

Magnetoresistência em Filmes Finos - Estudo dos Efeitos AMR, GMR e de Sensores Magnetoresistivos Micrométricos

Grupo 3C: Miguel Gonçalves (78850), Pedro Pereira (78889), Clara Pereira (79156)

Instituto Superior Técnico

Mestrado em Engenharia Física Tecnológica

Laboratório de Física Experimental Avançada

Abril de 2016 - 2º Semestre 2015/2016

Resumo

Estudou-se o efeito AMR, obtendo-se $MR(H)$ para o filme usado, sendo $MR_{max} = 2.287 \pm 0.073\%$. Obteve-se os campos de Saturação e as sensibilidades, que rondaram os $0.2\%Oe^{-1}$ para a configuração com J perpendicular a H. Estudou-se a histerese na configuração com J paralelo a H. Determinou-se H_{off} causado por um ímã externo a várias distâncias do sistema, comparando o andamento com a distância deste com a lei teórica que descreve um campo magnético criado por um ímã retangular (lei arcotangente). Obteve-se o Ku do filme usado, $Ku = 3076 \pm 187 \pm 78 erg cm^{-3}$, através do conjunto de dados obtidos de todas as secções de AMR, fazendo-se uma análise estatística destes. Estudou-se também o efeito GMR a partir de duas válvulas de spin SV1 e SV2, tendo-se analisado comportamento de $MR(H)$ de ambas para diferentes gamas de H. Calculou-se MR_{max} para as duas amostras, obtendo-se $MR_{max} = 7.284 \pm 0.024\%$ para SV1 e $MR_{max} = 4.214 \pm 0.012\%$ para SV2. Determinaram-se as sensibilidades onde SV1 se revelou mais vantajoso com $S \approx 0.8\%Oe^{-1}$, enquanto que para SV2, $S \approx 0.2\%Oe^{-1}$. Efectuou-se o estudo de sensores magnetoresistivos micrométricos de duas amostras microfabricadas MicroSV3 e MicroSV4, concluindo-se que o sensor com melhor performance era o SV3-2, associado a uma maior gama de campos magnéticos com comportamento linear da curva $MR(H)$. Calcularam-se as sensibilidades dos sensores, tendo-se obtido um perfil crescente com h_{sensor} .

1 Introdução Teórica

O efeito **AMR (magnetoresistência anisotrópica)** é uma propriedade de materiais ferromagnéticos caracterizada pela dependência da resistência eléctrica com o ângulo θ entre a direcção da corrente eléctrica aplicada J e a direcção da magnetização M do material. Neste laboratório usaram-se filmes com uma direcção de magnetização preferencial, definida aquando da sua criação, e caracterizada pela constante de anisotropia induzida, Ku. Aplicar um campo magnético, H, perpendicularmente a Ku, conduz a uma rotação de M, pois este vai assumir o sentido forçado por H, tendo sempre tendência para regressar à sua direcção preferencial. Neste laboratório foram sempre consideradas situações em que J e Ku têm direcções paralelas, contudo estudou-se o caso em que J (e Ku) é perpendicular a H aplicado, e J (e Ku) é paralelo a H aplicado. No último caso referido não há rotação de M, não havendo então grandes alterações na resistência, pois θ apenas assume os valores 0° e 180° , correspondente a uma mudança de sentido de M. No caso em que há rotação de M, temos uma variação de θ e $R(\theta) = R_\perp + (R_\parallel - R_\perp)\cos^2(\theta)$, sendo R_\perp , R quando $M \perp J$ e R_\parallel , R quando $M \parallel J$.

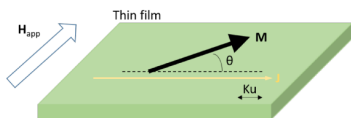


Figura 1: Efeito de Rotação de M

Este efeito decorre do acoplamento spin-órbita e da ação da magnetização imposta pelo campo magnético externo, mais especificamente da interacção entre os electrões da banda de condução com os do filme (banda d). Estes últimos possuem uma secção recta de *scattering* anisotrópica, devido à quebra de simetria imposta pelo campo magnético externo, motivo pelo qual a probabilidade da colisão destes electrões é maior quando a direcção de magnetização se encontra alinhada com a corrente, o que se traduz num máximo da resistência observada - há mais colisões. Pelo contrário, quando M é paralelo a J a resistência é mínima. A seguinte figura ilustra isso.

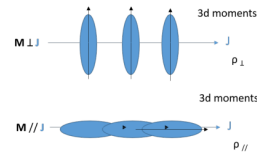


Figura 2: Posicionamento relativo das Orbitais d, M e J

Ora, para cada θ o sistema vai minimizar a sua energia magnética, $E_{total}/V = M_{sat} \cdot H \cdot \sin(\theta) + Ku \cdot \cos^2(\theta)$, obtendo-se a condição minimizante $\sin(\theta) = \frac{M_{sat} \cdot H}{2Ku}$, sendo possível obter uma expressão para R (equação 1), com base nos parâmetros do filme, substituindo o valor minimizante na expressão de R inicial, sendo esta abordagem válida quando J é paralelo a Ku, não estamos perante um processo

histerético e $\frac{M_{sat} \cdot H}{2Ku} < 1$.

$$R(H) = R(0) - \Delta R \left(\frac{M_{sat} \cdot H}{2Ku} \right)^2 \quad (1)$$

De forma a poder comparar o ganho de resistência entre diversas estruturas, define-se a magnetoresistência - resistência normalizada à resistência mínima:

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

sendo o seu valor máximo:

$$MR_{max} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \quad (3)$$

Uma propriedade muito importante para a caracterização de um sensor é a sua sensibilidade, que se pode calcular através de:

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

A quantidade acima é importante pois indica a quanto corresponde (em resistência) uma pequena variação no campo magnético. O ideal é ser o maior possível, pois matematicamente, uma derivada $\frac{dR}{dH}$ alta implica uma derivada $\frac{dH}{dR}$ baixa - maior precisão na medida de H.

Estudou-se ainda a resposta do efeito AMR ao efeito de um ímã externo, que se verificou ser um deslocamento da curva de $R(H)$ de um valor H_{off} , nas abcissas. Através do H_{off} podemos tentar estimar o campo magnético criado pelo ímã em função da distância deste, x , ao nosso aparato experimental e comparar com a lei teórica, retirada de [3], dada por:

$$H(x) = \frac{Hr}{\pi} \cdot \left[\arctan \left(\frac{l \cdot w}{2x\sqrt{4x^2 + l^2 + w^2}} \right) - \arctan \left(\frac{l \cdot w}{2(t+x)\sqrt{4(t+x)^2 + l^2 + w^2}} \right) \right] \quad (5)$$

onde l é o comprimento, w a largura e t a grossura do ímã.

Várias das configurações estudadas resultaram em fenómenos histeréticos, em que o comportamento de R dependia do caminho que se percorria em H . Define-se \rightarrow como o caminho de - para + (azul) e \leftarrow como o caminho de + para - (vermelho).

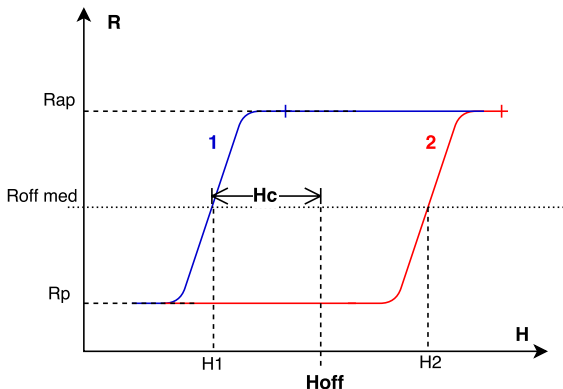


Figura 3: Esquema representativo de H_c e H_{off} numa histerese

O H_{sat} é definido como o H para o qual a Resistência satura. H_c e H_{off} encontram-se definidos na figura 3. H_{off} é zero num bom sensor AMR (excepto quando temos um ímã externo ao sistema, como já referido.)

Outro efeito estudado foi a **Magnetoresistência Gigante (GMR)**, que consiste na alteração significativa da resistência eléctrica de estruturas de multicamadas de filmes-finos, compostas por camadas alternadas de materiais ferromagnéticos e condutores não magnéticos, em função da orientação das camadas ferromagnéticas (FM) consecutivas. Este efeito ocorre devido ao *scattering* assimétrico dos electrões dependente da orientação referida que resulta em resistências diferentes. O máximo de resistência é alcançado quando as camadas FM consecutivas possuem magnetizações antiparalelas e mínimo se estas forem paralelas.

