

# Estudo da Magnetoresistência Gigante e Anisotrópica em Nanoestruturas

Laboratórios de Engenharia Física II

Rita Trovão Pereira de Lima

201108871

Abril 2015

**Resumo**—Com este trabalho pretende-se estudar a magnetoresistência gigante (GMR) através de uma válvula de spin (Ta(5nm)/CoFe(2nm)/NiFe(1,5nm)/Cu(2,2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(7nm)/Ta(5nm)) e, a magnetoresistência anisotrópica (AMR) através de uma liga de CoFeB. Para tal, efetuaram-se as medições necessárias, e as representações gráficas da resistência em função do campo magnético aplicado, para diferentes valores de ângulo entre a corrente  $\vec{I}$  e o campo  $\vec{H}$ . Para melhor visualização, a parte relativa a AMR foi repetida, resultando em dois conjuntos de dados distintos, conjunto A e B. Através dessas representações foi possível observar o efeito pretendido e retirar as conclusões esperadas. Foi ainda calculada a magnetoresistência máxima, ( $MR_{max}$ ), para o caso GMR e AMR (A e B), obtendo-se os valores  $\simeq 5\%$ ,  $\simeq 0,04\%$  e  $\simeq 0,02\%$ , respectivamente; o campo de acoplamento para o caso de GMR, obtendo-se um valor de ( $130e \pm 10e$ ); e ainda, a sensibilidade máxima para o caso de GMR e AMR B, obtendo-se os valores de  $Sensibilidade_{max} \simeq 0,002^{\Omega}/Oe$  e  $Sensibilidade_{max} \simeq 3,2 \times 10^{-6}\Omega/Oe$ , respectivamente.

## I. INTRODUÇÃO

### A. Magnetoresistência

Magnetoresistência caracteriza-se como uma propriedade, de cada material, que altera o valor da resistência elétrica consoante o campo magnético externo aplicado. Este efeito, que primeiramente foi designado de magnetoresistência ordinária, foi descoberto por Lord Kelvin (William Thomson), em 1856. O próprio observou que a resistência elétrica do material aumentava caso a orientação da corrente elétrica ( $I$ ) fosse igual à da força magnética aplicada, diminuindo caso o ângulo entre a direção da corrente e da força magnética fosse  $90^\circ$ . Existem vários tipos de magnetoresistência, neste relatório serão discutidos dois, magnetoresistência gigante (GMR) e magnetoresistência anisotrópica (AMR). [1] [2]

### Magnetoresistência Anisotrópica (AMR)

Considerada uma propriedade do material, relaciona a dependência da resistência elétrica com o ângulo formado entre a direção de corrente elétrica ( $I$ ) e a magnetização ( $M$ ). Este facto implica que, quando  $I$  e  $M$  apresentam a mesma orientação ( $\vec{I} \parallel \vec{M}$ ), a resistência é máxima; quando se encontram orientados perpendicularmente, a resistência

elétrica é mínima. Esta dependência é traduzida na seguinte relação:

$$R(\theta) = R_{\perp} + (R_{\parallel} + R_{\perp}) \cos^2(\theta), [1]$$

onde  $R$  corresponde à resistência do filme,  $R_{\perp}$  e  $R_{\parallel}$  correspondem, respetivamente, à resistência em  $\theta=90^\circ$  e  $\theta=0^\circ$ . Neste trabalho, definiu-se  $\theta=0^\circ$ , como o ângulo para o qual a corrente eléctrica ( $\vec{I}$ ) e o campo magnético aplicado ( $\vec{H}$ ), se encontram alinhados.

### Magnetoresistência Gigante (GMR)

Este efeito é observado em filmes finos compostos por camadas alternadas de materiais ferromagnéticos e não-magnéticos. O efeito provoca uma alteração significativa na resistência elétrica, dependente da orientação relativa da magnetização da camada, paralela ou antiparalela. Esta orientação pode ser controlada através da aplicação de um campo magnético externo. De forma geral, a resistência é baixa para uma orientação paralela, e alta para antiparalela. O melhor dispositivo utilizado para visualizar este efeito são as válvulas de spin, que foram também utilizadas ao longo deste trabalho. [3]

