

Magnetorresistência em Filmes Finos

José Senart 77199, Patrícia Estrela 78651, Miguel Condesso 79160

Instituto Superior Técnico

Mestrado Engenharia Física Tecnológica 2015/2016

Laboratório de Física Experimental Avançada

Abril 2016

Resumo

Neste trabalho foram estudados os efeitos de magnetorresistência (MR) anisotrópica e gigante através de sensores de características variadas. Foram determinadas as curvas $MR(H)$ de cada sensor e os parâmetros que a caracterizam: resistência mínima, máxima, MR_{max} , campo de offset, campo coercivo, H_{sat} e sensibilidade. Determinámos o coeficiente anisotrópico $K_u = 3078.708 \pm 49.879(erg/cm^3)$. Através da comparação entre os vários sensores, determinámos os factores que optimizam um sensor magnetorresistivo: dimensões do sensor, existência de *pinned layer*.

1 Introdução

Efeito AMR

O efeito de magnetorresistência anisotrópica (AMR) é característico de materiais ferromagnéticos e consiste na variação do valor de resistência eléctrica aquando da variação de um campo magnético externo aplicado.

Esta variação é dada por:

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

em que M_{sat} é a magnetização de saturação do material e H_{app} o campo magnético aplicado.

Para se comparar estruturas diferentes normaliza-se a variação da resistência com o seu valor mínimo, o que se define como magnetorresistência, dada em percentagem por:

$$MR(H) = \frac{R(H) - R_{min}}{R_{min}} \times 100(\%) \quad (2)$$

A magnetorresistência máxima obtém-se substituindo $R(H)$ por R_{max} .

Na figura ao lado estão representadas duas configurações da magnetização do material a ser percorrido por uma corrente eléctrica. Como se pode observar, quando a direcção da magnetização é perpendicular à direcção da corrente (caso da direita) a resistência encontrada pelos electrões é mínima. Quando as duas direcções são paralelas (caso da esquerda) a resistência é máxima.

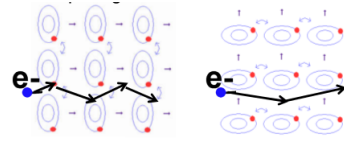


Figura 1: Magnetização e corrente.

Assim, o campo magnético externo altera a magnetização do material, modificando o valor da magnetorresistência.

Efeito GMR

O efeito de magnetorresistência gigante (GMR) é característico de multicamadas de filmes finos, compostas por camadas alternadas de materiais ferromagnéticos e materiais condutores (mas não magnéticos).

A resistência nestas estruturas depende da orientação da magnetização de camadas ferromagnéticas consecutivas.

Quando as orientações se encontram paralelas - resistência mínima -, os electrões de uma corrente de spin (modelo de Mott) encontram uma resistência elevada, enquanto que os electrões de outra corrente de spin encontram uma resistência nula. Já quando as camadas se encontram anti-paralelas - resistência máxima -, as duas correntes de spin encontram resistências nas duas camadas.

Devido ao acoplamento magnetoestático que surge entre as duas camadas ferromagnéticas existe um campo de *offset*. Existe ainda outro parâmetro característico destas estruturas que está relacionado com a existência de um eixo preferencial para a magnetização, denominado de campo coercivo - H_c .

A sensibilidade destes sensores representa o quão sen-

sível é o sensor a uma variação de campo, definida por:

$$S = \frac{1}{R_{min}} \frac{\Delta R}{\Delta H} = \frac{\Delta MR}{\Delta H} \quad (3)$$

2 Esquema de Montagem

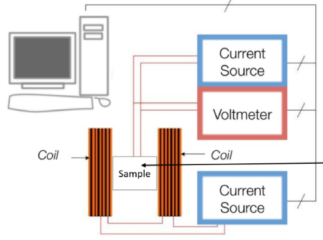


Figura 2: Esquema da montagem experimental.

Nesta experiência utilizámos a montagem representada na figura anterior. Foi ligada uma fonte de corrente a alimentar bobinas de Helmholtz. Esta fonte encontrava-se ligada ao computador, que através do *software* "Magnetoresistência em Filmes Finos", controlava a corrente nas bobinas e, conseqüentemente, o campo magnético produzido.

As amostras, para cada parte da experiência, foram colocadas dentro de caixas de acrílico, adaptadas às particularidades de cada amostra. Através desta caixa fizeram-se as ligações eléctricas das amostras com outra fonte de corrente e com um voltímetro. Para assegurar a segurança das amostras e para alterar as conexões a ser utilizadas na caixa de acrílico, foi também necessária uma caixa com interruptores.

Apesar de não estar representado na figura, foi também utilizado um amperímetro, para verificação do valor de corrente que circulava na amostra.

3 Magnetoresistência Anisotrópica

Nesta parte da experiência encontrou-se, em primeiro lugar, a característica $V(I)$ de um filme fino de $Ni_{80}Fe_{20}$. De seguida submeteu-se esta amostra a diferentes correntes eléctricas e estudou-se a sua resposta em resistência ($R(H)$) a diferentes intensidades de campo magnético perpendicular e paralelo.

3.1 Característica $V(I)$ da Amostra

Para encontrar a característica $V(I)$ da amostra fez-se passar por ela corrente variável, obtendo-se pontos a

ajustar linearmente.

$$V(I) = R \times I + b \quad (4)$$

em que o parâmetro b deve ser compatível com 0. Obteve-se do ajuste da figura

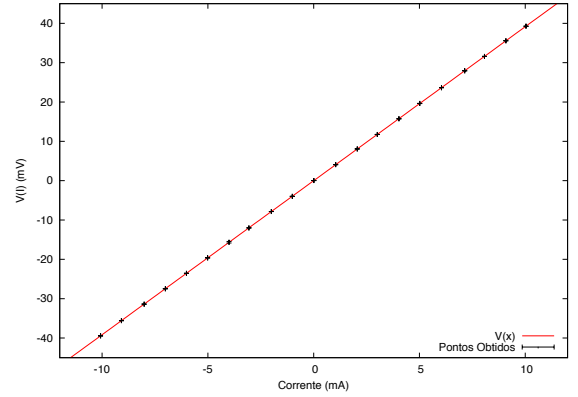


Figura 3: Característica $V(I)$ num filme fino (100nm) de $Ni_{80}Fe_{20}$. Parâmetros: $R = 3.91567 \pm 0.00024$ e $b = -0.00919 \pm 0.00126$ com $\chi^2/n_{gl} = 0.26603$

O parâmetro R corresponde à resistência da amostra. O valor demasiado baixo de χ^2/n_{gl} deve-se ao facto de, por oscilações excessivas na corrente, termos sobrestimado o seu erro.