O sistema de válvula de spin (SV) é constituído precisamente por duas camadas FM separadas por um espaçador metálico não magnético. Uma das camadas FM é utilizada como referência para a medição - camada PL - pois o seu sentido de magnetização está fixo por efeito de polarização de troca na interface que ocorre devido à presença de uma camada antiferromagnética consecutiva. Já a outra camada FM possui uma magnetização associada que se orienta segundo campos magnéticos pouco intensos - camada FL. Com a variação da orientação da magnetização da camada FL (M_{fl}), varia-se também a resistência na SV. Designando por R_p e R_{ap} , respectivamente, as resistências para as quais as magnetizações das camadas FM estão paralelas e antiparalelas, podemos utilizar as equações (2) e (3), substituindo R_{min} por R_p e R_{max} por R_{ap} .

No contexto da GMR, existe a possibilidade de se efectuar a microfabricação das válvulas de spin em formas rectangulares tais que $L \gg h_{sensor} \gg t$, com L e h_{sensor} o comprimento e a largura do filme e t a sua espessura, de forma a obter **sensores magnetoresistivos micrométricos**. Nestes casos, na equação da energia total do sistema torna-se relevante um novo termo dependente de N_d , que é um factor de forma designado tipicamente por termo desmagnetizante e dado pela equação 6.

$$N_d = 4\pi \frac{t}{h_{sensor}} \quad (6)$$

Para além deste termo, surge também um outro proporcional a H_{off} que corresponde a um campo de *offset* que depende da rugosidade correlacionada das interfaces entre o espaçador metálico e as camadas ferromagnéticas.

A minimização da energia com base nestes dois termos adicionais e ainda nos termos dependentes de Ku e H_{app} , numa configuração como a da figura 4 (H_{app} perpendicular ao eixo mais longo), permite obter a forma da curva $\cos[\theta](H_{app})$, proporcional à curva $MR(H)$. θ encontra-se redefinido na figura 4.

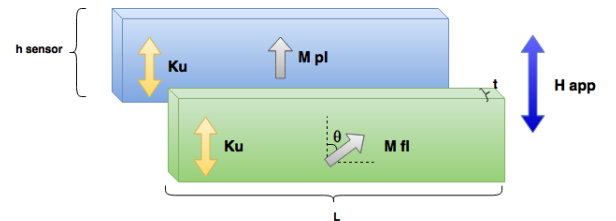


Figura 4: Definição dos parâmetros a utilizar. **A azul:** Camada fixa; **A verde:** Camada livre

Se $H_k - N_d M_{sat} > 0$, em que $H_k = \frac{2Ku}{M_{sat}}$, e M_{sat} corresponde à magnetização de saturação, obtém-se a curva de histerese representada na figura 5 à esquerda, com o declive e os campos de saturação H_{sat} .

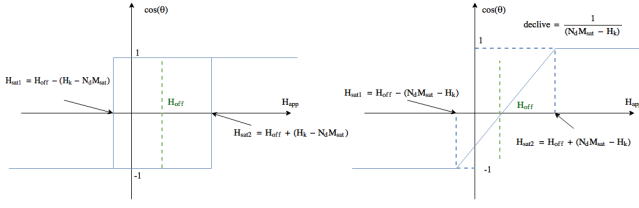


Figura 5: Curvas teóricas esperadas

Caso $H_k - N_d M_{sat} < 0$ - situação que ocorre para N_d maior, e portanto, para h_{sensor} menor - obtém-se a curva linear representada na figura 5 à direita. O declive desta curva é proporcional ao declive da curva MR(H) que é, por sua vez, a sensibilidade do sensor, equação (4).

2 Esquema da montagem

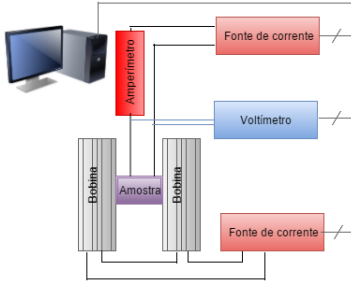


Figura 6: Esquema da montagem experimental

Utilizou-se a seguinte lista de equipamento:

- Fonte de Tensão DC hp - 6177C ;
- Fonte de Corrente Kepco Bipolar Operational Power Supply/Amplifier
- Multímetro Agilent 34401A;
- Caixas de Acrílico com contactos em cruz e em paralelo;
- Chave de Fendas e Pinças;
- Magnete com 1T à superfície;
- Bobines de Helmholtz Electro-Metrics;
- PC com software de Aquisição;

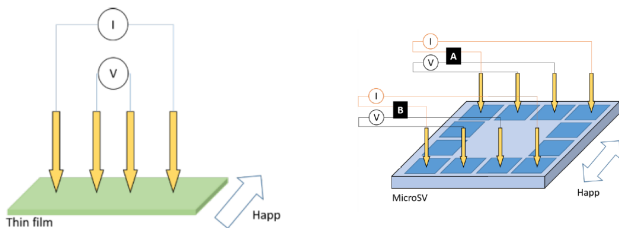


Figura 7: Ligações na amostra. **Dir.:** para os filmes finos utilizados na AMR e GMR; **Esq.:** para os sensores micrométricos

As ligações efectuadas encontram-se na figura 6. Os contactos elétricos na amostra (figura 7) encontravam-se dispostos de forma que a tensão fosse medida no par de contactos interior para assegurar que esta medição era efectuada numa região em que as linhas de campo eram paralelas.

Para os sensores magnetoresistivos micrométricos, haviam 4 sensores por amostra, sendo possível efectuar ligações a cada um deles através dos contactos representados na figura 7 à direita.

Efectuaram-se medições nas seguintes amostras:

- Filme fino de $Ni_{80}Fe_{20}$, de 100nm de espessura;
- Válvulas de spin SV1 e SV2, respetivamente sem e com camada de referência fixa, sendo a primeira camada FM composta por uma camada de $Ni_{80}Fe_{20}$ e $Co_{80}Fe_{20}$ e a segunda camada composta por $Co_{80}Fe_{20}$. A amostra SV2 inclui uma camada antiferromagnética de $Mn_{70}Ir_{30}$;
- Amostras MicroSV3 e MicroSV4, cada uma delas com 4 válvulas de spin com diferentes dimensões e com estrutura igual à de SV2.

3 Resultados e Discussão

3.1 Magnetoresistência Anisotrópica - AMR

3.1.1 Resistência na Ausência de Campo Magnético

Inicialmente determinou-se a resistência do filme usado, sem este estar sob o efeito do campo magnético criado pelas bobines. Para isso, registou-se a tensão para valores de corrente no intervalo de -10mA a 10mA, com um passo de 2 mA. Fez-se um ajuste linear, obtendo-se o seguinte gráfico:

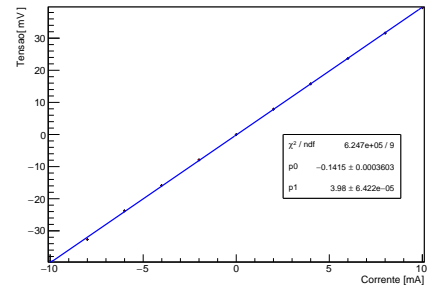


Figura 8: Característica Tensão-Corrente

Sendo os parâmetros obtidos:

Resistência(Ω)	Tensão($I = 0$)(mV)	χ^2/ν
3.98010 ± 0.00006	-0.1415 ± 0.0004	69411.1

Tabela 1: Parâmetros do Ajuste

Notou-se um elevado χ^2/ν , devido a erros muito baixos para a tensão e corrente.

3.1.2 Resistência sob o Efeito do Campo Magnético - Posição A

De seguida analisou-se o efeito do campo magnético na variação da resistência $R(H)$, para as duas posições possíveis do filme, A e B. As posições relativas dos vetores envolvidos - Magnetização (M), Densidade de Corrente (J), Campo aplicado (H) e Magnetização Prefencial (K_u) na posição A estão esquematizadas da figura seguinte:

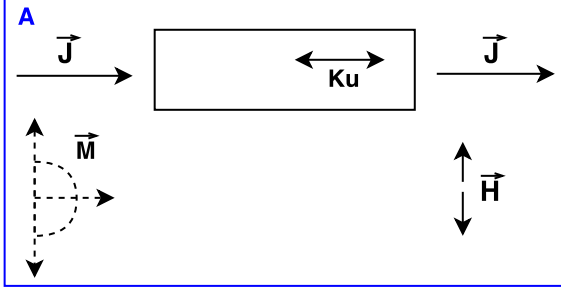


Figura 9: Posições relativas Posição A

Para a posição A, fixou-se a corrente no filme em $i_A = 1.0002 \pm 0.0001 \text{ mA}$ e obteve-se a curva $V(H)$ através do software. Decidiu-se estudar os dados adquiridos para cada caminho de forma independente, em todo o trabalho, de forma a detetar possíveis comportamentos histeréticos não visíveis a olho nu. Através de $V(H)$ e i , obteve-se $R(H)$ e extraiu-se os seguintes valores:

Caminho	$R_{min}(\Omega)$	$R_{max}(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$
\rightarrow	3.8702 ± 0.0014	3.9590 ± 0.0014	0.08898 ± 0.00278
\leftarrow	3.8692 ± 0.0014	3.9572 ± 0.0014	0.08798 ± 0.00278
Média	3.8697 ± 0.0011	3.9582 ± 0.0011	0.08848 ± 0.000278

Tabela 2: Valores de R para os caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

De seguida obteve-se $MR(H)$ (figura 10) através da eq. (2) e extraiu-se a sensibilidade nas duas zonas lineares, fazendo 4 ajustes lineares (1 para cada combinação zona linear/caminho de varrimento). Fizeram-se ajustes lineares pois segundo a eq. (4) a sensibilidade corresponde à derivada $\frac{dMR(H)}{dH}$, que é o declive da reta. Apresenta-se um desses ajustes a título representativo

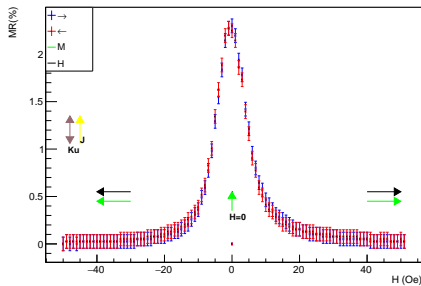


Figura 10: Gráfico MR na posição A

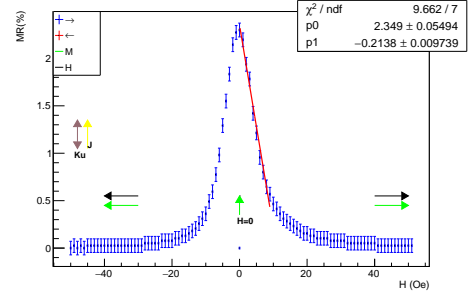


Figura 11: Ajuste zona linear direita, caminho \rightarrow (-50 Oe a 50 Oe)

Estando todos os parâmetros obtidos na tabela seguinte:

Zona (Oe)	Caminho	$H_{sat}(Oe)$	Sensibilidade ($\%Oe^{-1}$)	χ^2/ν
-	\rightarrow	-12 ± 1	0.2413 ± 0.0098	1.076
	\leftarrow	-13 ± 0.5	0.2419 ± 0.0099	1.176
	Média	-12.5 ± 0.75	0.2416 ± 0.0099	-
+	\rightarrow	14 ± 0.5	-0.2138 ± 0.0097	1.380
	\leftarrow	15 ± 1	-0.2121 ± 0.0097	1.241
	Média	14.5 ± 0.75	-0.2130 ± 0.0097	-

Tabela 3: Valores da sensibilidade organizados pelas duas zonas lineares(- : [-9,0] e + : [0,9] e pelos caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

Nota-se uma certa discrepância entre as sensibilidades dos 2 caminhos, revelando uma pequena histerese. Para H_{sat} também notamos uma certa discrepância entre caminhos, sendo notório que a curva não é simétrica em relação aos pontos em que satura pois em módulo os H_{sat} de cada zona são muito díspares. O erro superior de alguns H_{sat} provém de uma certa oscilação em torno de um valor que se tomou como mínimo.

Fazendo um ajuste da curva $R(H)$ à eq. (1) foi possível obter a constante de anisotropia induzida K_u do filme. Este ajuste foi feito considerando apenas a zona em que a curva apresenta um comportamento quadrático, deixando-se um parâmetro livre a que deve corresponder a $R(0)$, e outro parâmetro b que corresponde a $\frac{\Delta R}{K_u}$, tendo-se tomado $(\frac{M_{sat}}{2})^2 = 193600 \text{ emu}^2 \text{ cm}^{-6}$. Para a consideração da região a ajustar (região quadrática) teve-se em conta a restrição $\frac{M_{sat}}{2K_u}$. De seguida apresenta-se um dos 2 ajustes feitos (fez-se um para cada caminho):

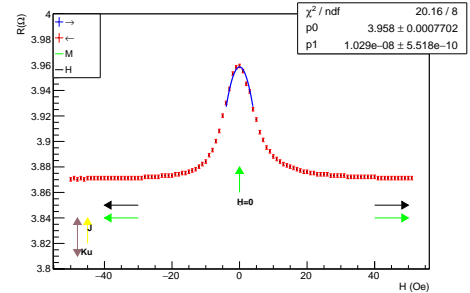


Figura 12: Ajuste Quadrático para obter K_u , caminho \leftarrow (50 Oe a -50 Oe)

Tendo-se obtido:

Caminho	$Ku(\text{erg cm}^{-3})$	χ^2/ν	$MR_{max}(\%)$
\rightarrow	3016 ± 130	7.12	2.299 ± 0.073
\leftarrow	2924 ± 125	2.52	2.274 ± 0.073
<i>Média</i>	2970 ± 127	-	2.287 ± 0.073

Tabela 4: Valores da sensibilidade e de Ku organizados pelos caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

Os χ^2/ν deram muito acima do expectável e tal pode ser explicado pela assimetria da curva visível nos H_{sat} e nas sensibilidades díspares para cada zona (+ e -), revelando que para H positivo há uma maior coercividade. MR_{max} está dentro do expectável para um sensor AMR, entre 2% e 2.5%.

3.1.3 Resistência sob o Efeito do Campo Magnético - Posição B

Na posição B, as posições relativas dos vetores relevantes foram as seguintes:

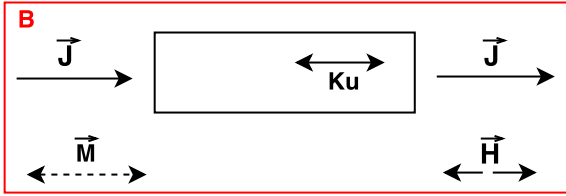


Figura 13: Posições relativas Posição B

Aplicando o mesmo processo que anteriormente, obteve-se a curva MR(H):

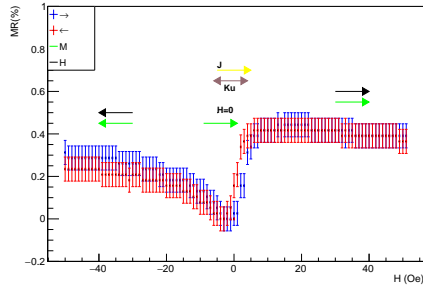


Figura 14: Gráfico MR na posição B

Nota-se um processo histerético, impossibilitando à cabeça a possibilidade de utilizar esta configuração como sensor. Da curva anterior e da curva de R(H) extraíram-se os seguintes valores:

Caminho	$R_{min}(\Omega)$	$R_{max}(\Omega)$	$\Delta R(\Omega)$	$MR_{max}(\%)$
\rightarrow	3.8232 ± 0.0021	3.8402 ± 0.0021	0.0169 ± 0.0043	0.4431 ± 0.0568
\leftarrow	3.8242 ± 0.0021	3.8402 ± 0.0021	0.0159 ± 0.0043	0.4169 ± 0.0567
<i>Média</i>	3.8237 ± 0.0021	3.8402 ± 0.0021	0.0164 ± 0.0043	0.4300 ± 0.0568

Tabela 5: Valores de R e MR_{max} para os caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

onde se notou o baixo valor de MR_{max} comparando com a configuração anterior. Também se extraiu os H_{sat} :

Zona (Oe)	Caminho	$H_{Sat}(Oe)$
-	\rightarrow	-1 ± 0.5
	\leftarrow	0 ± 0.5
	<i>Média</i>	-0.5 ± 0.5
+	\rightarrow	6 ± 0.5
	\leftarrow	6 ± 1
	<i>Média</i>	6 ± 0.75

Tabela 6: Valores de H_{sat} organizados pelos caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

onde se notou um comportamento mais simétrico na saturação que o anterior.

Não faz sentido analisar a sensibilidade das zonas lineares, pois esta configuração, ao estar associada a um comportamento dependente do caminho, histerético, fica inutilizada como sensor. Também devido a isso não é válido ajustar a eq. (1) à zona quadrática (perto dos mínimos) da distribuição pois R já não possuiu uma distribuição angular como referido anteriormente. Contudo, analisou-se pormenorizadamente a histerese presente nesta configuração.

Para isso realizou-se uma análise de R(H) de -10 a 10 Oe (descrita no *logbook*). De seguida foram feitos ajustes lineares da forma $R_i = aH_i + b$ aos dois varrimentos os quais foram utilizados para retirar os valores de H_c e H_{off} .

De seguida apresentam-se os ajustes realizados e os resultados obtidos:

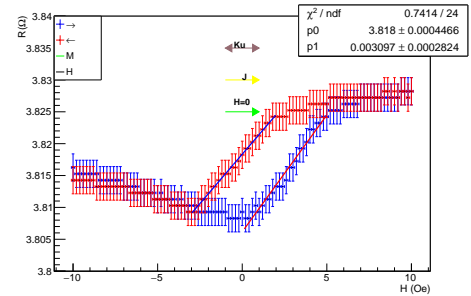


Figura 15: Ajuste zonas lineares da Histerese

Nota: A tabela de fit no gráfico corresponde aos pontos vermelhos (reta azul).

Caminho	$R_{min}(\Omega)$	$R_{max}(\Omega)$	$Sensibilidade(\%Oe^{-1})$	$H_{Off} (Oe)$	$H_c (Oe)$
\rightarrow	3.8089 ± 0.0021	3.8282 ± 0.0021	0.0962 ± 0.0235	1.7073 ± 1.2445	1.6566 ± 1.2445
\leftarrow	3.8093 ± 0.0021	3.8282 ± 0.0021	0.0812 ± 0.0118		
<i>Média</i>	3.8088 ± 0.0021	3.8282 ± 0.0021	0.0887 ± 0.0176		

Tabela 7: Valores de R, sensibilidades, H_{off} e H_c para os caminhos de -50 Oe a 50 Oe (\rightarrow) e de de 50 Oe a -50 Oe (\leftarrow)

Concluiu-se que o valor de R_{min} anterior foi sobre-estimado, pois ao fazer-se uma aquisição com um passo mais fino, obteve-se um valor inferior. As sensibilidades são mostradas por uma questão de completude, sendo esta configuração obsoleta para uso como sensor como já referido. H_{off} e H_c não apresentaram valores muito elevados. Dado

se ter determinado um novo valor para R_{min} , recalculou-se MR_{Max} para esta configuração:

Caminho	$MR_{max}(\%)$
→	0.8373 ± 0.0571
←	0.8109 ± 0.0571
Média	0.8241 ± 0.0571

Tabela 8: Valores corrigidos de MR_{max}

3.1.4 Efeito de um Campo Magnético Externo na Resistência sob o Efeito do Campo Magnético

Pretendeu-se obter o campo magnético do magnete externo, assim como explicar o seu efeito na curva $R(H)$ já conhecida. Realizaram-se várias medições, a 4 distâncias diferentes, para ambas as faces do magnete. Tomou-se a saída da bobine como $d=0\text{cm}$ e para cada distância selecionou-se aleatoriamente um dos caminhos para análise. (No *logbook* estão especificados quais os selecionados). Obteve-se o seguinte gráfico:

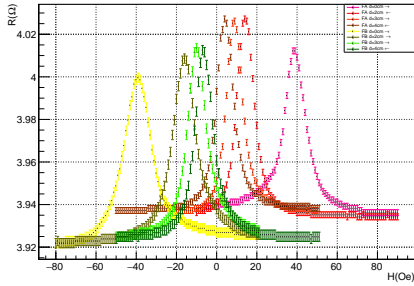


Figura 16: Gráfico de Curvas $R(H)$ sob o efeito de um magnete externo para $d=0,2,3,4\text{ cm}$

A diferença em R nas curvas para a face A e face B pode ser explicada por uma mudança da corrente i usada (um problema motivou ter-se de desligar tudo e voltar a ligar). De notar que para $d=4\text{cm}$ temos uma gama linear aproximadamente centrada. Notou-se que o efeito do magnete externo é criar um H_{off} , que é maior quanto menor for a distância ao filme. Determinar H_{off} para várias distâncias permitiu-nos comparar a distribuição com a distância obtida, com a lei teórica (5), isto assumindo que H_{off} era o campo criado pelo magnete à distância d , ou pelo menos proporcional a este. A forma para determinar H_{off} que se julgou mais precisa foi realizar um ajuste como na secção anterior, em que se determinou Ku , adicionando um parâmetro de offset à equação (1):

$$R(H) = R(0) - \Delta R \left(\frac{M_{sat} \cdot (H - H_{off})}{2Ku} \right)^2 \quad (7)$$

Destes ajustes semelhantes ao da fig. (12), apresenta-se os obtidos para duas das 4 distâncias:

Face	$Ku(\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3})$	$H_{off}(\text{Oe})$	χ^2/ν
A	3385 ± 159	38.7580 ± 0.0736	0.9511
B	4290 ± 381	-39.0557 ± 0.1667	0.1354

Tabela 9: Valores de Ku e H_{off} para $d=0\text{ cm}$

Face	$Ku(\text{erg} \cdot \text{cm}^{-3})$	$H_{off}(\text{Oe})$	χ^2/ν
A	2936 ± 184	4.0717 ± 0.1113	0.7883
B	3002 ± 186	-6.3141 ± 0.0876	0.7077

Tabela 10: Valores de Ku e H_{off} para $d=4\text{cm}$

De seguida, analisou-se para cada face a distribuição de H_{off} em distância. Por análise do plot notou-se que de $d=0\text{cm}$ até sensivelmente $d \sim 2\text{ cm}$ parece haver um decréscimo exponencial de H_{off} , sendo que a seguir estabiliza. Este comportamento assemelha-se, grossomodo, ao comportamento da função arcotangente. Como tal ajustou-se o plot a uma lei baseada na eq. (5): $a \cdot \arctan(\frac{1}{x}) + b$. O obtido para a Face B foi:

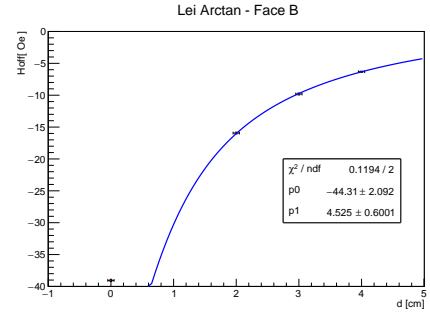


Figura 17: Teste à lei Arctan para a Face B

Onde se confirmou o verificado ao observar o plot - O decréscimo inicial parece ter uma derivada superior à de uma arcotangente, sendo provavelmente exponencial, mas para distâncias superiores a 2cm estamos claramente perante uma lei como a da eq. (5).

3.1.5 Análise Estatística da Distribuição de Ku obtida no Conjunto de todas as Secções

Dado que como produto indireto da análise anterior obtivemos 8 valores de Ku , em conjunto com outros 2 da análise anterior, considerou-se que esta amostra já era suficiente para fazer uma análise estatística. Criou-se um histograma com todos os Ku e analisar a sua distribuição, calculando o centróide da distribuição e o seu erro:

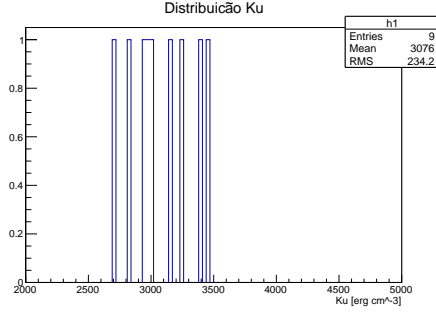


Figura 18: Distribuição Ku obtidos

Um dos valores de Ku era superior a $4000 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3}$ e como tal foi excluído pois estava claramente fora da distribuição. O erro do centróide da distribuição é dado por $\frac{RMS}{\sqrt{9}}$, pois temos 9 valores. Sendo assim, obteve-se um valor de Ku final:

$$Ku = 3076 \pm 187 \pm 78 \text{ (erg} \cdot \text{cm}^{-3}\text{)}$$

sendo o último erro, o erro estatístico.

3.2 Magnetoresistência Gigante - GMR

Nesta parte do trabalho estudou-se o efeito de magnetoresistência gigante (GMR) em válvulas de spin.

As válvulas de spin utilizadas nesta secção consistiram em multicamadas de filmes finos compostas por duas camadas de materiais ferromagnéticos separadas por uma camada de um material condutor não magnético.

Foram estudadas duas válvulas de spin diferentes :

SV1 - válvula sem camada de referência fixa- as suas duas camadas magnéticas não possuíam uma direcção de magnetização fixa, possuindo apenas uma direcção preferencial de magnetização segundo a direcção da sua própria anisotropia intrínseca (Ku). Uma destas camadas era mais coerciva (maior Ku), i.e., foram precisos valores superiores de H para alterar a direcção de \vec{M} .

SV2- válvula com camada de referência fixa - A adição de uma camada antiferromagnética adjacente a uma das camadas ferromagnéticas causa a fixação do sentido de magnetização desta (por efeito de polarização de troca na interface). Desta forma, obtém-se uma camada ferromagnética livre (Fl), e uma camada fixa (Pl).

3.2.1 Resistência na ausência de campo magnético

Primeiramente determinou-se a resistência das duas amostras tal como foi feito para AMR.

Mais uma vez efectuou-se um ajuste linear à tensão em função da corrente, de forma a obter resistência:

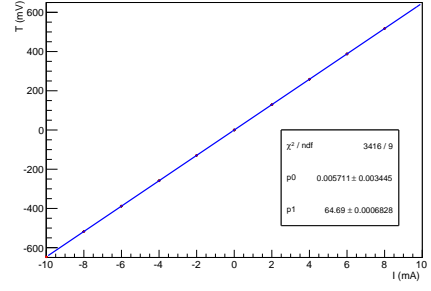


Figura 19: Característica Tensão-Corrente da amostra SV1

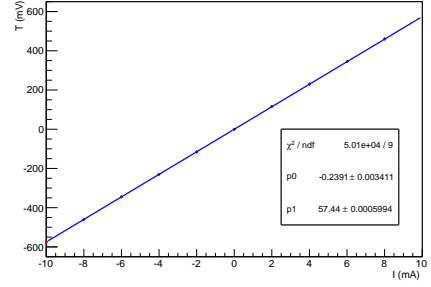


Figura 20: Característica Tensão-Corrente da amostra SV2

Foram obtidos os parâmetros presentes na tabela 11.

Amostra	Resistência(Ω)	Tensão ($I = 0 \text{ mA}$) (mV)	χ^2/ν
SV1	64.6858 ± 0.0006	$(5.71 \pm 3.44) \times 10^{-3}$	379.56
SV2	57.4427 ± 0.0006	-0.239 ± 0.003	5566.67

Tabela 11: Parâmetros do ajuste V(I) feito às duas amostras

Observou-se que os dois χ^2 eram bastante elevados; Isto acontece dado que os erros tanto da tensão como da corrente eram muito pequenos ($\epsilon_I \approx 10^{-7} \text{ A}$; $\epsilon_T \approx 10^{-5} \text{ V}$).

3.2.2 Variação da Resistência com o Campo magnético

Variou-se, de seguida, o valor de \vec{H} entre $[-40, 40] \text{ Oe}$ e $[-400, 400] \text{ Oe}$ obtendo-se as relações V(H) para as duas amostras. Tal como em AMR, utilizaram-se os valores de tensão para obter os valores de magnetoresistência, recorrendo à expressão 2.

Na figura 21 encontram-se esquematizadas as posições relativas de \vec{H} , \vec{M} , Ku e \vec{J} para as duas amostras durante estas aquisições. Para SV1 (a vermelho) apresenta-se a direcção preferencial das magnetizações das duas camadas, tendo em conta que uma destas é mais coerciva; Para SV2 (a azul) , dá-se o caso em que uma das camadas possui magnetização fixa (*pinned-layer*) enquanto que a outra é livre (*free-layer*) orientando-se apenas preferencialmente segundo a direcção de Ku.

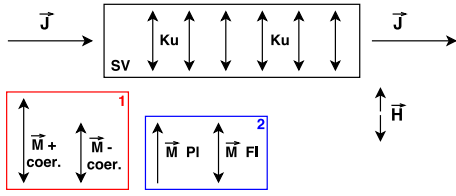


Figura 21: Esquema das orientações relativas do campo magnético, anisotropia, corrente eléctrica e magnetização para SV1 e SV2. As amostras estiveram sempre na posição A.

Apresentam-se então os gráficos correspondentes às diferentes curvas MR(H) obtidas:

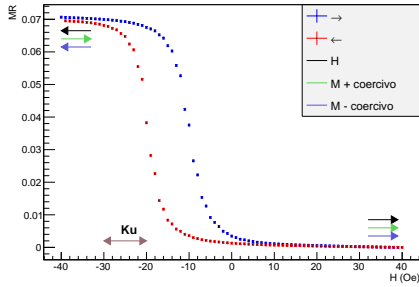


Figura 22: Curva MR(H) da amostra SV1 - $H \in [-40,40]$ Oe

Analisando a figura 22 da direita para a esquerda, quando o campo magnético assume valores positivos, a magnetoresistência é nula, isto é, o campo magnético encontra-se alinhado com as magnetizações das duas placas, sendo a tensão gerada entre elas mínima. Após a passagem pelo zero, o campo \vec{H} , agora negativo, provoca a quase-imediata inversão do sentido de magnetização da placa menos coerciva. A diferença de sentido de magnetização nas duas placas gera um rápido e acentuado aumento da tensão, que se traduz num aumento de MR. Quando a inversão de $\vec{M}_{-coer.}$ é completa, atinge-se a zona de saturação (onde o aumento do campo não altera MR).

O percurso de volta corresponde ao mesmo processo, observando-se no entanto uma histerese causada pela resistência de $\vec{M}_{-coer.}$ à variação da sua direcção (coercividade ligeira), uma vez magnetizada segundo o seu sentido preferencial.

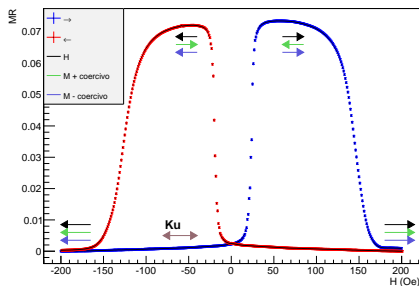


Figura 23: Curva MR(H) da amostra SV1 - $H \in [-200,200]$ Oe

No gráfico da figura 23, o campo assume valores mais elevados que na figura 22 - elevados o suficiente para, a

partir de certo ponto ($\vec{H} \approx 100\text{Oe}$), fazer rodar o sentido de $\vec{M}_{+coer.}$, diminuindo assim o ângulo entre este e $\vec{M}_{-coer.}$. Isto provoca a consequente diminuição de MR, até que as duas magnetizações se alinham com o campo e MR se anula.

O percurso inverso corresponde ao mesmo comportamento, não surgindo neste caso uma histerese. Isto acontece pois a magnetização da placa mais coerciva é totalmente invertida, recomeçando-se no sentido inverso do mesmo 'ponto inicial'. Esta situação é responsável pela simetria em relação a $\vec{H} = 0$ observada em 23.

Para a amostra SV2 não havia saturação de MR para os limites $H \in [-40,40]$ Oe pelo que se fez uma nova aquisição alargando os limites a $[-100,100]$ Oe:

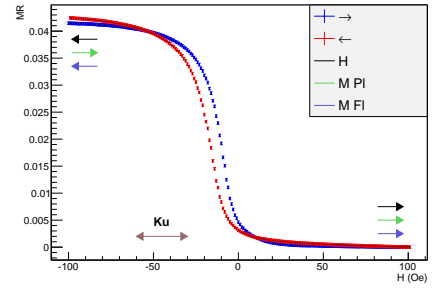


Figura 24: Curva MR(H) da amostra SV2 - $H \in [-100,100]$ Oe

Nesta imagem verificou-se a mesma situação que na figura 22, actuando as camadas com magnetização fixa e livre da mesma forma que as camadas mais e menos coerciva actuavam, respectivamente, em SV1. As diferenças observadas foram apenas ao nível das grandezas calculadas presentes na tabela 12.

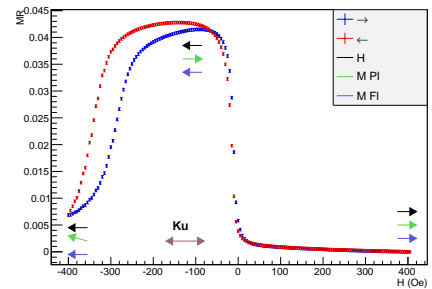


Figura 25: Curva MR(H) da amostra SV2 - $H \in [-400,400]$ Oe

A diferença entre SV1 e SV2 é clara na figura 25. Tal como em 23 a partir de um determinado valor elevado do campo, $\vec{H} \approx 230\text{Oe}$, \vec{M}_{PI} começa a alterar o seu sentido de acordo com este. Ao contrário de SV1, para o valor máximo de \vec{H} imposto ($H \approx 400\text{Oe}$) \vec{M}_{PI} não chega sequer a alinhar-se completamente com \vec{M}_{FI} .

Como o sentido da magnetização da PL está "fixo", mal o campo volta a diminuir (caminho no sentido contrário), a magnetização começa imediatamente a voltar para o sentido que lhe é imposto, não se repetindo a situação de simetria da figura 23.

Neste regresso verifica-se também o surgimento de uma histerese dado que ao progredir para a esquerda, o campo

tem de ser forte o suficiente para ultrapassar a resistência de \vec{M}_{Pl} a trocar o seu sentido, enquanto que no sentido contrário o campo está a diminuir permitindo o regresso tendencial de \vec{M}_{Pl} à sua configuração preferencial, sendo o \vec{H} de quebra do patamar mais pequeno.

Retiram-se então duas conclusões; Primeiro, o campo necessário para começar a alterar o sentido de \vec{M}_{Pl} é muito superior ao necessário para alterar $\vec{M}_{+coer.}$, o que resulta num "patamar" de saturação de MR (MR_{max}) mais largo para SV2 do que para SV1; Segundo, se continuássemos a aplicar campo para valores ainda maiores, MR iria estabilizar a zero mais uma vez (alinhamento entre \vec{M}_{Pl} e \vec{M}_{Fl}).

A partir dos dados já representados foram calculados a resistência mínima, R_p , a resistência máxima, R_{ap} , e a magnetoresistência máxima para cada um dos varrimentos.

Foram também calculados para SV1 e SV2 os campos de offset, H_{off} , e coercivo, H_c .

Os resultados obtidos para estas grandezas encontram-se na tabela seguinte:

Estrutura	SV1	SV2
Rp (Ω)	65.1090 ± 0.0074	61.0075 ± 0.0071
Rap (Ω)	69.8514 ± 0.0079	63.5781 ± 0.0073
MRmáx(%)	7.284 ± 0.024	4.214 ± 0.012
Hc (Oe)	4.848 ± 5.406	3.288 ± 2.304
Hoff (Oe)	-14.648 ± 5.406	-14.463 ± 2.304

Tabela 12: Média dos parâmetros característicos das curvas MR(H) de SV1 e SV2

Pode retirar-se que SV1 apresenta um valor de $MR_{max} \approx 7.3$ % mais favorável que o de SV2 (≈ 4.2 %).

Resta então cálculo das sensibilidades que foi feito partir da expressão 4, recorrendo a ajustes lineares feitos às zonas aproximadamente lineares dos gráficos MR(H).

Estrutura	Sentido	Região Linear (Oe)	S (% Oe^{-1})	S_{med} (% Oe^{-1})
SV1	→	[-7 ; -12]	-0.747 ± 0.176	-0.813 ± 0.296
	←	[-17 ; -22]	-0.879 ± 0.417	
SV2	→	[-6 ; -14]	-0.196 ± 0.028	-0.186 ± 0.032
	←	[-11 ; -21]	-0.176 ± 0.037	

Tabela 13: Sensibilidade - Amostras SV1 e SV2

A válvula de spin SV1 apresentou, mais uma vez, valores mais favoráveis à sua utilização como sensor em relação a SV2. Este último possui uma sensibilidade de ≈ 0.2 % Oe^{-1} , valor semelhante ao obtido para AMR, enquanto que SV1 possui uma sensibilidade superior ≈ 0.8 % Oe^{-1} .

4 Sensores Magneto-resistivos Micrométricos

Estudou-se na sequência desta nova fase da experiência o impacto das dimensões físicas de sensores de válvula de spin na característica MR(H).

Para isso, estudaram-se duas novas amostras microfabricadas - MicroSV3 e MicroSV4, com uma estrutura de multicamadas padronizada igual à de SV2.

Cada amostra encontrava-se dividida em 4 estruturas, sendo que foram medidas em diferentes configurações de

H/J(corrente)/Ku. Estas configurações encontram-se representadas no mapa da figura 27.

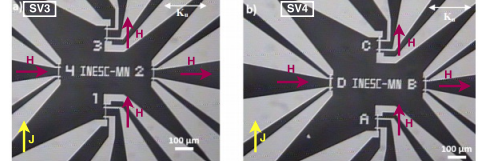


Figura 27: Esquema das posições relativas de \vec{J} , \vec{H} e Ku para as 4 estruturas

Para todas as estruturas, efectuaram-se medições com H nos intervalos [-50,50]Oe e [-400,400]Oe, respectivamente com passos de 1 Oe e 5 Oe.

Uma análise prévia permitiu prever que as configurações favoráveis a um sensor com as características desejáveis correspondiam a ter H perpendicular à direcção do eixo mais longo do sensor - paralelo a Ku e perpendicular a J. É nestas configurações que é possível uma variação contínua na direcção de M_{fl} como demonstrado na figura 4, e portanto, também uma transição contínua entre os valores mínimo e máximo de MR. Estas configurações correspondem a SV3-2, SV3-4, SV4-B e SV4-D - figuras de 26a a 26h.

Nas figuras referidas representaram-se também os sentidos e direcções das magnetizações das camadas fixa (M_{pl}) e livre (M_{fl}) relativamente ao campo magnético aplicado (H).

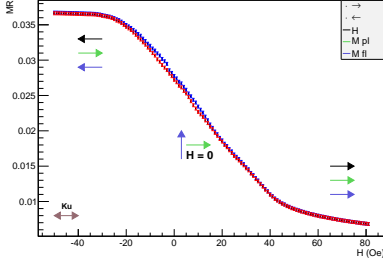
Repare-se que a região das curvas em questão relevante para a construção de sensores é a linear, observável com mais detalhe nos gráficos com H no intervalo [-50,50]Oe. Os parâmetros característicos das curvas em questão encontram-se nas tabelas 14 e 15.

Já as configurações em que H é paralelo a J e perpendicular a Ku dão origem a curvas MR(H) mais imprevisíveis e que variam de amostra para amostra, correspondendo estas às configurações impostas nas estruturas SV3-1, SV3-3, SV4-A e SV4-C. Alguns exemplos de curvas MR(H) deste tipo que foram medidos encontram-se na figura 28.

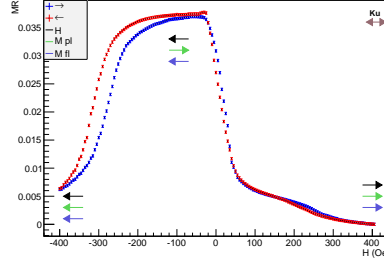
Para além da orientação do campo face às estruturas, uma outra característica fundamental para um comportamento linear e não histerético é a microfabricação em formas rectangulares tais que $L \gg h_{sensor}$, de forma que M_{fl} tenha mais tendência a orientar-se segundo o eixo mais longo, de comprimento L.

Atentando, a título ilustrativo, na figura 26e, e nas orientações apresentadas, a magnetização da camada fixa (M_{pl}) permanece inalterada para o intervalo de H apresentado, sendo que a magnetização da camada livre (M_{fl}) se orienta segundo a direcção do campo magnético quando este é suficientemente forte, atingindo a saturação, sendo que para H positivo, ambas as magnetizações têm sentidos opostos - MR máxima; e para H negativo, ambas se encontram no mesmo sentido - MR mínima. Quando o campo aplicado se aproxima de 0 Oe, a magnetização da camada livre orienta-se segundo o eixo mais longo do sensor pois essa configuração corresponde à situação energeticamente mais favorável, ficando perpendicular a M_{pl} .

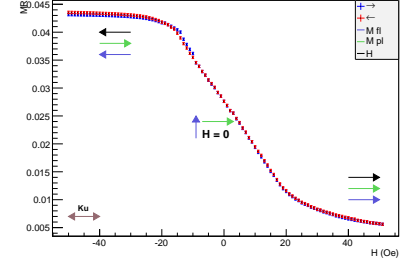
Por outro lado, se H for suficientemente forte no sentido contrário ao de M_{pl} , esta magnetização passa a orientar-se no sentido de H. Tomando o exemplo da figura 26f, a partir de um certo valor de $H > 0Oe$, MR tem tendência a



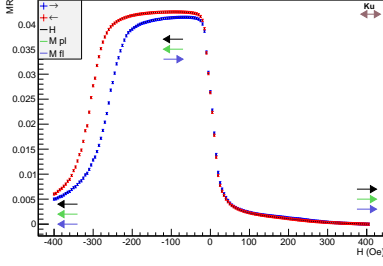
(a) Característica MR(H) - Amostra SV3, Estrutura 2



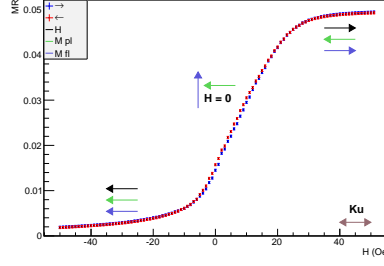
(b) Característica MR(H) - Amostra SV3, Estrutura 2



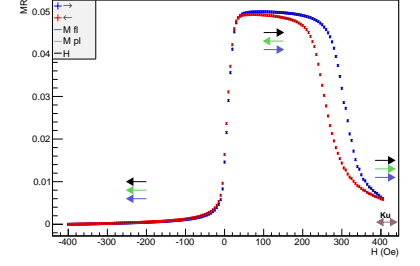
(c) Característica MR(H) - Amostra SV3, Estrutura 4



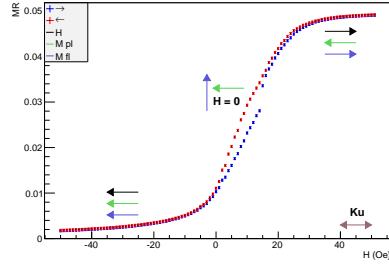
(d) Característica MR(H) - Amostra SV3, Estrutura 4



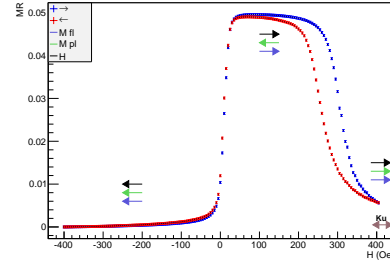
(e) Característica MR(H) - Amostra SV4, Estrutura B



(f) Característica MR(H) - Amostra SV4, Estrutura B



(g) Característica MR(H) - Amostra SV4, Estrutura D



(h) Característica MR(H) - Amostra SV4, Estrutura D

Figura 26: Curvas MR(H) obtidas para as amostras SV3 e SV4 com H perpendicular a J

Estrutura	$h_{sensor} (\mu m)$	$R_p(\Omega)$	$R_{ap}(\Omega)$	$MR_{max}(\%)$	$H_c(Oe)$	$H_{off}(Oe)$	$H_{sat1}(Oe)$	$H_{sat2}(Oe)$	$\Delta H_{sat}(Oe)$
SV3-2	2	493.044 ± 0.050	511.462 ± 0.052	3.736 ± 0.021	0.481 ± 0.571	12.954 ± 0.571	-23.449 ± 0.360	64.822 ± 0.456	88.271 ± 0.816
SV3-4	4	303.623 ± 0.031	316.784 ± 0.033	4.335 ± 0.021	0.009 ± 0.193	3.881 ± 0.193	-19.017 ± 0.266	33.564 ± 0.329	52.581 ± 0.595
SV4-B	6.5	168.015 ± 0.018	176.312 ± 0.018	4.938 ± 0.022	0.378 ± 0.219	7.085 ± 0.219	-10.870 ± 0.252	23.729 ± 0.375	34.598 ± 0.627
SV4-D	10	134.160 ± 0.014	140.750 ± 0.015	4.912 ± 0.022	1.603 ± 0.199	9.770 ± 0.199	-6.491 ± 0.174	24.911 ± 0.308	31.401 ± 0.482

Tabela 14: Parâmetros característicos da curva MR(H) - Amostra SV3. ΔH_{sat} define-se como $H_{sat2} - H_{sat1}$.

Estrutura	$h_{sensor} (\mu m)$	Sentido	Região Linear (Oe)	S (% Oe^{-1})	S_{med} (% Oe^{-1})
SV3-2	2	→	$[-10, 40]$	-0.0431 ± 0.0001	-0.0423 ± 0.0001
		←	$[-10, 40]$	-0.0415 ± 0.0001	
SV3-4	4	→	$[-3, 19]$	-0.0832 ± 0.0004	-0.0825 ± 0.0004
		←	$[-6, 19]$	-0.0817 ± 0.0003	
SV4-B	6.5	→	$[2, 14]$	0.1423 ± 0.0013	0.1427 ± 0.0013
		←	$[0, 13]$	0.1431 ± 0.0013	

Tabela 15: Sensibilidade e comparação com h_{sensor}

deser devido a se atingir uma configuração paralela entre M_{fl} e M_{pl} . No entanto, se H ficar um pouco mais fraco (*sentido* ←), M_{pl} tem tendência a orientar-se novamente segundo a sua direcção original, maximizando MR.

O raciocínio anterior é também aplicável para as restantes estruturas em que H é perpendicular ao eixo mais longo do sensor, sendo que para a amostra SV3, M_{pl} tem o sentido oposto ao que tem em SV4.

Por observação da tabela 14, verificou-se que o valor

de H_c para a estrutura SV4-D era bastante superior ao erro estimado, o que foi de encontro ao gráfico da figura 26g, onde se pode observar um comportamento histerético. Adicionalmente, a estrutura SV4-B apresenta alguma coercividade não coberta pelo erro, no entanto, de valor muito inferior a SV4-D. Para as restantes estruturas, o erro cobre $H_c = 0Oe$.

Atentando nos resultados da tabela 15, nota-se primeiramente que não se efectuou o cálculo da sensibilidade

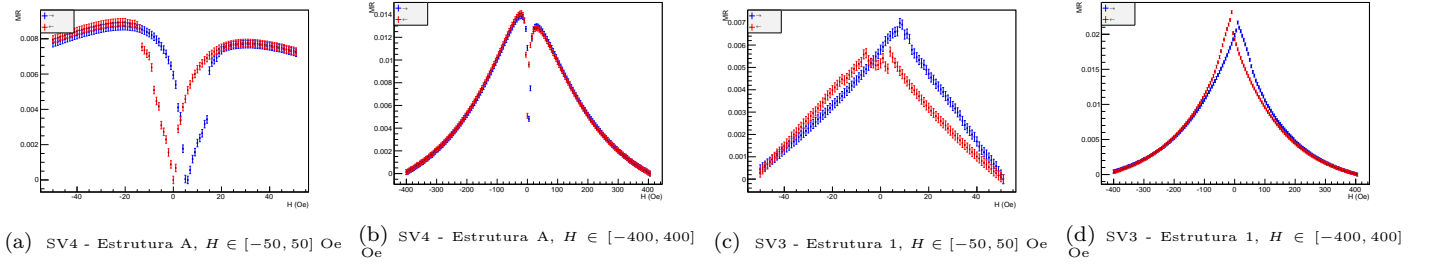


Figura 28: Exemplos de curvas $MR(H)$ obtidas para as amostras SV3 e SV4 com H paralelo a J

para a estrutura SV4-D, uma vez que a correspondente curva $MR(H)$ apresenta um comportamento não linear e histerético ($H_c = 1.553 \pm 0.695$ Oe). Verificou-se que a sensibilidade aumentava com h_{sensor} . Este resultado advém do termo desmagnetizante N_d (equação 6) que é tanto maior quanto menor for h_{sensor} . Uma vez que o campo de saturação é proporcional a N_d , quando este termo é maior, é também superior a região de campos coberta pelos campos de saturação (intervalo $[H_{sat1}, H_{sat2}]$ de largura ΔH_{sat} - figura 5). Esta previsão é corroborada pelos resultados da tabela 14, uma vez que para menor h_{sensor} se verifica um maior ΔH_{sat} . Ora, um maior ΔH_{sat} dá origem a um menor declive da curva $R(H)$ (e, obviamente, de $MR(H)$), conduzindo, consequentemente, a uma menor sensibilidade.

Fisicamente, um N_d maior implica uma maior tendência para M_{fl} se orientar segundo o eixo mais longo dos sensores de forma minimizar a energia, sendo, portanto, necessária a aplicação de um campo de intensidade superior para orientar esta magnetização segundo a direcção de M_{pl} , o que implica um maior ΔH_{sat} .

O facto da sensibilidade ser maior para um maior h_{sensor} não significa que os sensores são mais desejáveis nestes casos. De facto, este aumento da sensibilidade advém da diminuição significativa da gama de campos correspondente à região linear, diminuindo cerca de 50% entre cada estrutura da tabela 15. O sensor preferível será portanto o SV3-2, uma vez que é o que possui a gama de campos correspondente à maior região linear. Ainda assim, se não for necessária a medição de uma gama tão elevada de H , são preferíveis os sensores SV3-4 e SV4-B pois possuem maiores sensibilidades. A estrutura SV4-D não pode funcionar como um sensor devido ao seu carácter histerético.

4.1 Análise teórico-experimental

Com base nos parâmetros a que se teve acesso, foi possível realizar-se uma análise semi-teórica de forma a obter os rácios entre as sensibilidades de cada estrutura esperados e compará-los com os resultados experimentais. Para além disso, utilizando o valor experimental obtido para H_{off} foi possível estimar a região $[H_{sat1}, H_{sat2}]$ (figura 5).

Depois de vários estudos efectuados com base em diferentes hipóteses que envolveram a conjugação de dados fornecidos pelos docentes com os resultados obtidos experimentalmente, chegou-se à conclusão que a abordagem que conduzia a rácios entre sensibilidades mais próximos dos experimentais tinha por base:

- Considerar $t=6\mu m$: soma das espessuras da camada FM $Ni_{80}Fe_{20}$ ($4\mu m$) e da camada FM $Co_{80}Fe_{20}$ ($2\mu m$) que constituem a camada FM livre;

- Em primeira aproximação, considerar o valor de K_u do conjunto das camadas FM $Ni_{80}Fe_{20} / Co_{80}Fe_{20}$ como uma média ponderada pela espessura de cada camada do Ku obtido experimentalmente para a camada $Ni_{80}Fe_{20}$ ($K_u = 2970 \pm 127 \text{ erg cm}^{-3}$) e do Ku fornecido pelos docentes para a camada de $Co_{80}Fe_{20}$ ($K_u = 1650 \text{ erg cm}^{-3}$);
- Considerar para M_{sat} a maior magnetização de saturação de entre as duas camadas - 880 emu/cm^3 para $Ni_{80}Fe_{20}$.

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 16, onde se definiu I_H como sendo o intervalo $[H_{sat1}, H_{sat2}]$ (ver figura 5). Todas estas regiões têm associado um erro de 2 Oe.

Estrutura	h_{sensor} (μm)	$H_k - N_d M_{sat}$ (Oe)	I_H (Oe)	$\frac{S_{i+1}}{S_i}_{teo}$	$\frac{S_{i+1}}{S_i}_{exp}$
SV3-2	2	-27.265 ± 0.118	$[-14.310, 40.219]$		
SV3-4	4	-10.677 ± 0.118	$[-6.796, 14.558]$	2.554 ± 0.039	1.976 ± 0.189
SV4-B	6.5	-4.297 ± 0.118	$[2.788, 11.382]$	2.485 ± 0.096	1.723 ± 0.228
SV4-D	10	-0.724 ± 0.118	$[9.046, 10.494]$	-	-

Tabela 16: Parâmetros estimados pela abordagem semi-teórica. O índice "i" na última coluna remete para a estrutura da linha em que o valor é apresentado e "i+1" para a estrutura da linha seguinte.

Por observação da tabela 16, todas as estruturas possuem $H_k - N_d M_{sat} < 0$ o que teoricamente implica que todas elas deveriam apresentar uma curva $MR(H)$ linear (figura 5). Há que notar no entanto que para a estrutura SV4-D, este factor encontra-se muito próximo de 0 Oe, o que implica que esta estrutura se encontra na transição entre o regime linear e histerético. De facto, por observação da figura 26g, nota-se um comportamento que se assemelha a uma histerese, mas num estágio de transição do regime linear para o regime de histerese. Estes resultados não estão, no entanto, de acordo com os experimentais pois se esperaria $H_k - N_d M_{sat} > 0$ para SV4-D e $H_k - N_d M_{sat} \approx 0$ para SV4-B. O intervalo I_H não se encontra concordante com $[H_{sat1}, H_{sat2}]$ obtido experimentalmente, apesar de serem concordantes no facto sua dimensão diminuir com h_{sensor} . Nota-se, no entanto, que apesar das curvas $MR(H)$ não saturarem nos limites obtidos (ver tabela 14), estes limites assemelham-se aos limites estimados para as regiões lineares na tabela 15.

Constatou-se ainda que à medida que h_{sensor} diminui, $H_k - N_d M_{sat}$ ficou mais negativo, o que implica um aumento de ΔH_{sat} coerente com o obtido experimentalmente - que se pode observar facilmente por observação dos gráficos ou das regiões lineares estimadas (tabela 15).

Ainda na tabela 16 e uma vez que o declive calculado para a zona linear da função representada na figura 5 é proporcional à sensibilidade do sensor em questão, efectuaram-se os rácios entre os declives esperados com a abordagem teórico-experimental, comparando-os com os rácios entre as sensibilidades obtidos experimentalmente. Os valores não se encontram coerentes dentro do erro, apesar dos rácios obtidos apresentarem a mesma monotomia que os experimentais.

Esta discrepância pode dever-se à estimativa efectuada para os valores de Ku e M_{sat} não ser suficientemente rigorosa para obter um modelo teórico consistente com os resultados experimentais. Para verificar o modelo teórico de uma forma mais rigorosa, teriam de ser medidos os parâmetros estimados para as amostras estudadas.¹ Para além disso, a própria teoria prevê curvas com saturações bem definidas com base em quebras bruscas de histerese ou linearidade, o que não é verificado experimentalmente.

5 Conclusão

Em relação à Magnetoresistência Anisotrópica, concluiu-se que só a configuração A ($J \perp H$) pode ser usada como sensor (na B tudo o que não é desejável existia - histerese, baixa sensibilidade, baixa gama de resposta linear...).

Na posição A, estamos perante um sensor com uma boa sensibilidade, $0.2\%Oe^{-1}$ podendo centrar a sua gama linear impondo um campo externo fixo. Contudo, temos uma histerese pequena mas não desprezável como foi apontado na análise, uma gama linear muito reduzida em comparação com sensores micrométricos e valores de sensibilidade e gama de MR também abaixo destes e dos sensores GMR. Além disso, o facto de MR_{max} ser um ponto atingido numa situação específica e não um patamar estável como em GMR é uma desvantagem.

No que diz respeito a Ku , obteve-se o valor $Ku = 3076 \pm 187 \pm 78$ ($erg \cdot cm^{-3}$), realizando uma análise estatística. Finalmente, concluiu-se que o efeito do magnete externo segue uma lei arcotangente para distância superior a 2cm, e para distâncias inferiores estima-se uma lei exponencial. O estudo do efeito de GMR em duas válvulas de spin (com e sem *pinned – layer*) permitiu chegar à conclusão de que estas podem ser utilizadas enquanto sensores, embora a histerese observada seja uma desvantagem, para além dos valores pouco elevados de sensibilidade e regiões lineares curtas (em relação aos sensores micrométricos também estudados).

As válvulas SV1 e SV2 permitem a análise de uma gama de MR mais extensa que a obtida em AMR, tendo-se obtido $MR_{max_{SV1}} \approx 7\% > MR_{max_{SV2}} \approx 4\%$. Quanto às sensibilidades a vantagem é observada também em SV1, com $S_{SV1} \approx 0.8\%Oe^{-1}$ em relação a $S_{SV2} \approx 0.2\%Oe^{-1}$.

Pelo contrário, relativamente à extensão da região linear, destaca-se (embora ligeiramente) SV2, com $\Delta_{H_{SV2}} = 8 - 10 Oe$ versus um $\Delta_{H_{SV1}} = 5 Oe$.

A esta análise é preciso acrescentar que estas amostras apenas funcionam para a configuração de \vec{H} paralelo a

¹Uma outra abordagem foi efectuada, em que se estimou um valor para M_{sat} de forma a minimizar os desvios aos valores experimentais, no entanto o valor obtido foi bastante discrepante do fornecido pelos docentes, apesar de ter conduzido a resultados bastante satisfatórios - ver *logbook*.

Ku e perpendicular a \vec{J} , argumento que também não é favorável à sua utilização enquanto sensores.

Relativamente à análise efectuada para os sensores magnetoresistivos micrométricos, concluiu-se primeiramente que a configuração correspondente a um sensor com as características desejáveis correspondia ao campo magnético H perpendicular à direcção do eixo mais longo do sensor - paralelo a Ku e perpendicular a J . Concluiu-se, depois da análise das estruturas com esta configuração, que o sensor com menor h_{sensor} - SV3-2 - era o sensor preferível devido à elevada gama de H em que a sua curva $MR(H)$ era linear. Desta forma, para melhorar a performance de sensores deste tipo, a microfabricação deve ser, em primeira análise, tal que se minimize h_{sensor} face a L . Observou-se no entanto que as sensibilidades dos sensores SV3-4 e SV4-B eram maiores que para SV3-2, permitindo uma maior distinção na conversão. Deve ter-se, portanto, também atenção à diminuição da sensibilidade com h_{sensor} , e portanto deve haver um discernimento na escolha desta dimensão de forma a não obter uma sensibilidade excessivamente baixa.

A análise teórico-experimental efectuada permitiu concluir que a teoria possibilita uma descrição qualitativa razoável do comportamento esperado para cada sensor de acordo com as suas dimensões, falhando no entanto na análise quantitativa. Frisa-se, ainda assim, que um melhor teste à teoria teria de envolver a medição dos parâmetros característicos de cada amostra (Ku e M_{sat}) de forma a confirmar os seus valores.

Referências

- [1] INESC-MN, Ana V. Silva et al, *Linearization Strategies For High Sensitivity Magnetoresistance Sensors*
- [2] IST, Professores João Mendanha Dias, Marta Fajardo e Diana Leitão, *Guia Experimental - Introdução à Magnetoresistência*
- [3] <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=surface-fields-101>