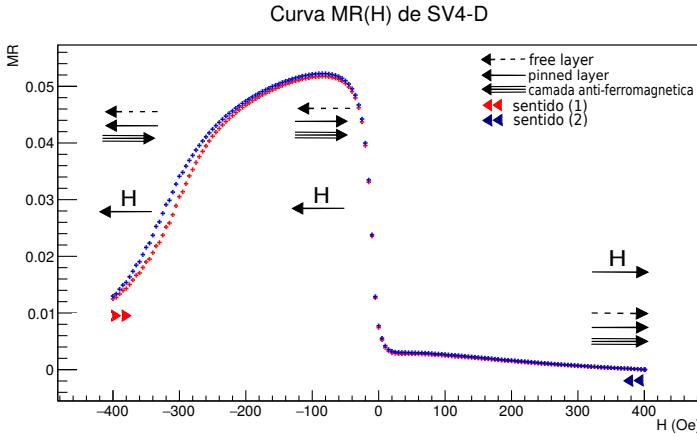


Figura 26:  $MR(H)$  de SV4-D,  $[-400; 400]$  Oe passo 5 Oe

As Figuras (35, 36, 37 e 38 no final da secção) relativas a SV3-1 e SV3-3 mostram um comportamento de  $MR(H)$  que não se enquadra no padrão necessário para a construção de um sensor - um pico em  $H \sim 0$  com decaimento não-linear para ambos os lados. Além disso os sentidos (1) e (2) têm elevada histerese entre si e não se comportam de igual forma.

Relativamente às amostras SV3-2 e SV3-4 obtiveram-se as Figuras 27, 28, 29 e 30. O comportamento é coerente e similar a SV4-B e SV4-D, pelo que devemos também considerar estas configurações para construção de um sensor.

Em comparação entre as Figuras 27 e 29 surge a observação de que SV3-2 tem uma gama  $\Delta H$  de linearidade (entre -20 Oe e +40 Oe) superior à de SV3-4 (entre -25 e +20 Oe valores aproximados) - devido à espessura  $h$ , menor para SV3-2.