### Válvulas de Spin

Válvula de spin é um dispositivo constituído por um ou mais materiais magnéticos condutores, dispostos em camadas. A resistência elétrica dessas camadas pode ser alterada consoante a orientação relativa da respetiva magnetização. No caso mais simples, uma válvula de spin consiste numa camada de material não magnético entre duas camadas de material ferromagnético, das quais uma camada é ferromagnética fixa e magneticamente rígida (*hard magnet*), e outra é livre e magneticamente suave (*soft magnet*). [3]

## II. OBJECTIVOS

Os objectivos deste trabalho consistiam nos seguintes pontos: medir a magnetoresistência anisotrópica utilizando um filme fino de CoFeB (liga de Cobalto-Ferro-Boro, com espessura total 60nm) e medir a magnetoresistência gigante de uma válvula de spin

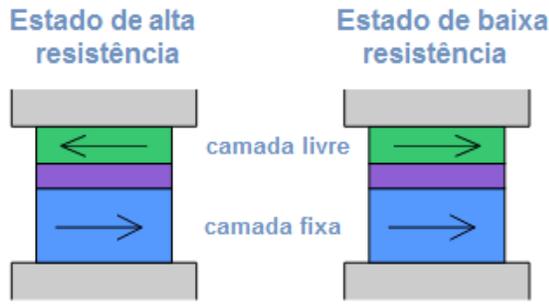


Fig. 1. Diagrama esquemático da estrutura de uma válvula de spin.

(Ta(5nm)/CoFe(2nm)/NiFe(1,5nm)/Cu(2,2nm)/CoFe(3nm)/MnIr(7nm)/Ta(5nm)). A partir das medições referidas, e quando possível, determinar as seguintes grandezas relevantes: magnetoresistência máxima, sensibilidade e campo de acoplamento.

### III. PROCEDIMENTO

Neste trabalho laboratorial foi utilizado um sistema constituído pelos seguintes equipamentos: Fonte bipolar, KEPCO-BOP 50-2M; Gerador, Agilent 33220A; fonte de tensão, KEITHLEY 2400-C, e um Gaussímetro, LakeShore 4SS DSP. Aliado a este conjunto de equipamentos, foram adicionadas duas bobinas móveis de *Helmholtz*, de modo a obter um campo o mais uniforme possível, e uma estrutura adaptada para analisar a amostra através do método de quatro contactos.

É de salientar, que o *set-up* utilizado está conectado a um computador com o software a utilizar para efectuar as medições necessárias (programa desenvolvido em LabVIEW). Foram utilizadas duas amostras distintas e previamente preparadas: válvula de spin e uma liga de CoFeB, de modo a efectuar as medições relativas à magnetoresistência gigante e anisotrópica, respetivamente. Os resultados foram obtidos através do método de quatro contactos, uma vez que a variação de resistência pretendida é bastante reduzida para ser detectada por um vulgar multímetro. Para tal, procedeu-se ao ajuste da corrente a aplicar, através da lei de Ohm:  $R = V/I$ , e tendo em conta a resistência da amostra utilizada, medida com um multímetro ( $\approx 200\Omega$ ), de modo a não sobreaquecer a mesma por efeito Joule.

Através dos dados experimentais, foi determinada a magnetoresistência máxima:

$$MR_{max} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} (\%), [2]$$

para o caso de GMR e AMR. Foi determinado o campo de acoplamento para os dados relativos a GRM, analisando o gráfico correspondente a  $\theta = 90$  (definido anteriormente), calculando  $\Delta H_0$ , relativo ao desvio do campo nulo. E

ainda, efectuando a análise necessária através do programa OriginLab, foi determinada a sensibilidade máxima, para o caso da magnetoresistência gigante. É de notar que todos os valores registados relativos ao campo magnético aplicado,  $\vec{H}$ , sofreram uma calibração, dado que o valor registado não correspondia ao real. Posto isto, foi realizada uma medição, utilizando um sonda de Hall, e com o valor medido ( $62Oe$ , e um *offset* de  $-3,16$ ), procedeu-se à calibração do campo magnético aplicado.

Para melhores resultados, e de forma a possibilitar uma boa visualização dos efeitos pretendidos, o trabalho laboratorial foi repetido. Ambos os resultados serão apresentados e discutidos.

### IV. RESULTADOS

O primeiro resultado observado foi a dependência (esperada) da resistência, tanto da válvula de spin como da liga CoFe, em função do campo magnético aplicado, para diferentes ângulos formados entre  $\vec{I}$  e  $\vec{H}$ . Posto isto, procedeu-se à análise detalhada para cada caso .