3.2 Dependência da Magneto-resistência do Campo Aplicado

No estudo que se segue utilizaram-se as tensões obtidas do programa directamente no tratamento de dados em vez da magnetoresistência ($MR(H)$), para não se introduzir também o erro da intensidade de corrente. Os resultados são equivalentes e o gráfico com $MR(H)$ está representado em anexo.

3.2.1 Campo Magnético Paralelo

Introduziu-se a amostra na posição **A** numa bobine, cuja corrente fpo controlada pelo *software* *Magnetoresistência em Filme Finos*. Obteve-se os dados apresentados na figura 4.

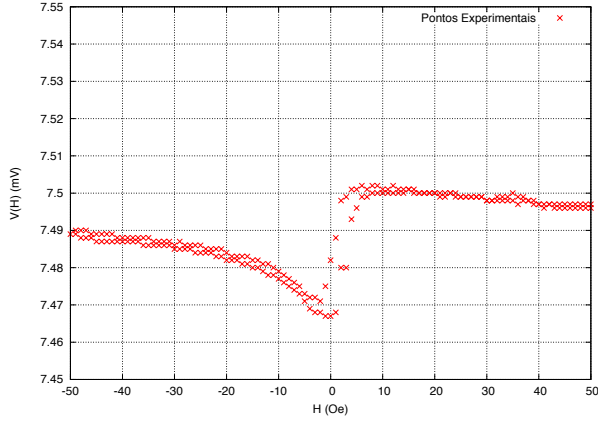


Figura 4: Resposta da amostra de $Ni_{80}Fe_{20}$ ao campo variável paralelo ao sentido da corrente.

Com a observação do gráfico pode-se concluir que existe uma anisotropia no sentido da corrente. Isto porque não existe um máximo na tensão como seria de esperar da expressão 1. A variação relativa da resistência é muito pequena e não existe uma zona linear significativa que possa surtir interesse para efeitos práticos (detectores) nem para calcular o K_u .

3.2.2 Campo Magnético Perpendicular

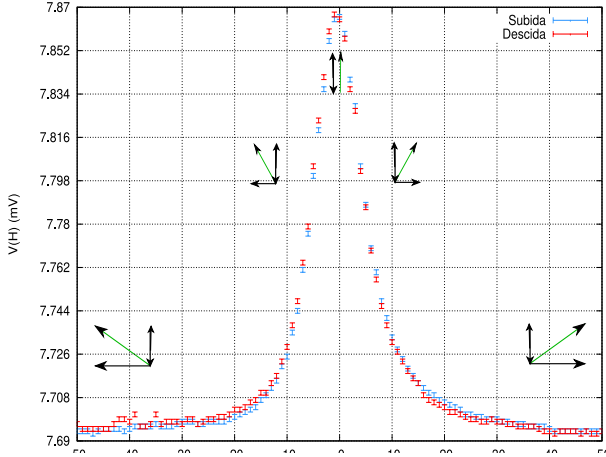


Figura 5: Dados obtidos para a variação de tensão com a intensidade do campo magnético. Corrente de 1.988 mA.

No gráfico, pode ver-se uma seta na vertical que indica a direcção da anisotropia, na horizontal o campo magnético aplicado e uma representação da resultante magnetização.

¹Fizeram-se 17 aquisições com 1mA, mas os contactos com a amostra produziram demasiado ruído. Daqui adiante referir-nos-emos sempre à última aquisição de 2mA.

Para se calcular o coeficiente anisotrópico mudou-se a amostra para a posição **B**, introduziu-se a caixa na bobine e fizeram-se aquisições com 1mA¹ e com 2mA de corrente a passar na amostra. Obtiveram-se os dados representados no gráfico da figura 6

Este gráfico tem um máximo de tensão perto de $|\vec{H}| = 0$, ao contrário do anterior, com $\vec{H} \parallel \vec{J}$. A magnetização é perpendicular à anisotropia quando o campo é máximo, criando um mínimo na resistência. Quando o campo é nulo, a magnetização fica na direcção de K_u e a resistência encontra o seu máximo. Isto está de acordo com as previsões teóricas para um campo aplicado perpendicular à anisotropia da introdução. Este facto motiva-nos a utilizar estes dados para encontrar o coeficiente de anisotropia K_u da amostra.

Precisaremos primeiro de calcular a resistência mínima, a máxima e a dependência $V(H)$. Para isso retirou-se o valor mínimo de tensão do conjunto de dados $V_0 = 7.693 \pm 0.001 mV$ (ou seja $R_{min} = 3.870 \pm 0.002 \Omega$). Fez-se a seguir aos dados da figura 6 3 ajustes:

Um ajuste para cada uma das zonas lineares do gráfico (à esquerda e à direita do máximo);

Um à equação

$$V(H) = V_{max} - (V_{max} - V_{min}) * T * (H - H_0)^2 \quad (5)$$

em que V_{min} é o retirado do primeiro ajuste. Apresentam-se então todos estes ajustes nos gráficos da figura ?? Dos ajustes lineares obteve-se os parâmetros:

		$s(mVOe^{-1})$	$b(mV)$	$S(Oe^{-1})$
E	↑	0.0187 ± 0.0002	7.8932 ± 0.0009	2.43 ± 0.02
	↓	0.0199 ± 0.0008	7.901 ± 0.003	2.59 ± 0.09
D	↑	-0.019 ± 0.001	7.885 ± 0.006	-2.5 ± -0.2
	↓	-0.0175 ± 0.0008	7.874 ± 0.003	-2.3 ± -0.1

Tabela 1: Cálculo da sensibilidade.