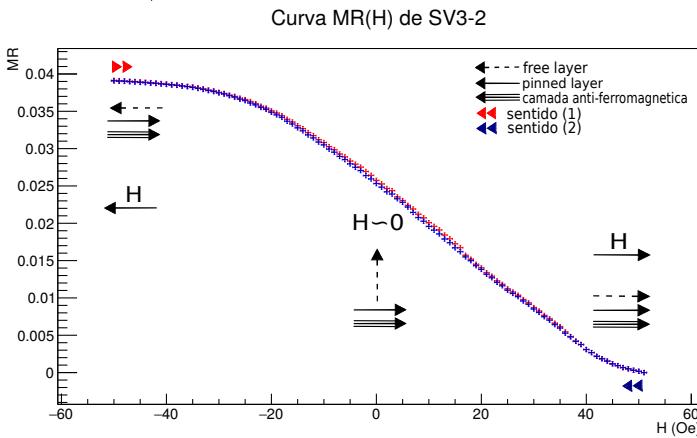


Figura 27:  $MR(H)$  de SV3-2,  $[-50; 50]$  Oe passo 1Oe

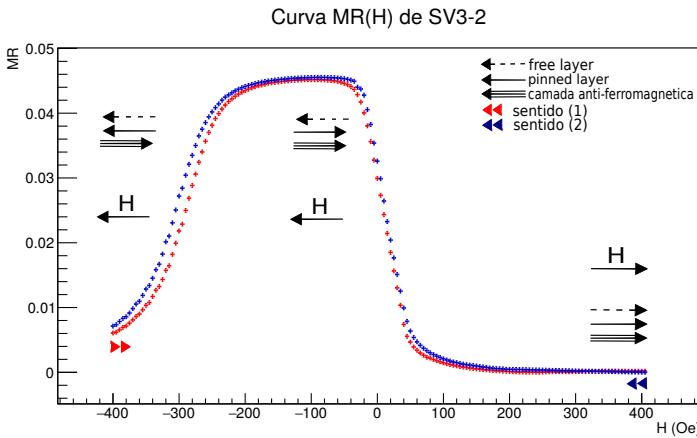


Figura 28:  $MR(H)$  de SV3-2,  $[-400; 400]$  Oe passo 5Oe

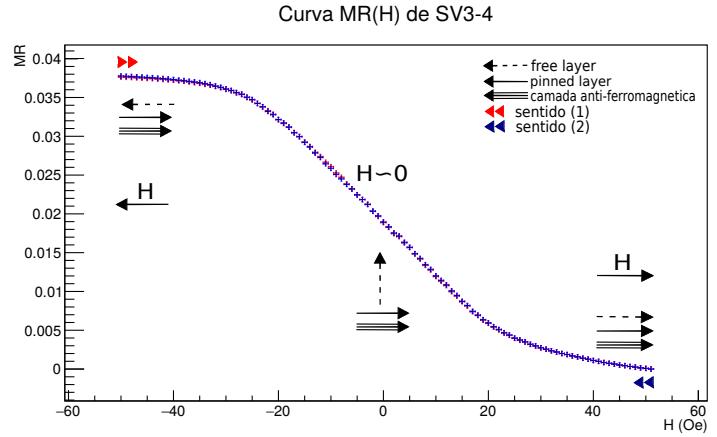


Figura 29:  $MR(H)$  de SV3-4,  $[-50; 50]$  Oe passo 1Oe

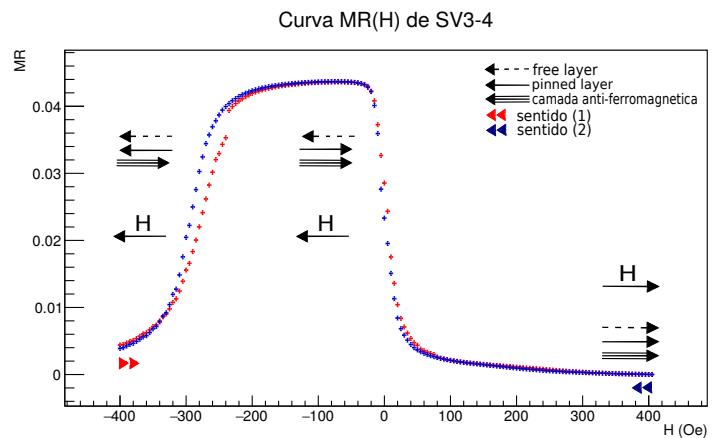
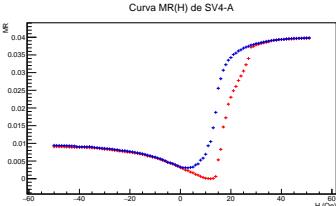


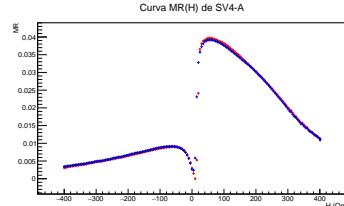
Figura 30:  $MR(H)$  de SV3-4,  $[-400; 400]$  Oe passo 5 Oe

Amostra	SV3-2	SV3-4
$R1_{AP}$ ( $\Omega$ )	$316.415 \pm 0.065$	$187.955 \pm 0.039$
$R1_{AP}$ ( $\Omega$ )	$328.799 \pm 0.063$	$195.029 \pm 0.037$
$MR1_{max}$ (%)	$3.914 \pm 0.029$	$3.764 \pm 0.029$
$R2_P$ ( $\Omega$ )	$316.415 \pm 0.065$	$187.96 \pm 0.039$
$R2_{AP}$ ( $\Omega$ )	$328.778 \pm 0.063$	$195.055 \pm 0.037$
$MR2_{max}$ (%)	$3.907 \pm 0.029$	$3.777 \pm 0.029$
$H_c$ (Oe)	$0 \pm 0.51$	$0 \pm 0.034$
$H_{off}$ (Oe)	$11.08 \pm 0.55$	$0.034 \pm 0.233$
Amostra	SV4-B	SV4-D
$R1_{AP}$ ( $\Omega$ )	$135.176 \pm 0.027$	$91.688 \pm 0.018$
$R1_{AP}$ ( $\Omega$ )	$141.550 \pm 0.028$	$96.085 \pm 0.019$
$MR1_{max}$ (%)	$4.716 \pm 0.030$	$4.796 \pm 0.030$
$R2_P$ ( $\Omega$ )	$135.175 \pm 0.027$	$91.684 \pm 0.018$
$R2_{AP}$ ( $\Omega$ )	$141.591 \pm 0.028$	$96.086 \pm 0.019$
$MR2_{max}$ (%)	$4.747 \pm 0.030$	$4.801 \pm 0.030$
$H_c$ (Oe)	$0 \pm 0.53$	$0 \pm 0.036$
$H_{off}$ (Oe)	$-8.37 \pm 0.54$	$-11.517 \pm 0.081$