#### Magnetoresistência Gigante (GMR)

Foi aplicada na amostra uma corrente constante, calculada através da lei de *Ohm*, como já referido, para o método utilizado, suficiente para observar o efeito pretendido controlando o ruído associado.

Analisando os resultados obtidos (Fig.2 e Fig.3), para  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , é possível visualizar claramente para os casos de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , dois patamares distintos de máxima e mínima resistência.

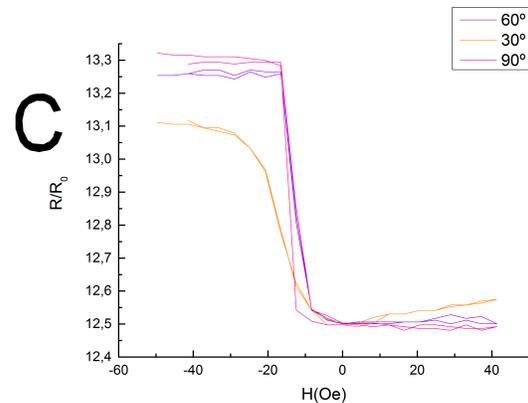


Fig. 2. Representação gráfica obtida para a resistência da válvula de spin testada em função do campo magnético aplicado, para ângulos entre a corrente e o campo aplicado de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ .

Observando os resultados obtidos e conhecendo a estrutura da válvula de spin, é possível concluir que a resistência está dependente da amplitude e orientação (positiva e negativa) do campo magnético aplicado. Nos casos em que  $\theta = 30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , o patamar de mínima resistência corresponde a

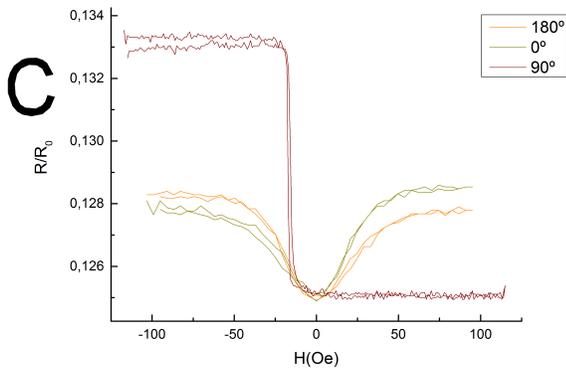


Fig. 3. Representação gráfica obtida para a resistência da válvula de spin testada em função do campo magnético aplicado, para ângulos entre a corrente e o campo aplicado de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

um campo aplicado positivo, o que provoca uma orientação paralela entre a camada fixa e móvel, e assim uma menor resistência. No patamar de máxima resistência a mesma é antiparalela, devido ao campo aplicado ser negativo.

Nos casos em que  $\theta = 180^\circ$  e  $0^\circ$ , orientação de  $\vec{H}$  não influenciará a resistência, apenas o facto de existir campo aplicado influenciará. Isto é, quando não existe campo aplicado, as orientações das duas camadas são iguais e paralelas, o que se reflecte na resistência, mínima nesse ponto. Quando se inicia a aplicação de campo, a resistência aumenta, proporcionalmente à magnitude do mesmo, até atingir a saturação. Obtemos um mínimo de resistência máxima para estes ângulos (2 patamares), comparativamente a todas as outras representações ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ ). Nas representações com  $\theta = 30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , à medida que o ângulo entre a orientação das magnetizações das duas camadas tende para  $90^\circ$  ( $\theta$  definido tende para  $0^\circ$  e  $180^\circ$ ), observamos uma diminuição da resistência máxima.

Através dos valores registados foi possível o cálculo da magnetoresistência máxima para cada ângulo ( $\theta$ ) testado, através da expressão [2]. Efectuando-se uma média das percentagens obtidas, obteve-se um valor de  $MR_{max} \simeq 5\%$ . A Fig.4 ilustra a relação entre a magnetoresistência máxima calculada em função do ângulo entre a magnetização da camada livre e fixa.

Foi também determinada a sensibilidade máxima, através da diferenciação da zona de transição das representações da Fig.2, obtendo-se o valor de  $\simeq 0,002$ . E, o campo de acoplamento, que surge como um desvio na posição de campo nulo a meia altura, devido à magnetização da camada fixa (Fig.5). Posto isto, foi estimado um campo de acoplamento de  $(130e \pm 10e)$ .

#### Magnetoresistência Anisotrópica (AMR)

De igual modo, como para a magnetoresistência gigante, foi aplicada uma corrente previamente calculada, tendo em

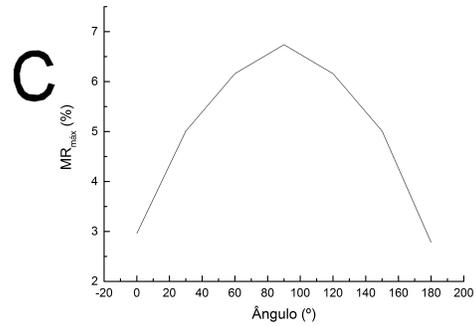


Fig. 4. Representação gráfica obtida para a magnetoresistência máxima calculada em função do ângulo entre a magnetização da camada livre e fixa.

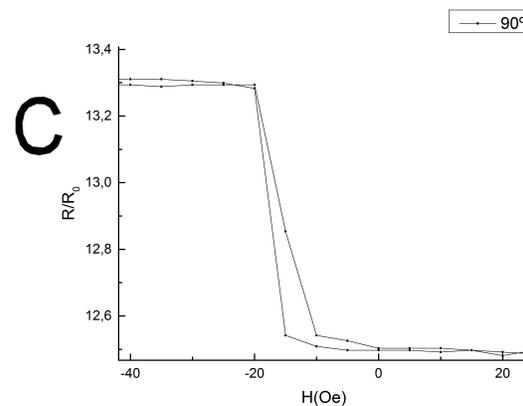


Fig. 5. Representação gráfica obtida para  $\theta = 90^\circ$ , da qual a meia altura foi estimado o campo de acoplamento.

conta a resistência da amostra, e suficiente para observar o efeito. Comparativamente com a medição anterior, uma vez que a AMR não provoca uma alteração tão significativa na resistência como a GMR, a corrente a aplicar de modo a conseguir observar o efeito é necessariamente superior. Como tal, a medição está sujeita a ser influenciada não só pelo ruído inerente à medição, mas também pelo possível efeito Joule, associado ao aquecimento da amostra, que poderá ser significativo.

Com o objectivo de uma melhor visualização do efeito pretendido, procedeu-se a duas medições, em diferentes horários e com diferentes correntes aplicadas. Para ambas, foram tratados os dados, obtendo-se as representações gráficas para a resistência em função do campo aplicado, para diferentes valores de ângulo entre a corrente e o campo magnético aplicado ( $\theta$ ). A partir dessas representações calcularam-se as grandezas relevantes.

Para o conjunto de dados A, foi aplicada uma corrente na ordem de,  $I = 0,008A$ ; correspondente a uma tensão de,  $V = 124,43 mV$ . A Fig.6 ilustra os resultados obtidos para  $\theta = 0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

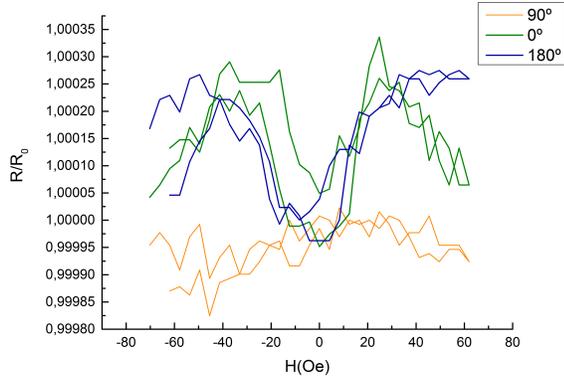


Fig. 6. Representação gráfica obtida para a resistência da liga de CoFeB analisada em função do campo magnético aplicado, para  $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , para  $I=0,008A$ .

Analisando o gráfico obtido para  $180^\circ$  e  $0^\circ$ , conclui-se que a corrente e o campo magnético aplicado são paralelos, logo a resistência é máxima, quando o campo aplicado for nulo, atinge-se um mínimo de resistência. No entanto, quando existe campo magnético aplicado, a resistência atingirá um valor máximo (dois patamares distintos), consoante a amplitude do mesmo. Esta situação corresponde ao eixo difícil (*hard axis*).

Observando o gráfico obtido para  $90^\circ$ , concluí-se que à medida que  $\theta$  tende para esse valor, a resistência registada vai diminuindo, aproximando-se idealmente de um valor constante mínimo ( $R/R_0 = 0,99995\Omega$ ), esta situação corresponde ao eixo fácil (*easy axis*).

Apesar de ser possível observar o efeito pretendido e retirar daí as conclusões esperadas, a presença de ruído inerente à medição é uma constante nas representações gráficas apresentadas. Mesmo assim, foi possível o cálculo da magnetoresistência máxima, e realizando uma média de todas as percentagens obtidas, obteve-se o valor de  $MR_{max} \simeq 0,04\%$ .

Para o conjunto de dados *B*, foi aplicada uma corrente eléctrica na ordem de,  $I=0,02A$ ; correspondente a uma tensão de,  $V=0,3107mV$ . A Fig.7 representa os resultados obtidos para  $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , respectivamente.

Comparando o conjunto de dados *A* e *B*, é visível que o ruído inerente à medição é substancialmente menor no conjunto de dados *B*, o que nos permitiu o cálculo da magnetoresistência anisotrópica máxima, analogamente a *A*, obtendo-se um valor de  $MR_{max} \simeq 0,02\%$ , mas ainda o cálculo da sensibilidade máxima, através do cálculo da primeira derivada para campos magnéticos reduzidos, uma vez que para grandes amplitudes de campo observa-se uma saturação da resistência, e por isso sensibilidade nula. Assim, o valor obtido para a sensibilidade máxima foi de  $\simeq 3,2 \times 10^{-6}\Omega/Oe$ .

Todas as conclusões retiradas para o conjunto de dados *A*

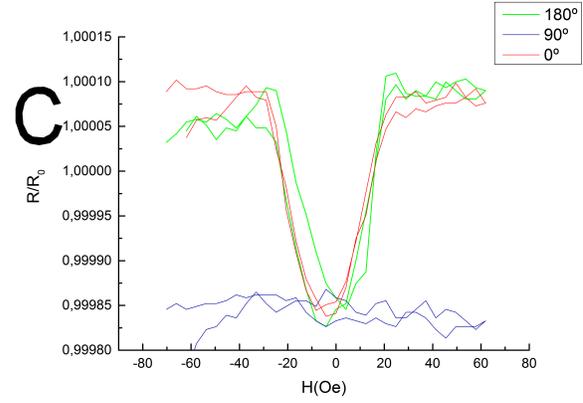


Fig. 7. Representação gráfica obtida para a resistência da liga de CoFeB analisada em função do campo magnético aplicado, para  $\theta=0^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $180^\circ$ ,  $I=0,02A$ .

são análogas ao conjunto *B*. Uma vez que, os dados de *B* apresentam um sinal esperado mais "limpo", relativamente aos dados de *A*, é notório que o ruído devido ao efeito Joule, introduzido pelo aumento de corrente, é menor do que o ruído eléctrico presente nos dados de *A*.

## V. CONCLUSÕES

Através da análise dos diferentes conjuntos de dados é possível concluir que o efeito pretendido foi registado e visualizado, em ambos os casos AMR e GMR. Como discutido, foi também possível concluir o esperado quanto à dependência das orientações da magnetização das diferentes camadas, no caso de GMR, e da liga de CoFe no caso de AMR, em função do ângulo entre  $\vec{I}$  e  $\vec{H}$ , para todos os conjuntos de dados.

Para o caso da GMR, foi possível calcular todas as grandezas relevantes, obtendo-se valores na gama dos esperados.

No entanto, para o caso de AMR, devido ao ruído inerente à medição, particularmente elevado no conjunto de dados *A*, apenas a magnetoresistência máxima foi calculada. Em contrapartida, avaliando o conjunto de dados *B*, denota-se uma diminuição significativa do ruído, concluindo assim que o aumento da corrente aplicada revelou-se vantajoso. Deste modo, foi possível o cálculo da magnetoresistência máxima, analogamente aos dados *A*, e ainda da sensibilidade máxima, resultando numa análise mais completa.

Posto isto, é possível afirmar que o trabalho realizado cumpriu os objectivos propostos com sucesso, possibilitando a aprendizagem e clara observação da magnetoresistência anisotrópica e gigante.

## REFERENCES

- [1] Mathias Getzlaff. *Fundamentals of magnetism*, volume Cap.16. Springer.

- [2] Stephen Blundell. *Magnetism in Condenser Matter*. Oxford University Press, 2001.
- [3] Sarah M Thompson. The discovery, development and future of gmr: The nobel prize 2007. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008.