O parâmetro S é a sensibilidade da amostra. Como se pode ver, os valores de sensibilidade na subida e na descida, embora próximos não são compatíveis. Isto indicamos que a amostra não será um bom detector, já que se comporta de modo diferente para campos crescentes e decrescentes, tanto negativos como positivos.

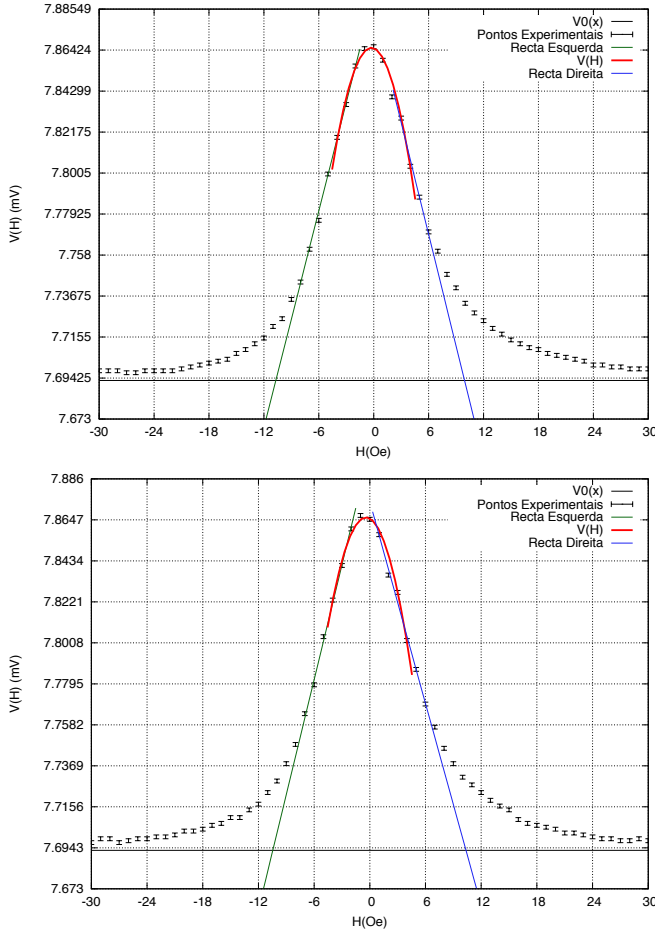


Figura 6: Ajustes para os pontos correspondentes à subida e à descida do campo magnético respectivamente.

Utilizando as rectas de sensibilidade avaliadas no ponto $V(H) = V_0$ podem-se obter os campos magnéticos de saturação $H_s = \frac{V_0 - b}{S}$

		$H_s(\text{Oe})$
Esquerda	Subida	-10.6 ± 0.1
	Descida	-10.4 ± 0.5
Direita	Subida	9.9 ± 0.6
	Descida	10.3 ± 0.4

Tabela 2: Campos de saturação. Este cálculo utiliza os valores da tabela??

Dos ajustes quadráticos pode-se calcular o coeficiente anisotrópico K_u . Os parâmetros obtidos para a expressão 5 foram:

	Subida	Descida
$T(\text{Oe}^{-2})$	0.0198 ± 0.0006	0.0193 ± 0.0006
$H_0 (\text{Oe})$	-0.25 ± 0.04	-0.41 ± 0.05
$V_m (\text{mV})$	7.865 ± 0.001	7.866 ± 0.001
χ^2	4.16	4.81

Tabela 3: Parâmetros obtidos do ajuste à expressão 5.

Sendo os dois valores de V_m compatíveis, considerou-se $R_{max} = \frac{V_{m\uparrow} + V_{m\downarrow}}{2I} = 3.965 \pm 0.002\Omega$. Pode-se calcular então o valor de $MR_{max} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} = 2.24 \pm 0.07\%$. Sabendo agora que $T = \frac{M_s}{2K_u}$ com a magnetização de saturação $M_s = 880 \text{ emu/cm}^3$ calcula-se o coeficiente de anisotropia na tabela 4

	$T(\text{Oe}^{-2})$	$K_u(\text{erg/cm}^3)$
Subida	0.0198 ± 0.0006	3123.7114 ± 46.8454
Descida	0.0193 ± 0.0006	3167.058 ± 52.6787

Tabela 4: Cálculo do coeficiente de anisotropia K_u .

Pelo mesmo raciocínio aplicado a V_m pode-se calcular um $K_u = \frac{K_{u\uparrow} + K_{u\downarrow}}{2} = K_u = 3078.708 \pm 49.879(\text{erg/cm}^3)$

3.2.3 Campo criado por íman

Em anexo estão *plots* dos dados retirados com um ímã colocado junto e afastado 3cm da bobina de Rogowski. Ajustou-se os picos visíveis da Magnetorresistência através da função (5). O valor de H_0 corresponde ao desvio à origem introduzido pelo campo magnético do ímã.

Ensaio	$H_{0\uparrow}(\text{Oe})$	$H_{0\downarrow}(\text{Oe})$
A, junto	35.622 ± 0.098	35.362 ± 0.082
B, junto	-35.978 ± 0.177	-35.896 ± 0.099
B, 3cm	-11.445 ± 0.113	-11.646 ± 0.058

Tabela 5: Offset induzido pelo campo magnético do ímã. Gráficos dos ajustes em Anexo.

Os valores de H_0 são concordantes, salientando-se uma pequena assimetria entre A e B, possivelmente devida à orientação preferencial de magnetização da amostra.

4 Magnetorresistência Gigante

Nesta parte da experiência, foram estudadas duas amostras de válvulas de spin: SV1 (sem camada de referência fixa) e SV2 (com camada de referência fixa-camada antiferromagnética).

- SV1 - vidro /Ta(3.5nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (4nm)/ $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ (2 nm)/ Cu (2.4 nm)/ $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ (2 nm)/Ta(2 nm)
- SV2 - vidro /Ta(1nm)/ $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (4nm)/ $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ (2 nm)/ Cu (2.4 nm)/ $\text{Co}_{80}\text{Fe}_{20}$ (2 nm)/ $\text{Mn}_{70}\text{Ir}_{30}$ (8nm)/Ta(2 nm)

Obteve-se a característica $V(I)$ para cada amostra, com (3).