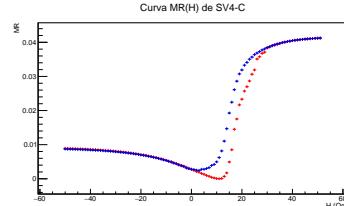
Tabela 12: Parâmetros  $R_P$ ,  $R_{AP}$  e  $MR_{max}$  (nos sentidos (1) e (2) do varrimento),  $H_c$  e  $H_{off}$ , relativos às amostras validadas de SV3 e SV4



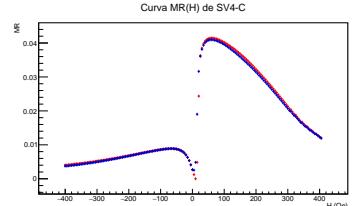
**Figura 31:**  $MR(H)$  de SV4-A,  $[-50; 50]$  Oe passo 1



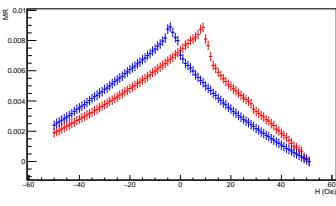
**Figura 32:**  $MR(H)$  de SV4-A,  $[-400; 400]$  Oe passo 1



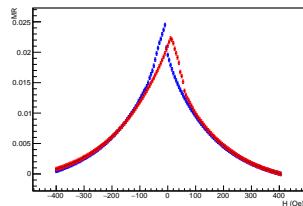
**Figura 33:**  $MR(H)$  de SV4-C,  $[-50; 50]$  Oe passo 1



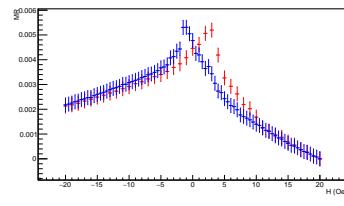
**Figura 34:**  $MR(H)$  de SV4-C,  $[-400; 400]$  Oe passo 1



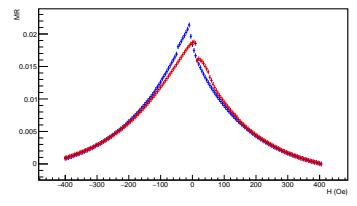
**Figura 35:**  $MR(H)$  de SV3-1,  $[-50; 50]$  Oe passo 1



**Figura 36:**  $MR(H)$  de SV3-1,  $[-400; 400]$  Oe passo 5



**Figura 37:**  $MR(H)$  de SV3-3,  $[-50; 50]$  Oe passo 1



**Figura 38:**  $MR(H)$  de SV3-3,  $[-400; 400]$  Oe passo 5

Amostra	$h$ ( $\mu\text{m}$ )	Sentido	$H_{min}$ (Oe)	$H_{max}$ (Oe)	$\Delta H_{med}$	$S$ ( $\% \text{ Oe}^{-1}$ )	$S_{med}$ ( $\% \text{ Oe}^{-1}$ )
SV3 - 2	2	1	-21	43	64	-0.054380 $\pm$ 0.000205	-0.054940 $\pm$ 0.000396
		2	-16	48		-0.055499 $\pm$ 0.000232	
SV3 - 4	4	1	-25	23	48	-0.066189 $\pm$ 0.000321	-0.066478 $\pm$ 0.000310
		2	-26	22		-0.066766 $\pm$ 0.000332	
SV4 - B	6.5	1	-18	-4	14	-0.17771 $\pm$ 0.00260	-0.18799 $\pm$ 0.00781
		2	-16	-3		-0.19828 $\pm$ 0.00535	
SV4 - D	10	1	-18	-4	14	-0.20238 $\pm$ 0.00277	-0.20236 $\pm$ 0.00140
		2	-17	-3		-0.20234 $\pm$ 0.00277	

**Tabela 13:** Parâmetros de Sensibilidade relativos às amostras validadas de SV3 e SV4

### 5.1.1 (SMM) Discussão

Veja-se na Tabela 12 que existe um campo coercivo para todas as amostras padronizadas SMM de  $H_c = 0$ ! (apenas precisões superiores permitiriam distinguir diferença entre os dois sentidos no troço linear). Isto prova que estamos de facto no regime  $H_k < N_d M_{sat}$  (energia interna anisotrópica menor que a energia anisotrópica magnética de forma) considerado na "Introdução".