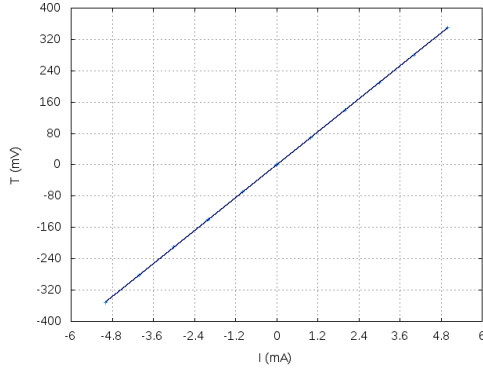


Figura 7: Característica $V(I)$ para o sensor SV1. Parâmetros de ajuste: $R = 70.089 \pm 0.011\Omega$ e $b = -0.008 \pm 0.009\text{mV}$, com $\chi^2/ndf = 27.48$

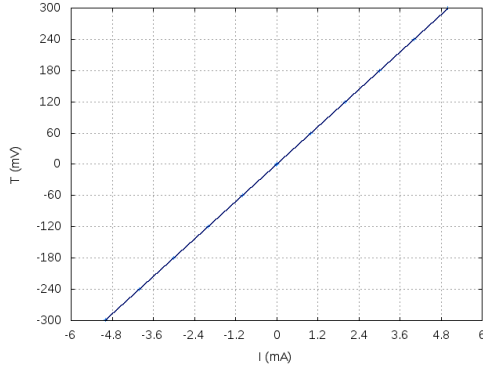


Figura 8: Característica $V(I)$ para o sensor SV2. Parâmetros de ajuste: $R = 59.809 \pm 0.0072\Omega$ e $b = 0.018 \pm 0.015\text{mV}$, com $\chi^2/ndf = 32.32$

Verifica-se, uma relação linear tensão-corrente para as duas amostras.

Nos gráficos seguintes utilizou-se a seguinte convenção: pontos azuis ('Subida'), varrimento dos valores de H da esquerda para a direita; pontos vermelhos, dizem respeito à fase da direita para a esquerda ('Descida'); a seta de cima representa a magnetização da camada livre e a de baixo a magnetização da *pinned layer* (na SV1, a de baixo é também livre).

Determinando rectas de ajuste em troços de comportamento linear, podemos obter a sensibilidade, que corresponde ao declive destas (3).

Colocámos a amostra SV1 na caixa de acrílico, de forma a que o sensor estivesse disposto perpendicularmente ao campo aplicado, \vec{H} , e estabelecemos a corrente, \vec{J} na amostra com o valor de 2mA. Assim, a magnetização das camadas está paralela a \vec{H} e perpendicular a \vec{J} .

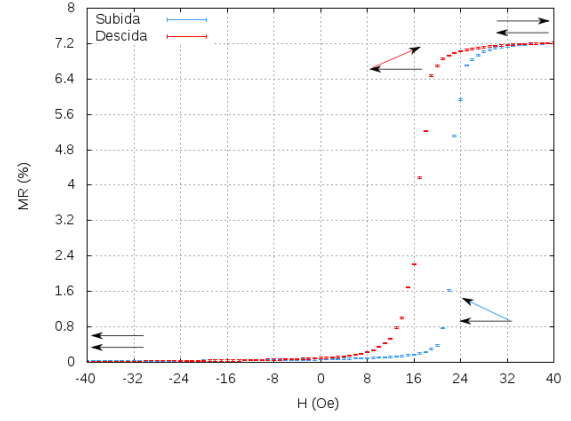


Figura 9: Curva de MR da amostra SV1; \vec{H} de -40 a 40 Oe (com passos de 1 Oe).

Pode-se observar nesta curva as variações das orientações das camadas ferromagnéticas. Como indicado na figura, quando o valor de MR é mínimo, as camadas encontram-se paralelas, sendo máximo quando estão anti-paralelas, ocorrendo a transição na zona de histerese.

A região desta curva que se poderia linearizar é muito pequena e de declive muito grande, não sendo útil considerar o cálculo da sua sensibilidade.

R_P (Ω)	69.921 ± 0.001
R_{AP} (Ω)	74.964 ± 0.001
MR_{Max} (%)	7.213 ± 0.002
H_{offset} (Oe)	19.6412 ± 0.0003
H_c (Oe)	2.9281 ± 0.0003

Tabela 6: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV1

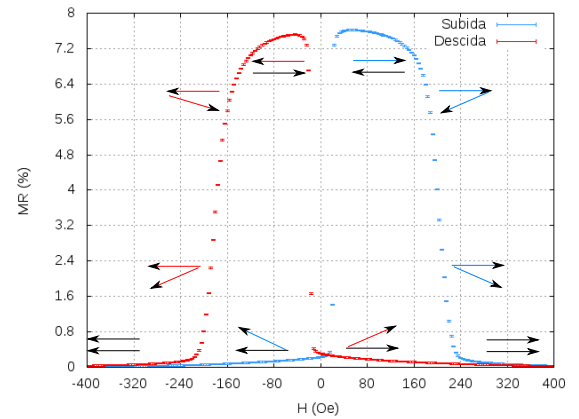


Figura 10: Curva de MR da amostra SV1; H de -400 a 400 Oe (passo 5 Oe).

Nesta curva notam-se diferenças em relação à primeira: na primeira existiam apenas dois patamares, nesta existem quatro.

No sentido da subida: as duas camadas encontram-se inicialmente paralelas. Quando o campo muda de sen-

tido, uma das camadas alinha-se segundo o novo sentido do campo - camadas ficam anti-paralelas. Quando o campo se torna suficientemente grande a outra camada também se alinha segundo o novo sentido - ficam paralelas.

No sentido da descida: as duas camadas encontram-se inicialmente paralelas orientadas segundo o sentido do campo. Quando o campo muda de sentido, uma das camadas alinha-se com o novo sentido do campo, enquanto que a outra camada só se alinha para campos mais fortes.

Era de esperar que as duas camadas, como estão livres, se orientassem ao mesmo tempo com o sentido do campo, no entanto, tal não acontece. Concluimos que as duas camadas deverão ter constantes de anisotropia diferentes.

Notamos também que os valores de campo para os quais a camada começa a alinhar-se são um pouco diferentes. Para valores de campo negativo a camada começa a alinhar-se antes dos -160 Oe. Enquanto que, no lado positivo, só após os 160 Oe. Isto revela uma orientação preferencial de magnetização segundo o sentido negativo do campo.

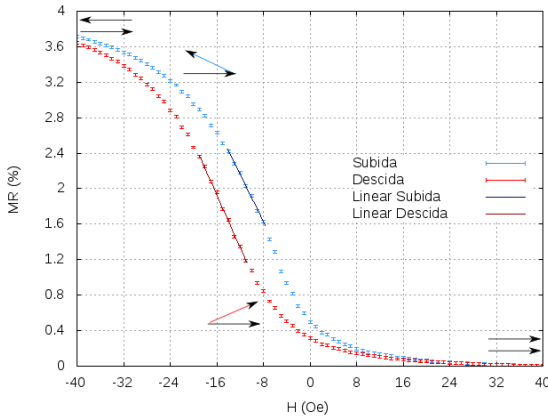


Figura 11: Curva de MR da amostra SV2; H de -40 a 40 Oe (passo 1 Oe).

Nesta amostra, os patamares são diferentes da anterior, o valor de MR máximo ocorre para valores negativos do campo, enquanto que o mínimo para valores positivos. Isto acontece porque nesta amostra uma das camadas se encontra "fixa" no sentido do campo positivo.

R_P (Ω)	59.6376 ± 0.0060
R_{AP} (Ω)	62.2007 ± 0.0062
MR_{Max} (%)	4.2978 ± 0.0148
H_{offset} (Oe)	-14.675 ± 0.267
H_c (Oe)	2.772 ± 0.267

Tabela 7: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV2

Fase	Troço	Sens. ($Oe^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-14, -8]$	-0.1328 ± 0.0031	0.568 ± 0.034	1.227
Descida	$H \in [-19, -11]$	-0.1492 ± 0.0024	-0.455 ± 0.037	1.634

Tabela 8: Linearização: $MR = Sens * H + b$

As margens de erro dos valores de sensibilidade não são compatíveis o que, aliado à visível histerese, levam à conclusão de que a amostra SV2 não poderá constituir um bom sensor.

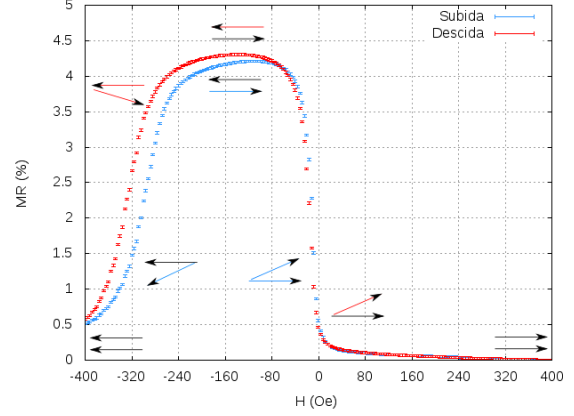


Figura 12: Curva de MR da amostra SV2; H de -400 a 400 Oe (passo 5 Oe).

As duas camadas encontram-se paralelas a partir do valor nulo de campo, o que significa que uma das camadas tem a sua orientação fixada segundo o sentido positivo do campo e a outra tem a sua orientação preferencial segundo este sentido também.

Nesta curva, ao contrário da curva da figura (naaaaaa), já só se encontram 3 patamares. Na verdade, podíamos esperar apenas dois patamares correspondentes à variação de apenas uma camada. No entanto verificamos que tal não acontece, pelo que, podemos concluir que a partir de valores de campo negativo alto (à volta de 200 Oe) o campo aplicado vence a fixação imposta pela camada antiferromagnética.

Outro aspecto interessante nesta curva é a diferença de largura entre as duas histereses. A da esquerda é mais larga que a da direita o que é justificável, pois na descida o campo tem de ultrapassar a tal fixação imposta, enquanto que na subida o campo vai perdendo força e a camada tem tendência para orientar-se segundo o sentido fixado. É, portanto, necessário que os valores de campo sejam superiores na descida que na subida originando a tal largura na histerese.

Comparando as duas amostras com vista ao seu sentido prático, podemos concluir que a SV1 é mais útil na detecção de variações bruscas no sentido do campo, enquanto que a SV2 apresenta um comportamento mais linear, que

apesar de não ser o ideal, poderá ser utilizado como sensor linear.

Comparando os resultados obtidos nesta parte com os dos sensores AMR, podemos verificar que os sensores com GMR são muito melhores, tanto para a detecção do campo nulo, pois apresentam uma variação muito mais rápida, assim como para sensores lineares (quando existe uma camada fixa).

5 Sensores Magnetorresistivos Micrométricos

Nesta parte da experiência foram estudadas válvulas de spin com a mesma estrutura de multicamadas que a amostra SV2, mas de dimensões micrométricas. As duas amostras estudadas (MicroSV4 e MicroSV3) apresentavam sensores de forma rectangular com o mesmo comprimento ($L=100\text{ }\mu\text{m}$), mas larguras (h_{sensor}) diferentes (2, 4, 6.5 e $10\text{ }\mu\text{m}$). Devido a estas dimensões ($L \gg h_{\text{sensor}}$) a magnetização preferencial da camada livre tem a direcção de L , ou seja, é perpendicular à direcção da camada fixa.

Cada amostra continha dois pares de sensores iguais dispostos de forma a também se poder estudar a influência da orientação do campo magnético aplicado (cada sensor tem a mesma orientação para a direcção magnética preferencial).

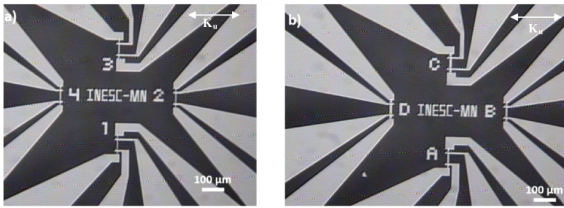


Figura 13: Imagens microscópicas das amostras estudadas. À esquerda a Micro SV3 em que os sensores 1 e 2 têm $h_{\text{sensor}} = 2\text{ }\mu\text{m}$ e os sensores 3 e 4 têm $h_{\text{sensor}} = 4\text{ }\mu\text{m}$. À direita a MicroSV4 em que os sensores A e B têm $h_{\text{sensor}} = 6.5\text{ }\mu\text{m}$ e C e D têm $h_{\text{sensor}} = 10\text{ }\mu\text{m}$.

Colocámos a amostra MicroSV4 na caixa de acrílico de forma a que os sensores B e D estivessem orientados perpendicularmente com o campo aplicado. Obtivemos, através do programa, a variação da tensão em função do campo aplicado, com uma corrente aplicada ao sensor de 1mA. Obtivemos as curvas $MR(H)$, do mesmo modo que na parte anterior.

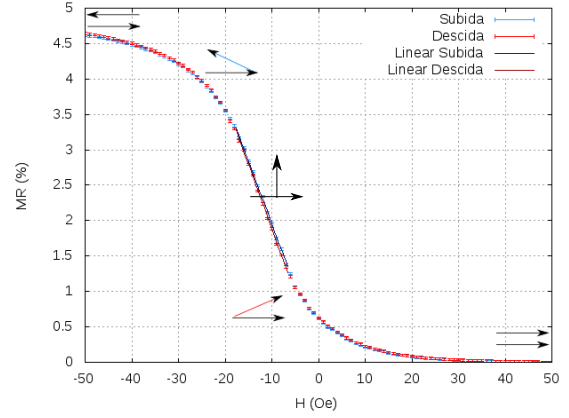


Figura 14: Curva de MR da amostra SV4 sensor B; H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe).

R_P (Ω)	163.008 ± 0.016
R_{AP} (Ω)	170.575 ± 0.017
MR_{Max} (%)	4.6416 ± 0.0148
H_{offset} (Oe)	-12.272 ± 0.166
H_c (Oe)	0.124 ± 0.166

Tabela 9: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV4-B

Fase	Intervalo Linear	Sens. ($\text{Oe}^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-17, -7]$	-0.2098 ± 0.0040	-0.272 ± 0.054	2.144
Descida	$H \in [-17, -7]$	-0.2141 ± 0.0034	-0.329 ± 0.038	1.485

Tabela 10: Parâmetros: $MR = \text{Sens} \cdot H + b$

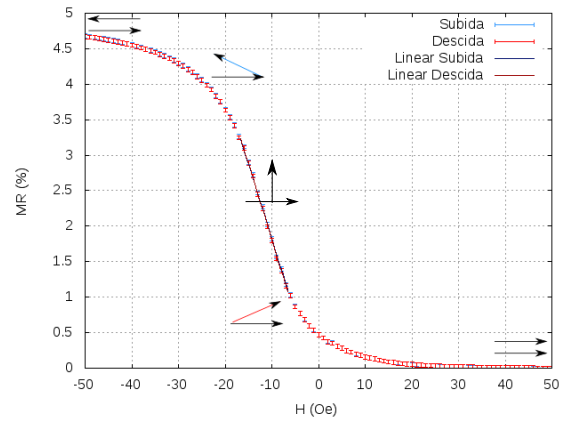


Figura 15: Curva de MR da amostra SV4 sensor D; H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe).

R_P (Ω)	128.781 ± 0.026
R_{AP} (Ω)	134.810 ± 0.027
MR_{Max} (%)	4.682 ± 0.030
H_{offset} (Oe)	-12.4639 ± 0.2202
H_c (Oe)	0.0060 ± 0.2202

Tabela 11: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV4-D

Fase	Intervalo Linear	Sens. ($Oe^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-11, 2]$	-0.1779 ± 0.0016	2.380 ± 0.011	2.753
Descida	$H \in [-11, 2]$	-0.1725 ± 0.0039	2.242 ± 0.020	15.97

Tabela 12: Parâmetros dos ajustes lineares $MR = Sens * H + b$

Na amostra SV4, quer para o sensor B quer para o D, os valores das sensibilidades para a 'subida' são concordantes com os da 'descida' (não o sendo entre B e D). Assim, verifica-se um comportamento linear na gama ajustada de campo aplicado.

Procedemos da mesma forma para a amostra MicroSV3 colocando-a de forma a que os sensores 2 e 4 estivessem perpendiculares à direcção do campo magnético aplicado. Obtiveram-se as curvas $MR(H)$ da mesma forma.

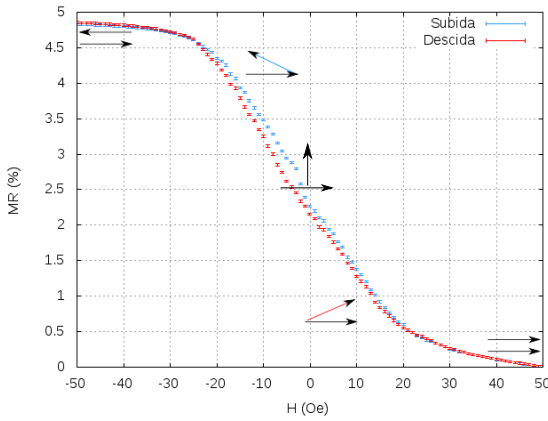


Figura 16: Curva de MR da amostra SV3 sensor 2, H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe). Ajustes utilizados apenas no cálculo de H_{offset} e H_c .

A curva apresenta um comportamento irregular e histerético na região que pretenderíamos linearizar. Assim, não faz sentido considerar o cálculo de uma sensibilidade linear.

R_P (Ω)	279.511 ± 0.028
R_{AP} (Ω)	293.081 ± 0.029
MR_{Max} (%)	4.855 ± 0.015
H_{offset} (Oe)	-1.95 ± 0.18
H_c (Oe)	1.07 ± 0.18

Tabela 13: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV3-2

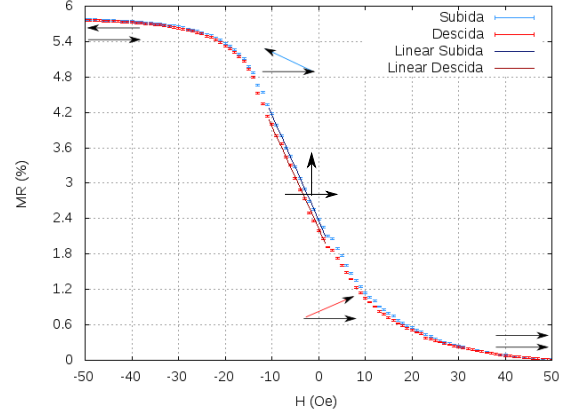


Figura 17: Curva de MR da amostra SV3-sensor 4, H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe).

Linearizou-se o troço $H \in [-11, 2]$, obtendo-se os resultados:

R_P (Ω)	165.056 ± 0.017
R_{AP} (Ω)	174.592 ± 0.017
MR_{Mx} (%)	5.7768 ± 0.0150
H_{offset} (Oe)	-3.303 ± 0.080
H_c (Oe)	0.447 ± 0.080
$S_{subida}(Oe^{-1})$	-0.1779 ± 0.0016
$S_{descida}(Oe^{-1})$	-0.1725 ± 0.0039

Tabela 14: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV3-4

Fase	Intervalo Linear	Sens. ($Oe^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-11, 2]$	-0.1779 ± 0.0016	2.380 ± 0.011	2.753
Descida	$H \in [-11, 2]$	-0.1725 ± 0.0039	2.242 ± 0.020	15.97

Tabela 15: Parâmetros dos ajustes lineares $MR = Sens * H + b$

Os valores das sensibilidades para a 'subida' são concordantes com os da 'descida', constatando-se o desejado comportamento linear na gama ajustada.

Utilizámos ainda outra amostra semelhante à MicroSV3, mas com uma estrutura multicamadas com base de silício em vez de vidro, para a qual também foram obtidas as curvas $MR(H)$.

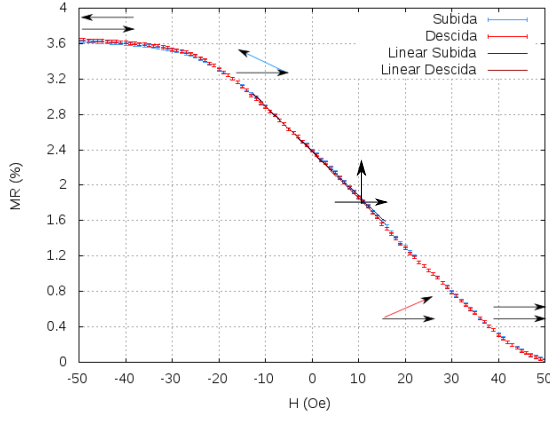


Figura 18: Curva de MR da amostra SV3 com base de silício, sensor 2, H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe).

R_P (Ω)	495.112 ± 0.050
R_{AP} (Ω)	513.152 ± 0.051
MR_{Max} (%)	3.643 ± 0.015
H_{offset} (Oe)	10.909 ± 0.068
H_c (Oe)	0.257 ± 0.068

Tabela 16: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV3s-2

Fase	Intervalo Linear	Sens. ($Oe^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-13, 15]$	-0.05064 ± 0.00031	2.3872 ± 0.0026	0.9074
Descida	$H \in [-13, 15]$	-0.05215 ± 0.00040	2.3772 ± 0.0036	1.712

Tabela 17: Parâmetros dos ajustes lineares $MR = Sens * H + b$

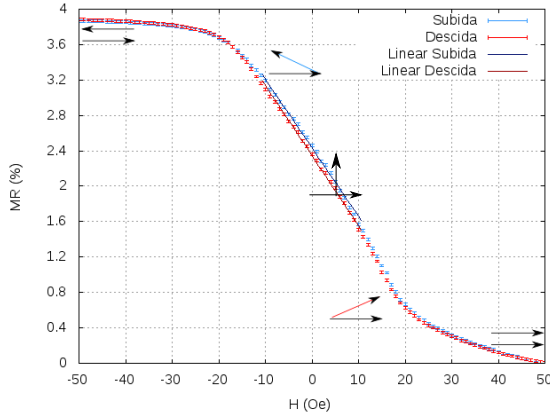


Figura 19: Curva de MR da amostra SV3 com base de silício, sensor 4, para uma variação de H de -50 a 50 Oe (passo 1 Oe).

R_P (Ω)	304.507 ± 0.030
R_{AP} (Ω)	316.327 ± 0.032
MR_{Max} (%)	3.882 ± 0.015
H_{offset} (Oe)	5.732 ± 0.078
H_c (Oe)	0.618 ± 0.078

Tabela 18: Parâmetros da curva $MR(H)$ da amostra SV3s-4

Fase	Intervalo Linear	Sens. ($Oe^{-1}\%$)	b (%)	χ^2/ndf
Subida	$H \in [-10, 10]$	-0.07742 ± 0.00109	2.4326 ± 0.0067	4.359
Descida	$H \in [-10, 10]$	-0.07907 ± 0.00095	2.3453 ± 0.0058	3.296

Tabela 19: Parâmetros dos ajustes lineares $MR = Sens * H + b$

Com a base de silício, existem pequenos desvios entre os valores das sensibilidades para as 'subidas' e para as 'descidas', já que as suas margens de erro não se sobrepõem. Estas incoerências, estão relacionados com os valores de H_c .

Colocámos também as amostras MicroSV4 e MicroSV3 de forma a ter os sensores A e C, 1 e 3, respectivamente, orientados paralelamente à direcção do campo. Corremos o programa de forma a variar o campo nas mesmas duas gamas (-50 a 50 Oe e -400 a 400 Oe), para cada um dos sensores e obtivemos curvas que não apresentam um comportamento que possa ser analisado. Desta forma, consideramos que este tipo de sensores não pode ser utilizado com campos magnéticos paralelos à sua direcção preferencial de magnetização.

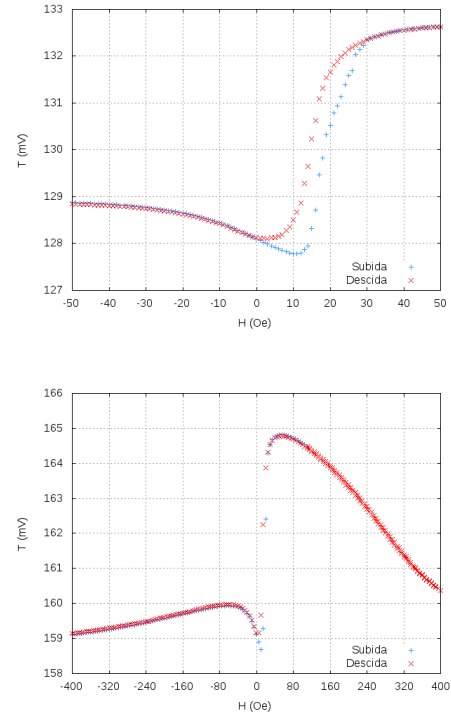


Figura 20: Em cima: Gráfico da variação da tensão em função do campo aplicado (-50 a 50 Oe) para o sensor A (gráfico semelhante para o sensor C). Em baixo: Gráfico da variação da tensão em função do campo aplicado (-400 a 400 Oe) para o sensor C (gráfico semelhante para o sensor A).

Na figura seguinte encontram-se as expressões teóricas para H_{sat} e declive (sensibilidade é proporcional ao declive).

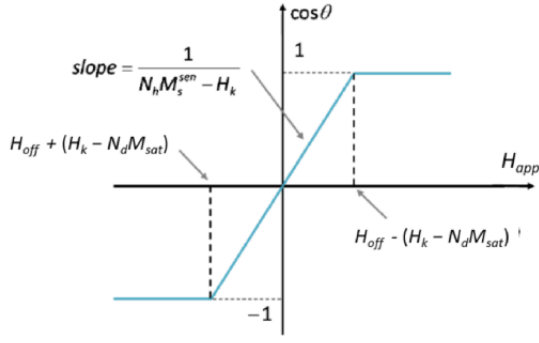


Figura 21: Curva teórica da resposta magnética linear de uma válvula de spin para $H_k < N_d M_{sat}$

O campo de saturação é definido pela condição $\pm(H_k - N_d M_{sat})$ com $H_k < N_d M_{sat}$. Em que $H_k = \frac{2k_u}{M_{sat}}$ (constante), $N_d = \frac{4\pi}{h_{sensor}}$.

Assim, para um valor maior de $N_d M_{sat}$, maior a distância entre os dois patamares e, conseqüentemente, menor o declive (sensibilidade).

Esta previsão teórica é concordante com os resultados que obtivemos, ou seja, para h_{sensor} de menores dimensões obtém-se um maior H_{sat} e, portanto, um menor declive.

Comparando os resultados obtidos com este tipo de estruturas dos com as estruturas utilizadas no estudo de GMR, concluímos que estas são muito melhores para serem utilizadas como sensores lineares, tendo uma gama maior de comportamento linear e apresentando histereses com larguras diminutas. Este tipo de comportamento acontece porque a camada livre se encontra perpendicular à camada fixa, obtendo-se uma variação contínua entre as configurações paralela e anti-paralela. Além disso, confirma-se que estes sensores têm como base uma estrutura tipo SV2, pois todos apresentam curvas MR com a mesma forma, ou seja, R_{min} encontra-se para valores positivos de campo, enquanto que R_{max} se encontra para valores negativos.

Comparando os resultados obtidos para todos os sensores desta parte da experiência podemos concluir acerca das características que optimizam este tipo de sensores.

Primeiro concluímos, dado os resultados obtidos com os sensores A, C, 1 e 3, que estes sensores só funcionam quando a sua orientação preferencial de magnetização se encontra perpendicular à direcção do campo magnético.

Em segundo lugar, notamos que para menores h_{sensor}

se obtêm melhores resultados. Na amostra SV4 não se notam grandes diferenças nas curvas MR(H), mas atendendo aos valores de sensibilidade observa-se que o sensor D (de maior h_{sensor}) apresenta um valor maior de sensibilidade em relação ao sensor B. Como a sensibilidade representa o declive da curva MR(H), quanto menor a sensibilidade melhor é o sensor. Na amostra SV3, apesar de não termos bons resultados, conseguimos observar que tem um melhor comportamento linear que a amostra SV4, sendo que o sensor de menor h_{sensor} (sensor 2) apresenta o melhor comportamento. Isto também se verifica na amostra SV3 com base de silício onde o sensor 2 é também o que apresenta o melhor comportamento linear, com uma sensibilidade muito mais pequena do que as obtidas com a amostra SV4.

Concluímos então que o sensor 2 com um $h_{sensor}=2\mu$ é o melhor sensor para efeitos lineares que estudámos.

De forma a se poder construir sensores ainda melhores pode-se alterar o h_{sensor} ou ainda alterar o material, ou seja, M_{sat} (aumentando-o), pois são estas as variáveis que nos permitem controlar a zona de comportamento linear.

6 Conclusão

Os dados adquiridos para a amostra SV2 quando o campo variava de -40 a 40 Oe não são suficientes para determinar um bom valor de R_{max} tivemos de utilizar o R_{max} do gráfico de -400 a 400 Oe. Sugeríamos que para esta amostra a variação mais pequena do campo fosse de -80 a 80 Oe.

Nesta experiência tivemos alguns problemas com os contactos eléctricos nas amostras, enviamos em anexo alguns exemplos de aquisições onde os contactos não estavam bem efectuados.

Outro problema que tivemos foi com os contactos eléctricos na caixa de interruptores.

A amostra Micro SV3 devia encontrar-se danificada, pois existem oscilações na zona linear que não eram expectáveis.

Ao longo do trabalho não considerámos que o valor do campo aplicado tinha erro, no entanto, existe um erro associado que terá influência nos resultados obtidos.

Podíamos ter realizado uma calibração entre os valores lidos nos geradores de corrente e na amostra e outra nas bobinas.