O desvio  $H_{off}$  é de  $-8.36$  Oe e  $-11.52$  Oe para SV4-B e SV4-D,  $11.08$  Oe e  $0.034$  Oe, respectivamente.

Observando a Tabela 13 constatamos uma diminuição de  $\Delta H$  com o aumento de  $h$ . Este  $\Delta H$  corresponde à quantidade  $2|H_{sat}|$  referida na "Introdução Teórica" (largura do troço linear) e confirma-se a correlação prevista com  $h$ . Não se verifica uma proporcionalidade inversa perfeita, apenas um maior conjunto de dados ( $\Delta H, h$ ) permitiria avaliá-lo.

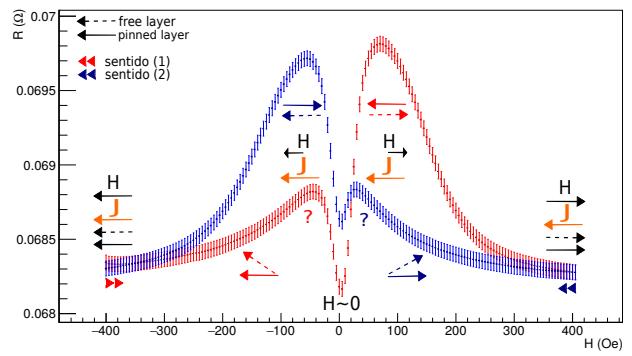
Por sua vez, a Sensibilidade aumenta com  $h$ .

A gama  $\Delta H$  de campo magnético detectável pelo sensor é um parâmetro relevante e deve ser articulado com a sensibilidade do mesmo, dependendo dos objectivos do sensor.

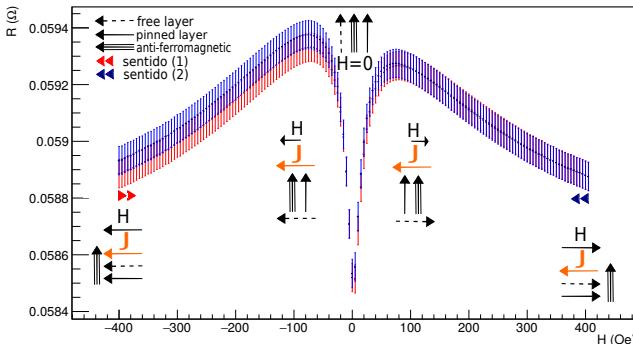
## 6. Extra: GMR Posições Excluídas

Na secção "Magnetoresistência Gigante (GMR)" fizemos testes com as amostras SV1 e SV2 para a posição A. Por curiosidade, também foram feitos testes para a posição B - direcções relativas na Figura 17. As figuras resultantes dos gráficos  $R(H) \neq MR(H)$  sem tratamento como as restan-

tes), são apresentados nas Figuras 39 (SV1) e 40 (SV2), com respectivas sugestões de comportamento de magnetizações. No caso próximo de  $H = 0$  para SV1 mostra picos menores e um mínimo para o qual não encontrámos uma explicação natural, assemelhando-se contudo aos picos observados em SV2. Todavia, ainda para SV1, julgamos ser a configuração antiparalela entre FL e PL que gerem a resistividade máxima.



**Figura 39:** Gráfico  $V(H)$  da amostra SV1 na posição B,  $[-400, 400]$  Oe, passo 1 Oe



**Figura 40:** Gráfico  $V(H)$  da amostra SV2 na posição  $B$ ,  $[-400, 400]$  Oe, passo 1 Oe

## 7. Conclusões

Após alguma pesquisa sem sucesso, abandonou-se a tentativa de comparar os valores obtidos com esperados ou obtidos noutras experiências.

No estudo de AMR concluiu-se que a constante de anisotropia é  $K_u = 2295.2 \pm 214.5 \text{ ergcm}^{-3}$  e a magnetização preferencial é ao longo do comprimento da amostra. O AMR fenómeno permite sensores de alta sensibilidade a uma gama de campos reduzida - sendo limitados pela curta amplitude de  $MR(H)$ . Acresce a desvantagem da histerese não ser desprezável, induzindo erro. A gama de resposta linear pode ser deslocada em torno de valores fixos por imposição de um campo exterior (Íman), o que também a torna sensível a cam-

pos indesejados.

A forma de pico da curva  $MR(H)$ , ao não ter patamar estável para  $MR_{max}$  é desvantajosa face a uma curva de GMR.

Além disso, em GMR existem amplitudes de MR superiores,  $\sim 7\%$  (SV1) e  $\sim 4\%$  (SV2), enquanto temos  $\sim 2.5\%$  em AMR. Naturalmente também se tem maiores sensibilidades ( $\sim 1.3\% \text{ Oe}^{-1}$  comparado com  $\sim 0.4\% \text{ Oe}^{-1}$  de AMR), enquanto a largura da gama de linearidade se mantém semelhante.

A amostra AMR apenas são funcionais para  $K_u$  paralelo a  $J$  e normal a  $H$  e, estima-se, também para  $K_u$  normal a  $J$  e a  $H$ . As amostras SV1 e SV2 apenas funcionam para  $K_u$  paralelo a  $H$  e normal a  $J$ .

Por fim, encontramos a optimização dos sensores através da padronização. A relação  $L \gg h$  da amostra elimina a histerese e aumenta a linearidade da transição entre patamares de MR. Verificou-se que a largura da banda de linearidade,  $2|H_{sat}|$ , aumenta efectivamente com a diminuição de  $h$ , enquanto, dado manter-se a amplitude entre patamares, diminui a sensibilidade  $S$ . Como a Figura 27 mostra, a amostra SV3-2 com  $h = 2\mu\text{m}$  tem a maior gama de linearidade  $\Delta H$ . Por contrário, a Figura 25 mostra como a amostra SV4-D com  $h = 10\mu\text{m}$  tem a maior sensibilidade  $|S| = 0.20234 \pm 0.00277 (\% \text{ Oe}^{-1})$ .

Importante notar que a  $S$  é um parâmetro relevante para a descrição da qualidade do sensor, porém a informação ainda mais determinante é simultaneamente a amplitude de  $MR$  ( $\Delta MR$ ) e largura de gama  $H$  ( $\Delta H$ ) em que há resposta linear - uma boa sensibilidade pode envolver gamas reduzidas e portanto não ter aplicabilidade. A padronização deve ter em conta a funcionalidade do sensor!

## Referências

- [1] Laboratório de Física Experimental Avançada - 2º semestre - Magnetoresistência em filmes finos  
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/disciplinas/LFEA36451113/2015-2016/2-semestre/magnetoresistencia-em-filmes-finos> Magnetoresistência em filmes finos - Laboratório de Física Experimental Avançada 2016  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312274023/Introducao\\_Magnetoresistencia.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312274023/Introducao_Magnetoresistencia.pdf)
- [3] Linearisation strategies for high sensitivity magnetoresistive sensors  
<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428736011/Linearization%20MR%20sensors%20-%20Parte%2.pdf>
- [4] Units for magnetic properties  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428734645/magnetic\\_units.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428734645/magnetic_units.pdf)
- [5] MR Sensors - INESC-MN  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312276823/Slides\\_MR\\_Sensorstutorial.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312276823/Slides_MR_Sensorstutorial.pdf)
- [6] Guias de Laboratório - LFEA  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428736009/Magnetoresist\\_Guiao.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428736009/Magnetoresist_Guiao.pdf)  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428734646/Magnetoresistencia\\_Guia2016%20-%20Parte%201.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428734646/Magnetoresistencia_Guia2016%20-%20Parte%201.pdf)  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428735278/Magnetoresistencia\\_Guia2016%20-%20Parte%202.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563568428735278/Magnetoresistencia_Guia2016%20-%20Parte%202.pdf)  
[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312277361/Magnetoresistencia\\_Guia2016%20-%20Parte%203.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970943312277361/Magnetoresistencia_Guia2016%20-%20Parte%203.pdf)
- [7] Magnetoresistance - Wikipedia  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetoresistance>