

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
Trabalho de Conclusão do Curso

Transferência de Spin em Nanoponteiras de Tungstênio

Milena Cervo Sulzbach



PORTO ALEGRE

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
Trabalho de Conclusão do Curso

Transferência de Spin em Nanoponteiras de Tungstênio

Milena Cervo Sulzbach

Projeto apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Física

ORIENTADOR: *Prof. Dr. Luis Gustavo Pereira*

PORTO ALEGRE

2014

Resumo

O estudo de fenômenos de transporte eletrônico é um dos tópicos mais atuais na física da matéria condensada. Dentre eles, o efeito magnetorresistência gigante e transferência de spin estão entre os mais estudados. A sua vasta aplicabilidade, como por exemplo em dispositivos de memória não volátil (MRAM), incentiva a pesquisa para aprimorar as técnicas experimentais que permitam a sua ocorrência.

O efeito de transferência de spin pode ser resumidamente descrito como uma forma de torque sobre a magnetização de uma camada ferromagnética devido a passagem de uma corrente elétrica spin-polarizada pelo sistema. Para que o fenômeno aconteça é necessária que uma alta densidade de corrente elétrica percorra um ferromagneto. Para tanto, construímos contatos elétricos na forma de ponteiros de tungstênio que permitam o confinamento da corrente em regiões com área milimétricas. As amostras são multicamadas metálicas com dois ferromagnetos separados por um material não magnético. A espessura do filme resultante é nanométrica.

Neste trabalho desenvolvemos um estudo sobre a transferência de spin usando dois tipos de ponteiros de tungstênio como contato elétrico: a) como feita b) com cobertura ferromagnética. Em ambos os casos foram observados o efeito desejado. Entretanto, no caso das pontas recobertas o papel de camada polarizadora de spin deixa de ser uma das camadas do filme fino e é assumido pela ponteira. Este resultado, ainda não reportado por outros grupos na literatura, apresenta um grande potencial tecnológico, pois esses dispositivos podem ser utilizados como instrumento de escrita e leitura.

Abstract

The study of transport phenomena is one of the most current topics in condensed matter physics. Among them, giant magnetoresistance and spin transfer are the most studied. Its huge applicability, for example in non-volatile memory devices (MRAM), increases the experimental research techniques to create more efficient devices.

The spin transfer effect may be briefly described as a torque acting in the magnetization of a magnetic layer due to spin-polarized current flow through the system. A high density of electrical current to the effect happen is needed. Thus, we built electric contacts as tungsten tips that confines the current to millimetric areas. The samples are metallic multilayers containing two ferromagnets separated by a non-magnetic material. The thickness of the resulting film is nanometric.

In this work, we develop a study about spin transfer using two kinds of tungsten tips as electric contact: a) as made b) with ferromagnetic coating. In both cases the desired effect were observed. However, for the coating tips, the layer which polarizes spins is on the tip and no longer in the film. This result, still not reported in literature, presents a huge technological potential, because these devices may be used as write and read instruments.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	ii
1 Introdução	1
2 Revisão Teórica	2
2.1 Magnetorresistência Gigante	2
2.2 Transferência de Spin	5
3 Aparato Experimental	9
3.1 Amostras	9
3.2 Fabricação das nanoponteiras	10
3.3 Sistema de Medidas	14
4 Resultados	16
4.1 Bicamada magnética e ponteira como feita	16
4.2 Bicamada magnética e ponteira coberta	19
4.3 Uma camada magnética com ponteira coberta	21
4.4 Discussão de resultados	22
5 Conclusões e Perspectivas	26
Bibliografia	28

1 *Introdução*

O estudo de fenômeno de transporte elétrico tem sido vastamente explorado nos últimos anos principalmente devido à possibilidade de aplicação tecnológica. Do ponto de vista científico, esse estudo teve maior estímulo a partir de 1988, quando os grupos de Albert Fert¹ e Peter Grünberg,² independentemente, observaram o efeito da magnetorresistência gigante.

A análise teórica da relação entre transporte elétrico e spin resultou na proposta de Slonczewski³ e Berger,⁴ em 1996, do efeito de transferência de spin. Experimentalmente ele só foi medido em 1998 por *Tsoi et al.*⁵ Dentre as dificuldades práticas para a medição está a necessidade de que uma alta densidade de corrente elétrica atravesse o material de estudo, a qual pode chegar a $10^6 - 10^8 \frac{A}{cm^2}$.

Nesta pesquisa propomos experimentos que permitam medir sistemas que apresentem transferência de spin. Como contato elétrico utilizamos ponteiras feitas de tungstênio, obtidas a partir de eletrocorrosão, que possuem uma extremidade nanométrica. Essas pontas confinam a corrente de tal forma a obter a densidade de corrente necessária. As amostras são multicamadas metálicas contendo duas camadas ferromagnéticas separadas por uma de material não magnético construídas a partir de desbastamento iônico magnético (*sputtering*).

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2 será feita uma revisão teórica a respeito do fenômeno de transferência de spin e da magnetorresistência gigante, no capítulo 3 são apresentados a aparelhagem experimental de construção de amostras, ponteiras e sistema de medidas, no capítulo 4 estão os resultados obtidos experimentalmente e uma pequena discussão e, por fim, no último capítulo serão mostradas as conclusões e perspectivas da pesquisa.

2 *Revisão Teórica*

Neste capítulo serão apresentados os princípios básicos do tema deste trabalho. Inicialmente será descrito o efeito de magnetorresistência gigante (GMR). Embora não seja diretamente ligado ao problema de transferência de spin, a sua compreensão é fundamental pois, de forma indireta, adquirimos conhecimento sobre as configurações relativas entre as duas camadas magnéticas que compõem o sistema. A segunda seção trata do efeito de transferência de spin, em que serão apresentados os princípios do efeito.

2.1 **Magnetorresistência Gigante**

O efeito da magnetorresistência gigante foi primeiramente observado por *Baibich et al.*¹ em 1988 em medidas com multicamadas metálicas do tipo $[Fe(30A)/Cr(9A)]_{40}$. Neste trabalho, os autores encontraram uma significativa variação da resistividade do sistema em função do campo magnético aplicado, valor em torno de 80%. O fenômeno, até então desconhecido, foi explicado com base no modelo de duas correntes de Mott. De maneira geral, a GMR é o controle da resistência elétrica do sistema através da mudança da configuração relativa entre as magnetizações das camadas ferromagnéticas que o compõem.

Para o entendimento desse efeito é necessário levar em consideração a dependência do spin no transporte eletrônico. Essa dependência pode ser entendida pela análise da estrutura de bandas típica de um metal ferromagnético.

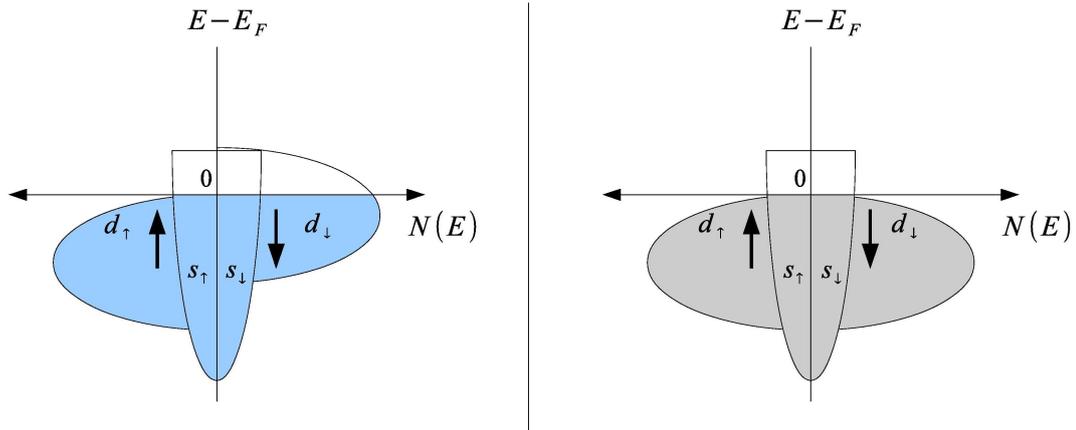


Figura 2.1: Representação esquemática da estrutura de bandas de um metal: **a.** Metal ferromagnético - spins up e down não se compensam. **b.** Metal não-magnético.

Os metais de transição possuem os níveis de energia d incompletos, os quais superpõem as bandas d com as bandas s nas vizinhanças da energia de Fermi. Nos metais de transição $3d$, a distribuição dos spins nas sub-bandas $3d_{\uparrow}$ e $3d_{\downarrow}$ não estão compensadas, o que gera diferentes densidades de estado para spins up e down e, conseqüentemente, devido a superposição s - d , uma assimetria na condução eletrônica. Baseado na Figura 2.1 denominaremos spins majoritários como spins up (ρ_{\uparrow}) já que a sua densidade é maior, e spins minoritários os spins down (ρ_{\downarrow}). O módulo do momento magnético líquido do sistema é dado por $\vec{\mu}_s \alpha (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$ e $\vec{M} \alpha - \vec{\mu}_s$. Portanto, podemos observar que existe uma relação entre a magnetização e a condutividade do sistema.

Ainda relacionando diferenças de estado de spin e condução eletrônica, citamos o modelo de Mott⁶ para duas correntes. Esse modelo assume que os elétrons de condução percorrem canais paralelos e independentes, um para os elétrons com spin up e outro para spins down, com resistividades diferentes associadas ao seu estado, ρ_{\uparrow} e ρ_{\downarrow} . Utilizando a nossa convesão anteriormente definida, o canal com resistividade ρ_{\uparrow} está relacionado aos elétrons majoritários e o de resistividade ρ_{\downarrow} aos elétrons minoritários. Pode haver uma mistura entre elétrons de canais diferentes, o que resultaria em uma resistividade de mistura, $\rho_{\downarrow\uparrow}$, mas desconsideramos essa relação.

Podemos aplicar o modelo de Mott à sistemas de baixa dimensionalidade. A partir da Figura 2.2, supomos um sistema que contenha duas camadas ferromagnéticas (FM) paralelas com espessura nanométricas diferentes, F_1 e F_2 , separadas por uma camada não-magnética (NM). A camada NM deve ser espessa o suficiente para que não haja acoplamento entre os ferromagnetos, entretanto não deve ser maior do que o livre caminho médio eletrônico (λ), distância média a qual a memória de spin é mantido.

Cada ferromagneto possui um vetor magnetização, \vec{M}_1 e \vec{M}_2 , cuja direção depende da orientação dos spins majoritários presentes na camada: o vetor apontando para baixo indica que os

portadores majoritário são os elétrons com spin up e o vetor apontado para cima corresponde aos portadores minoritário spin up, já que a relação entre magnetização e momento magnético líquido é negativa.

Na Figura 2.2(a) as direções de magnetização das camadas F_1 e F_2 são paralelas e definidas pelos portadores majoritários de spin up. Assim, as duas camadas serão fortes centros espalhadores de elétrons com spin down (minoritários), pois o canal que conduz spins down é mais resistivo nessa configuração. Por outro lado, elétrons com spins up são pouco espalhados. Entretanto, se as direções das magnetizações formassem uma configuração antiparalela, isto é, em uma delas os spin up são majoritários e na outra são os spin down, cada uma iria espalhar fortemente os seus respectivos spins minoritários, como está representado na Figura 2.2(b).

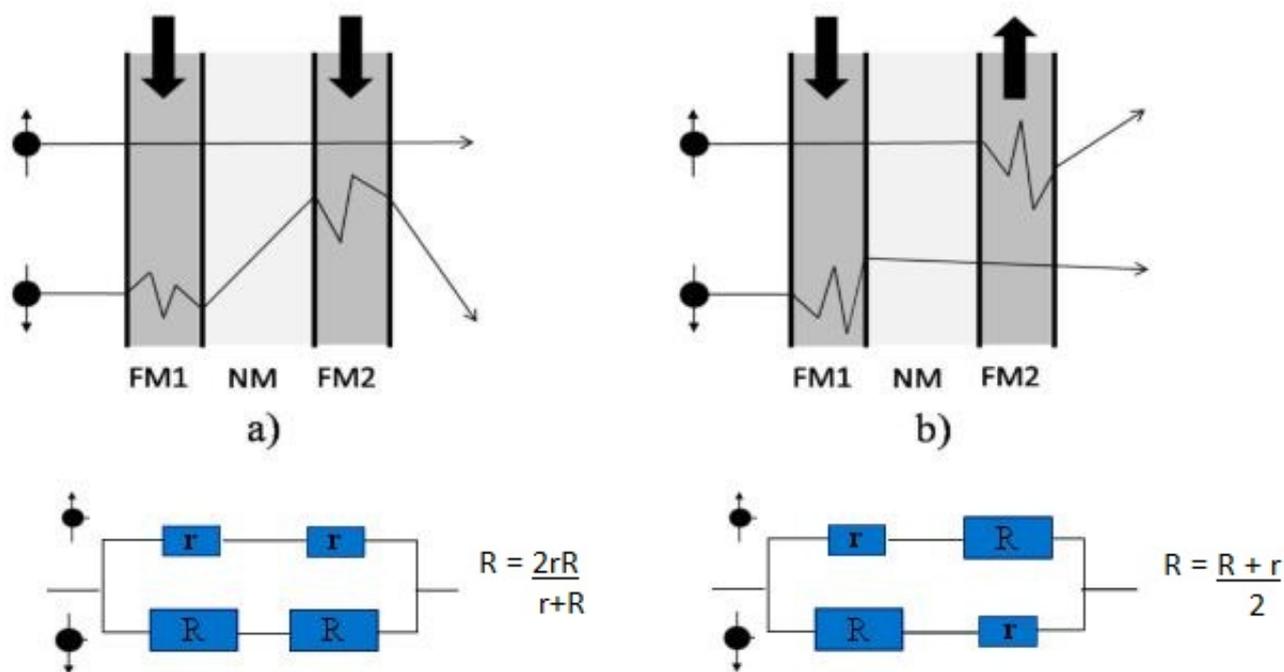


Figura 2.2: Parte de cima: esquema de espalhamento de spins em sistema com duas camadas ferromagnéticas com configuração de magnetização a) paralela e b) antiparalela. Parte de baixo: associação de resistores similar.

Esse comportamento dependente da magnetização \vec{M} resulta em variações na resistência elétrica do sistema. Para o caso da Figura 2.2(a), o sistema possui baixa resistência elétrica e para o da configuração da Figura 2.2(b) tem alta resistência. Classicamente, podemos comparar esse resultado com uma associação de resistores como na parte inferior da mesma figura, tal que o canal de spin que sofre maior espalhamento é representado por uma resistência R , e o canal com menor taxa de espalhamento por uma resistência r , sendo que $R > r$. Assim, $R_2 > R_1$

A observação conclusiva a respeito dessas hipóteses obtida por *Baibich et al.* pode ser

vista na Figura 2.3 e, devido à grande variação de resistência observada entre os estados de diferentes magnetizações relativas, o efeito foi denominado magnetorresistência gigante. O gráfico é a resistência elétrica do sistema em função do campo magnético externo aplicado.

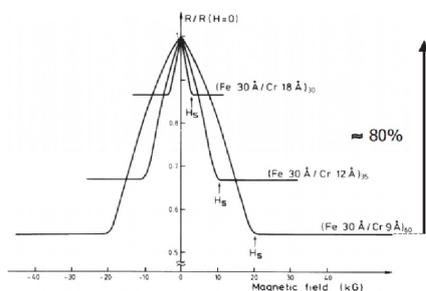


Figura 2.3: Primeira observação experimental da magnetorresistência gigante na qual foi obtida variação de aproximadamente 80% na resistência do sistema.

2.2 Transferência de Spin

O efeito de transferência de spin (TS) foi proposto por *Slonczewski*³ e *Berger et al.*,⁴ independentemente, em 1996, como uma forma de torque sobre uma camada magnética através de corrente elétrica spin-polarizada. Esse fenômeno foi observado por *Tsoi et al.*⁵ somente em 1998, através da injeção de corrente contínua em através de um contato elétrico pontual em multicamadas Cu/Co. Dentre as vantagens para aplicações tecnológicas desse efeito em relação à magnetorresistência gigante é a não utilização de campo magnético para a manipulação das magnetizações e sim, somente corrente elétrica, bem como o sistema apresentar histerese na curva *resistência × corrente*.

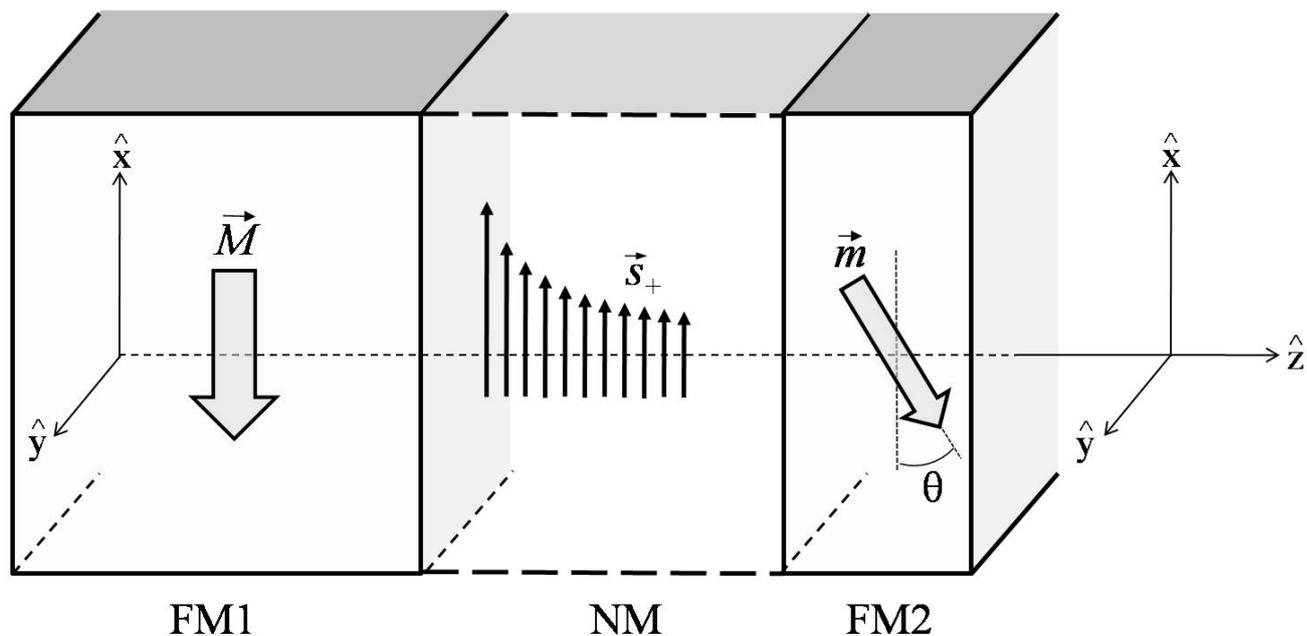


Figura 2.4: Sistema esquemático de transferência de spin.

Para descrever o fenômeno iremos utilizar um sistema composto por duas camadas ferromagnéticas separadas por uma camada não magnética, sendo a espessura de F_1 maior que a de F_2 . A primeira camada é chamada polarizadora e a segunda é a camada livre. Na Figura 2.4 é apresentado um diagrama esquemático do sistema.

A corrente elétrica se torna spin-polarizada ao passar pela primeira camada F_1 , cuja magnetização está orientada obliquamente com respeito ao eixo de magnetização de F_2 . Quando essa corrente, agora, polarizada flui através de F_2 , a interação de troca, entre spins da corrente e spins da camada, alinha a polarização da corrente ao longo do eixo de magnetização de F_2 . Devido à conservação do momentum angular de spin, a componente transversal da polarização perdida pela corrente deverá ser transferida para F_2 , o que pode ser descrito como um torque agindo sobre a sua magnetização⁷. Esse torque pode levar à sua completa reversão ou à sua precessão na faixa de frequência de micro-ondas (efeito de hiperfrequência).

Entre as camadas ferro e não-magnéticas ocorre uma zona de acumulação de spin, como pode ser visto na Figura 2.5.

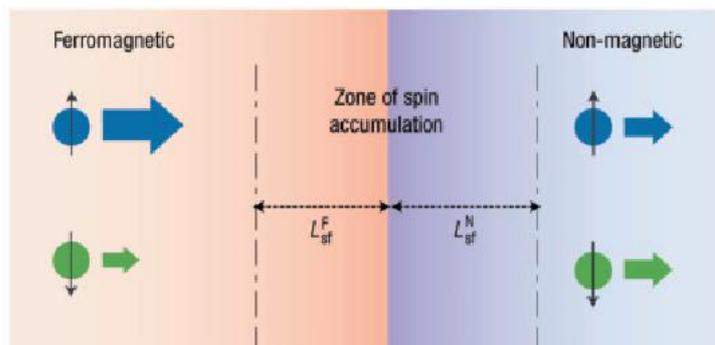


Figura 2.5: Zona de acumulação de spin na interface de material ferro e não-magnético.

Experimentalmente se verifica que a camada que polariza a corrente deve ser mais espessa e menos coerciva, enquanto que a camada que sofre transferência de spin é menos espessa. Para que haja o efeito é necessária uma densidade de corrente elétrica da ordem de $10^6 - 10^8 \frac{A}{cm^2}$ ^{8,9} atravessando a amostra, de forma a existirem portadores de spin suficiente para atuar sobre a magnetização da camada F_2 . O valor mínimo de corrente elétrica para que ocorra reversão da magnetização da camada livre é conhecido como corrente crítica do sistema.

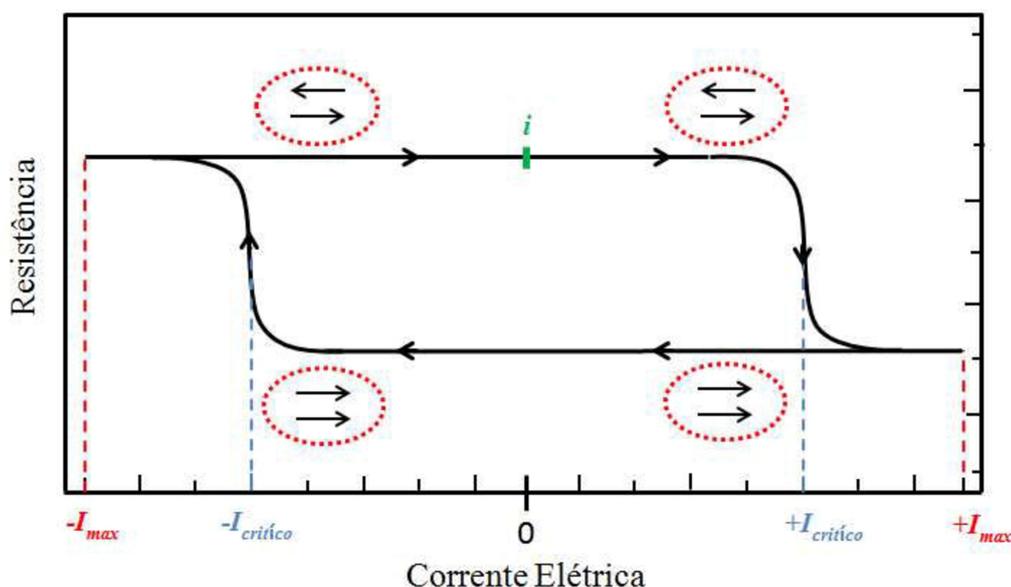


Figura 2.6: Medida típica de transferência de spin, indicando valores de corrente máxima e corrente crítica.

A mesma relação entre a magnetização relativa entre as camadas e a resistência elétrica do sistema que foi utilizada na magnetorresistência gigante pode ser aplicada nas medidas de transferência de spin. Na configuração paralela das magnetizações a resistência do sistema é baixa e na configuração antiparalela é alta, como pode ser visto na Figura 2.6.

Obter experimentalmente os valores de densidade de corrente necessários é um desafio. Não existem meios de sustentar esses valores em dispositivos macroscópicos. Dessa forma, redu-

zimos a área da passagem da corrente para que a sua densidade aumente. Basicamente existem dois tipos de contato possíveis: *Tsoi et al.* construiu contatos elétricos pontuais e *Katine et al.*¹⁰ nanopilares. Devido à complexidade da construção dos nanopilares, neste trabalho utilizamos nanoponteiras de tungstênio como contato pontual, como a vista na Figura 2.8. Essas pontas, tanto pela simplicidade na fabricação quanto nos bons resultados medidos ofereceram muitas vantagens sobre os demais métodos.

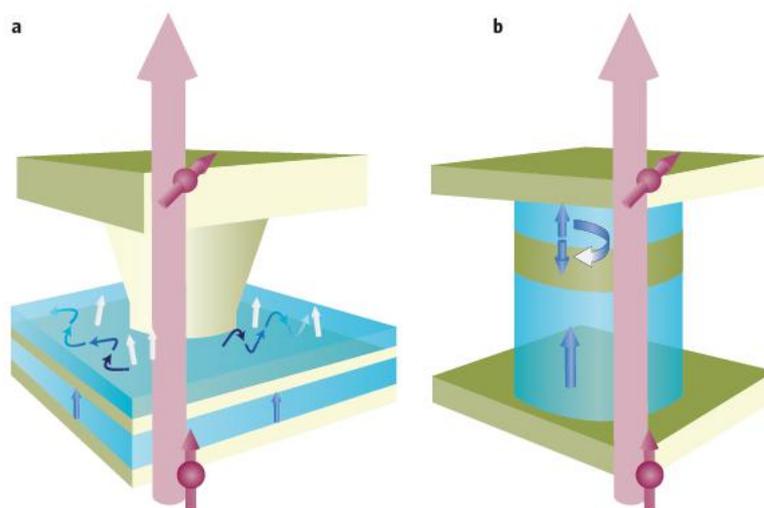


Figura 2.7: Métodos para confinamento de corrente elétrica a) contato pontual entre multicamada magnética (abaixo) e não-magnética e b) nanopilar de multicamadas metálicas.¹¹

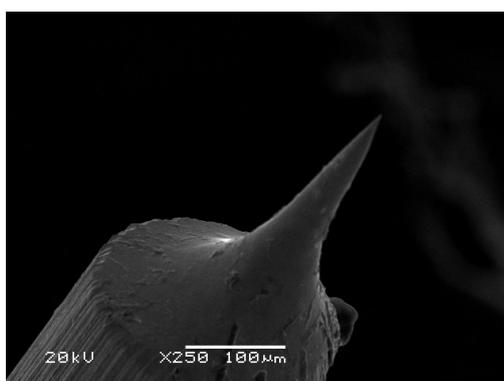


Figura 2.8: Imagem obtidas a partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de ponteira de tungstênio.

3 *Aparato Experimental*

Tendo em vista que a motivação para esse trabalho foram as medidas experimentais obtidas em laboratório, é imprescindível um breve resumo de como essas medidas foram feitas. Assim, este capítulo se divide em três seções nas quais são apresentadas as amostras e como foram feitas, a fabricação das nanoponteiras e o sistema de medidas de transferência de spin.

3.1 Amostras

As amostras utilizadas foram fabricadas pela técnica de desbastamento iônico magnético (*magnetron sputtering*). Essa técnica consiste na retirada de átomos de um alvo sólido por um plasma magneticamente confinado para serem depositados em um substrato, formando filmes finos.

O fenômeno de *sputtering* ocorre quando os átomos do alvo sólido são ejetados devido à colisões de partículas do plasma com sua superfície. Essas partículas, as quais possuem energias entre 5eV e 10keV, transferem energia aos átomos do sólido, que por sua vez, ao serem ejetados, adquirem energias da ordem de 10 a 100eV. O filme fino se forma quando os átomos ejetados se reagrupam em um anteparo, o substrato, que está a certa distância do alvo⁹.

As amostras utilizadas nessa pesquisa foram fabricadas na máquina pertencente ao Laboratório de Magnetismo (LAM) da UFRGS. Dentre as amostras fabricadas, as que se mostraram mais interessante para a análise foram as seguintes:

- i. $SiO_2/Cu(50)/NiFe(15)/Cu(8)/NiFe(3)/Cu(5)$
- ii. $SiO_2/Cu(50 - trilha)/Co(15)/Cu(8)/Co(3)/Cu(5)$
- iii. $SiO_2/Cu(8)/NiFe(6)/Cu(50)$

Os valores entre parênteses são as espessuras do filme em nanômetros. Na deposição via *sputtering*

da amostra *ii*, utilizamos uma máscara em formato de linha, a qual nos permitiu construir uma trilha de cobre de $150\mu m$ de largura.

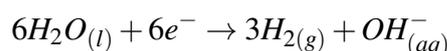
3.2 Fabricação das nanoponteiras

As ponteiras de tungstênio são sistemas simples de serem construídos e oferecem resultados muito interessantes no efeito de transferência de spin. A sua fabricação é feita a partir de um processo eletroquímico de corrosão de um filamento de metal rígido. No nosso caso preferimos a utilização de tungstênio devido à sua rigidez mecânica e ao fato de que durante a corrosão não há liberação de gases tóxicos.

Para que ocorra a corrosão de um metal é necessário que haja uma solução eletrolítica, um catodo e um anodo. O anodo será o próprio fio metálico (tungstênio com diâmetro $0.25mm$) a ser corroído e como catodo utilizamos um filamento de platina no formato de anel com diâmetro $4mm$, o qual, ao redor do tungstênio, permite corrosão homogênea. A solução eletrolítica que utilizamos é aquosa com NaOH a 2 molar.

Existem diferentes métodos para induzir a corrosão.^{9,12,13} Foram escolhidos 3 métodos diferentes: laminar, drop-off e drop-off magnético. Esse último foi proposto durante esta pesquisa. Embora diferentes, todos os procedimentos são baseados nas mesmas reações químicas:

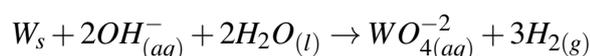
i No catodo (anel de platina):



ii No anodo (fio de tungstênio):



iii Reação Global:



No anel de platina ocorre a separação da água em íons H^+ e OH^- . Os íons positivos formarão hidrogênio gasoso, o que caracterizará a formação de bolhas entre o anel e o fio de tungstênio. Os íons OH^- , devido à diferença de potencial entre o fio e o anel, reagem com tungstênio sólido formando o $WO_{2(aq)}^-$ que se solubiliza.

Os diferentes procedimentos empregados tem o intuito de criar melhores dispositivos para as medidas. Portanto, apresentaremos aqui uma breve exposição destes.

Método Laminar

Neste método, o anel de platina retém certa quantidade de solução em sua área por tensão superficial, formando um menisco responsável pela corrosão, como pode ser visto na Figura 3.1. O filamento de tungstênio atravessa esse menisco no centro. A medida que a corrosão acontece, a força gravitacional sobre a extremidade abaixo do anel se torna crítica. É possível que, devido à essa força, a estrutura se rompa antes de a extremidade ficar de ordem nanométrica. Dessa forma, a massa do fio que fica abaixo do menisco deve ser minimizada afim de reduzir a tensão mecânica.

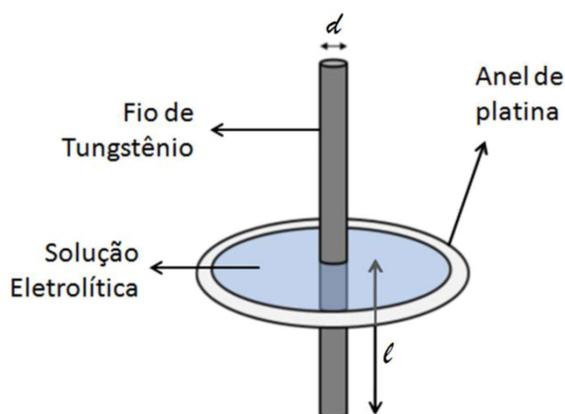


Figura 3.1: Esquema de montagem do método laminar.

Além disso, como o anel não consegue reter grande quantidade de solução, pode não haver íons suficientes para corroer completamente o fio. Quando isso acontece, é preciso repor a solução do anel, o que pode induzir diferentes estágios de corrosão no fio, deixando a ponteira mais alongada.

Nesse método, as duas extremidades do fio são ponteiras úteis. Para evitar que, no momento de rompimento, a extremidade de baixo seja danificada, acomodamos certa quantidade de espuma de barbear abaixo do anel para frear a sua queda. Na Figura 3.2 está a imagem da ponteira, já limpa, obtida pela parte superior do fio.

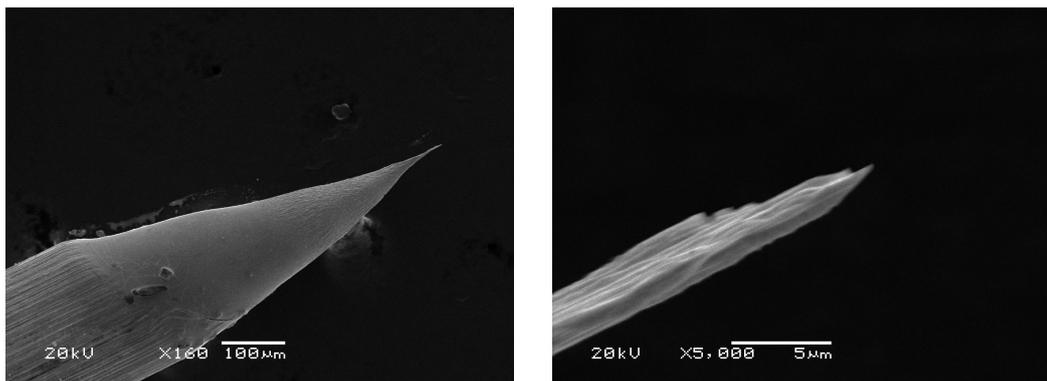


Figura 3.2: Imagem de MEV de ponteira feita pelo método laminar. A direita, a mesma imagem focalizada na ponta e ampliada 5000 vezes.

Apesar de produzir o dobro de ponteiras que os demais métodos, a qualidade das pontas não é a melhor. Como se formam bolhas durante a corrosão na região de desgaste, elas geram imperfeições na superfície do metal, além de haver considerável depósito de óxido.

Método Drop-Off

O método Drop-Off, esquematizado na Figura 3.3, é o mais utilizado na literatura.^{12,13} Ele permite manter uma quantidade suficiente de íons $-OH$ para completar a corrosão. Nesse caso, o anel de platina e o fio encontram-se submersos na solução eletrolítica.

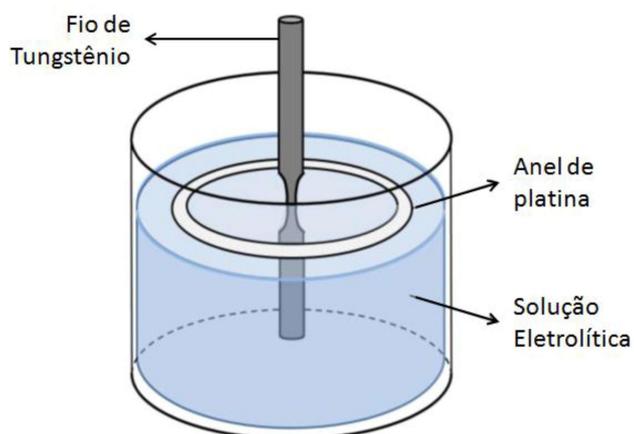


Figura 3.3: Esquema de método Drop-off.

Como nesse caso não utilizaremos a ponteira que se formaria na extremidade abaixo do fio, o problema da tensão mecânica sobre a estrutura não é crítica, basta reduzirmos ao mínimo a massa de fio inferior. Na figura abaixo, feita via microscópio eletrônico de varredura (MEV), uma imagem de ponteira feita pelo método descrito acima, com tensão entre eletrodos de 2 volts.

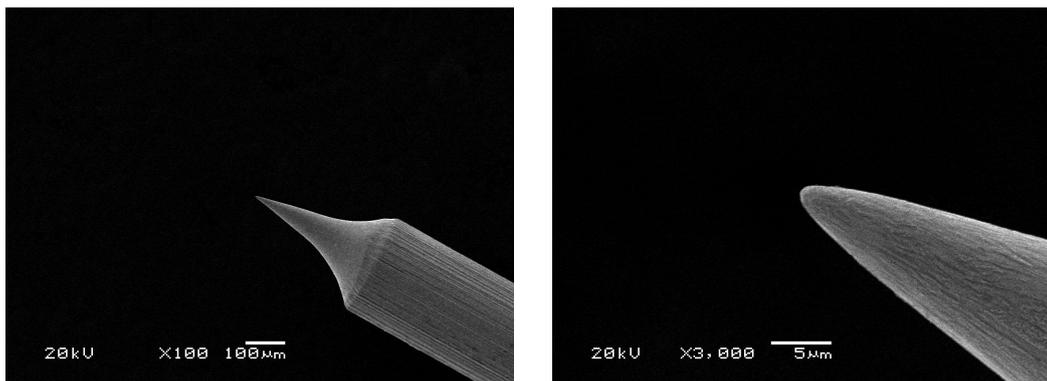


Figura 3.4: Imagem de MEV de ponteira feita pelo método drop-off. A direita, a mesma imagem focalizada na ponta e ampliada 3000 vezes.

Durante o processo de corrosão, foi notada a criação de muitas bolhas próxima a região de constricção. Por esse motivo, adaptamos o método para o Drop-Off magnético.

Método Drop-Off Magnético

A inclusão do campo magnético estático foi uma proposta desenvolvida no Laboratório de Magnetismo¹⁴ (LAM-UFRGS) e não havia sido apresentado na literatura. O campo é obtido posicionando ímãs circulares na base do frasco da solução, o qual induzirá uma força perpendicular sobre as partículas negativas da solução fazendo com que ela gire, como visto na Figura 3.5. Esse movimento de rotação diminui quantidade de óxido que se acumula na ponteira, reduz a influência de bolhas e otimiza a renovação de íons devido à constante troca de solução no local do desgaste.

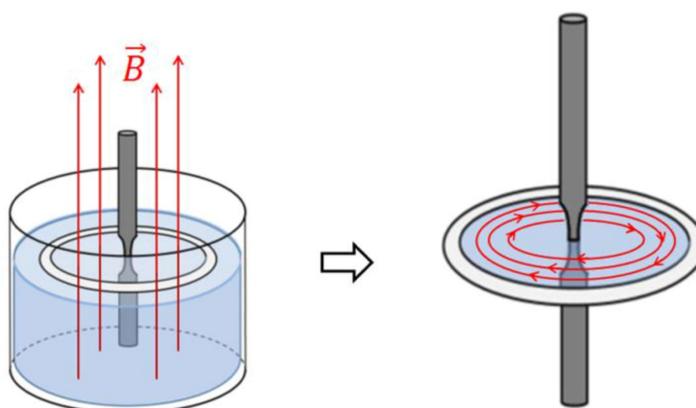


Figura 3.5: A esquerda: esquema do método Drop-Off magnético. A direita: movimento da solução devido à força de Lorentz sobre íons.

Através de imagens feitas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) constatamos que, na média, o raio das pontas é da ordem de 50 nanômetros, valor que permite o aumento da densidade de corrente que é necessário para visualizar a transferência de spin. Na Figura 3.6 a

imagem em ângulo de uma ponteira feita por esse método, com um ímã circular abaixo da solução.

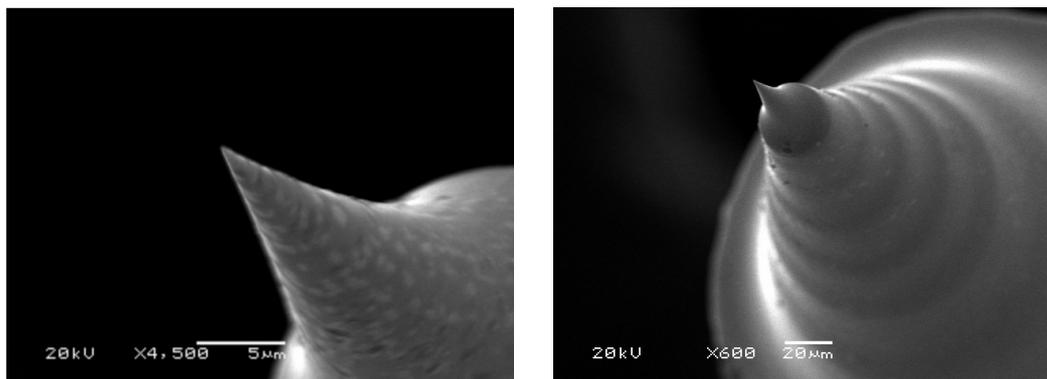


Figura 3.6: Imagem de MEV de ponteira feita pelo método Drop-off magnético. A direita, a mesma ponteira em ângulo com o feixe de elétrons

Todas as ponteiras, após a corrosão são limpas em um banho de álcool iso-propílico e armazenadas em um recipiente contendo o mesmo álcool para evitar corrosão.

3.3 Sistema de Medidas

O aparato de medidas foi construído com o intuito de sistematizar o processo de medição e permitir maior estabilidade da ponteira¹⁵. De fato, a estabilidade mecânica é a maior dificuldade para se obter uma boa medida.

O principal equipamento desse sistema é um aproximador, o qual utiliza um conjunto de piezo-elétricos que permitem um deslocamento em passo nanométrico. A ponteira é acoplada a esse aproximador e é lentamente aproximada da amostra que se deseja medir através de um programa computacional. Para verificar se há contato entre a ponteira e a amostra, a passagem de corrente elétrica por esse sistema é monitorada através de multímetros e, assim que o contato é feito, a aproximação é interrompida.

Além da ponteira, é necessário que haja mais um contato elétrico na amostra que a ligue à fonte de corrente e ao leitor de tensão. Esse contato é um pino de ouro macroscópico com uma mola acoplada a extremidade para evitar danos mecânicos na amostra. A Figura 3.7 representa o conjunto de aproximação.

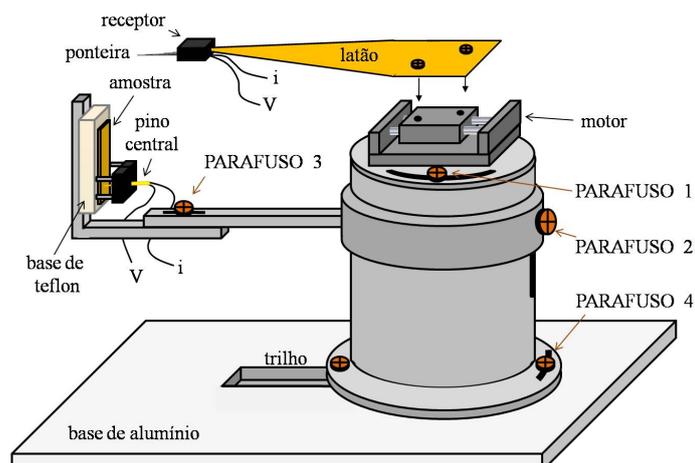


Figura 3.7: Esquema de conjunto porta-amostra e aproximador.

Aproximada a ponteira, o conjunto é posicionado entre os pólos de um eletroímã circular, que pode atingir campos magnéticos de até 3.000 Oe. Todo esse sistema é posicionado sobre uma placa de mármore suspensa por cordas elásticas dentro de uma caixa acústica de tal forma que qualquer vibração mecânica seja blindada.

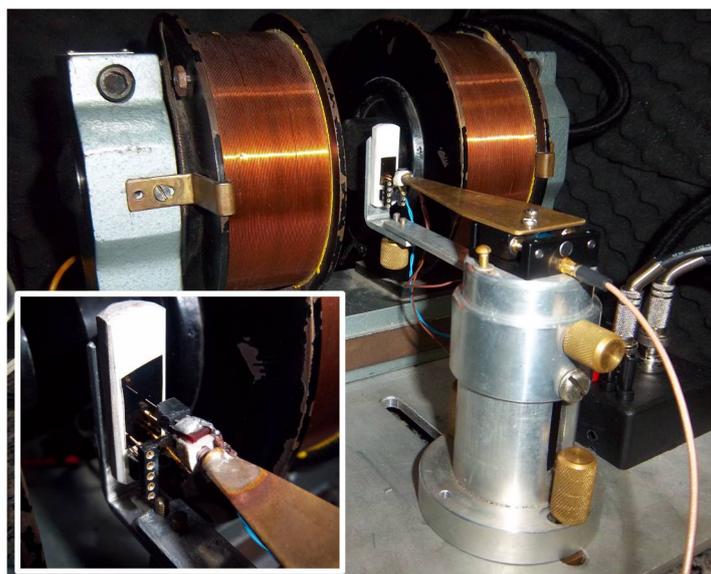


Figura 3.8: Fotografia do sistema de medidas.

A aproximação da ponteira é feita em duas etapas: a primeira é manual, em que se posiciona a ponta o mais próximo possível da amostra, sempre deixando uma distância segura para evitar danos na sua extremidade; a segunda é feita com a caixa acústica fechada e o controle de contato é feito somente pelo programa computacional do aproximador e pela passagem de corrente pelo sistema. Após esse procedimento, a medida de transferência de spin é iniciada.

4 *Resultados*

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados experimentais. De acordo com as três diferentes configurações de medidas, dividiremos o capítulo em três seções: a primeira tratará de amostras com duas camadas ferromagnéticas e medidas com ponteiros de tungstênio como feitas; na segunda seção estão os resultados usando as mesmas amostras porém as ponteiros são recobertas com uma fina camada de material magnético. Baseado nos resultados obtidos com esse último arranjo, medimos também amostras que possuem somente uma camada ferromagnética via ponteiros com cobertura. O revestimento da ponteira com material magnético, sendo cobalto, permalloy (NiFe) ou ferro, foi fabricado por desbastamento iônico magnético (*sputtering*). Como citado no capítulo anterior, as amostras são:

- i. $SiO_2/Cu(50)/NiFe(15)/Cu(8)/NiFe(3)/Cu(5)$
- ii. $SiO_2/Cu(50 - trilha)/Co(15)/Cu(8)/Co(3)/Cu(5)$
- iii. $SiO_2/Cu(8)/NiFe(6)/Cu(50)$

4.1 **Bicamada magnética e ponteira como feita**

Como já mencionado anteriormente, para esse tipo de sistema esperamos uma histerese na medida de *resistência × corrente*. Para a amostra *i*, composta por duas camadas de NiFe com espessuras diferentes, obtivemos curvas como as da Figura 4.1.

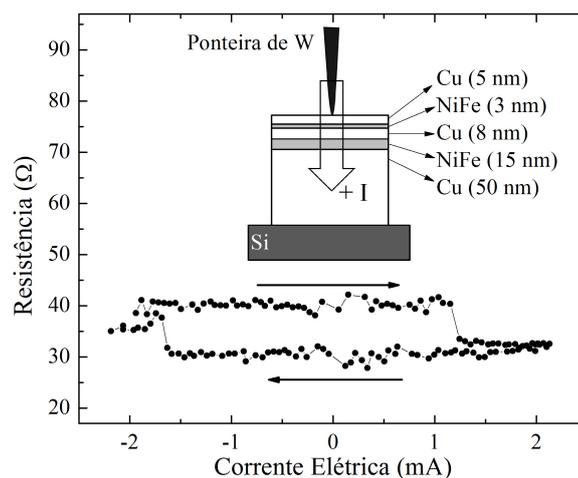


Figura 4.1: Curva obtida na medida da amostra *i*.

Ao variar o campo magnético externo aplicado percebemos um deslocamento da curva com relação à corrente elétrica, como pode ser visto abaixo.

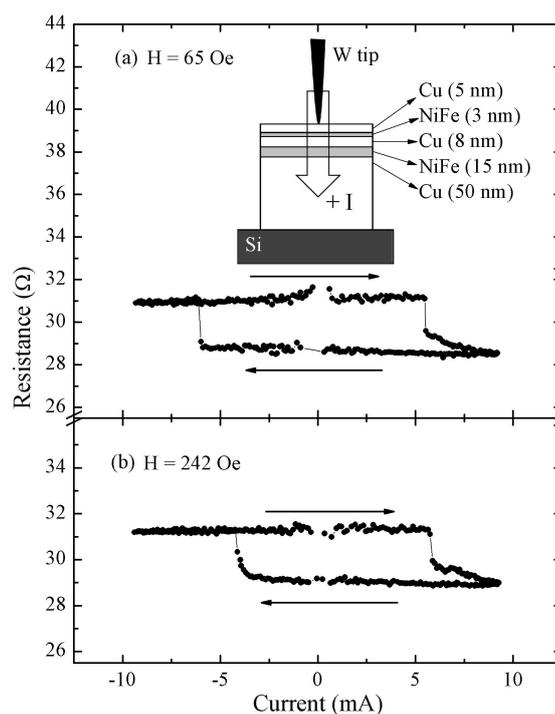
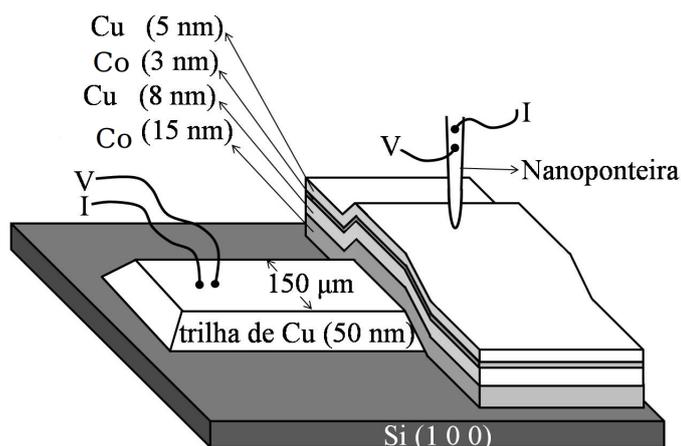


Figura 4.2: Variação do campo magnético externo aplicado afeta valores de corrente crítica.

A fim de verificar a influência do campo magnético sobre o sistema, medimos a amostra *ii*. Para a construção dessa amostra, utilizamos uma máscara em forma de linha para a deposição de uma trilha de cobre abaixo da multicamada conforme a Figura 4.3.

Figura 4.3: Esquema de construção da amostra *ii*.

Foi feita uma série de medidas com diferentes valores de campo magnético externo aplicado sobre o sistema. Nas figuras 4.4 (a-i) observamos que o aumento do módulo do campo dificulta o retorno do sistema para a configuração de magnetizações antiparalelas. Isso porque a magnetização das duas camadas ferromagnéticas, quando paralelas, estão alinhadas com o campo. Dessa forma são necessários muitos portadores de spin para gerar um torque suficiente sobre a magnetização da camada livre. Na última imagem a curva volta ao seu estado inicial, já que nenhum campo está sendo aplicado.

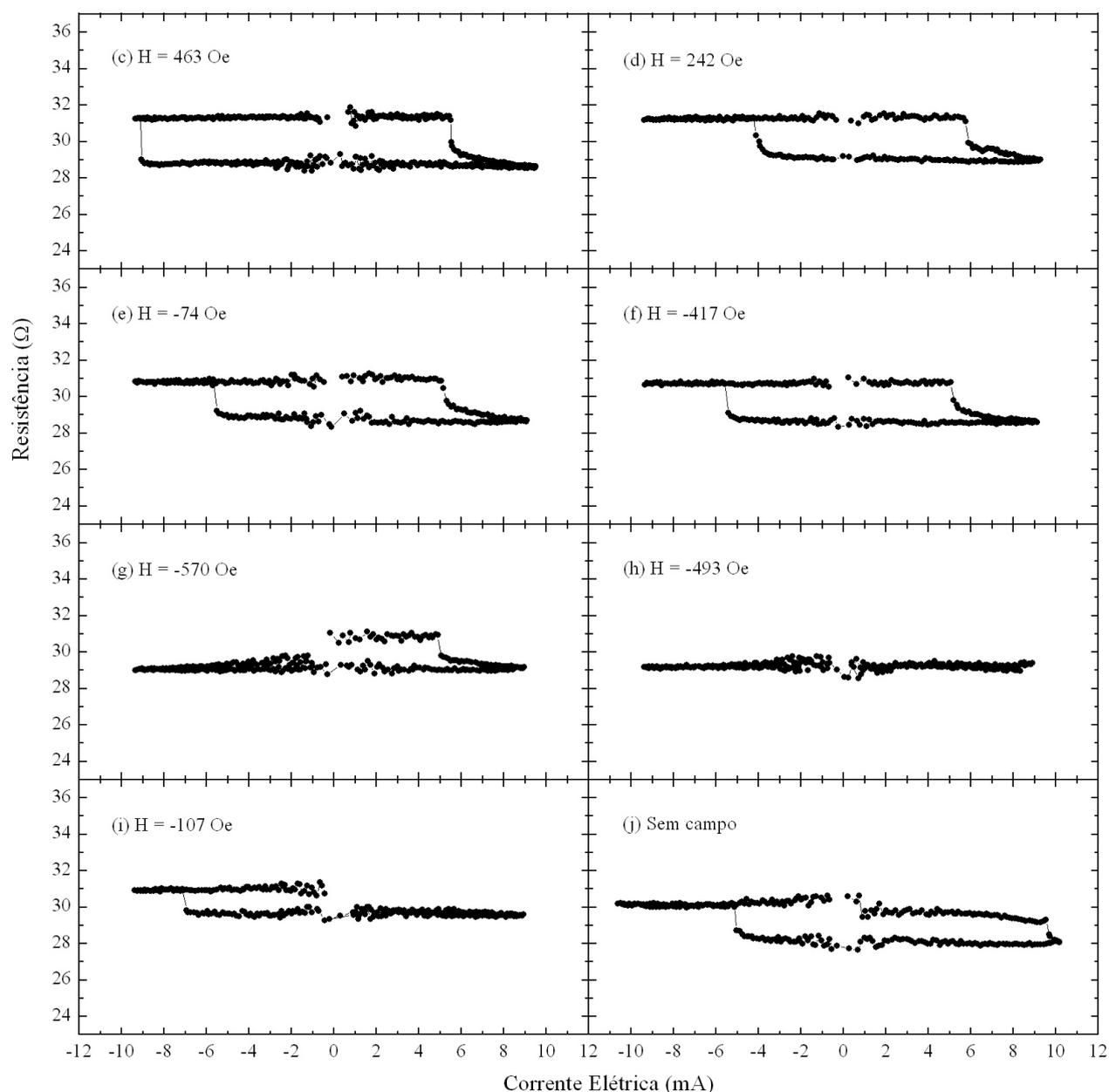


Figura 4.4: Medidas da amostra *ii* com variação do campo externo aplicado.

4.2 Bicamada magnética e ponteira coberta

Ao depositarmos uma camada de material ferromagnético sobre a ponteira, adicionamos um novo parâmetro, o qual deverá atuar sobre a polarização da corrente. De fato, foi observada uma variação na curva $R \times i$ que é atribuída, como a vista na Figura 4.5. O comportamento dependente da corrente apresentou-se invertido. Ou seja, a configuração antiparalela ocorre para correntes positivas, diferente do caso da ponteira como feita, em que a inversão ocorre com correntes negativas.

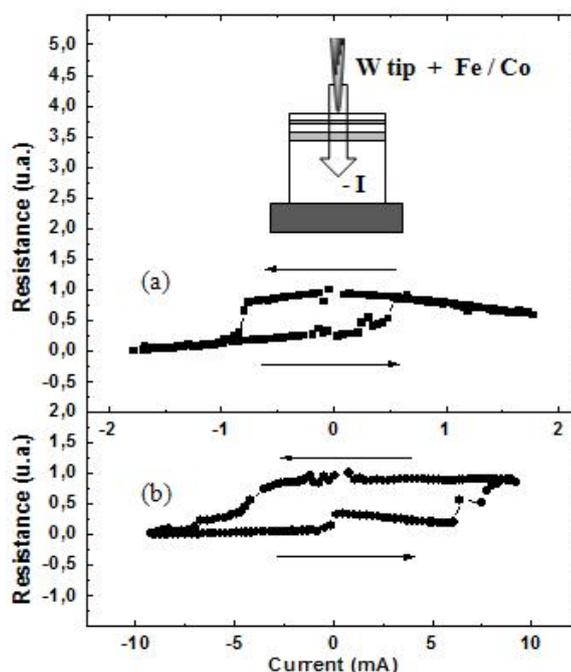


Figura 4.5: Formas de curvas obtidas em medidas com ponteiras magnéticas. No instante inicial a resistência do sistema é a mais baixa.

Este comportamento sugere que a polarização da corrente ocorre na ponteira. Se esta suposição for verdadeira não seria necessário a inclusão da camada polarizadora no filme. Nas medidas da amostra *i* encontramos a Figura 4.6.

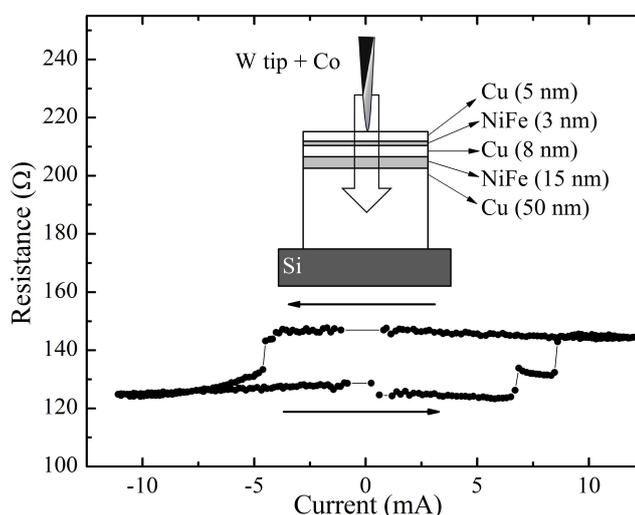


Figura 4.6: Medida feita com ponteira coberta de cobalto.

Um outro experimento foi realizado com o objetivo de analisar a contribuição dos efeitos térmicos e de retificação. O procedimento foi interromper a medida em um estado antiparalelo e esperar a relaxação térmica. Esses efeitos, se significativos, deveriam levar o sistema ao estado inicial. Entretanto, não foi observada variação entre o último ponto da primeira medida e o pri-

meiro da nova curva. Portanto, podemos concluir que esses efeitos não são importantes para o experimento $R \times i$.

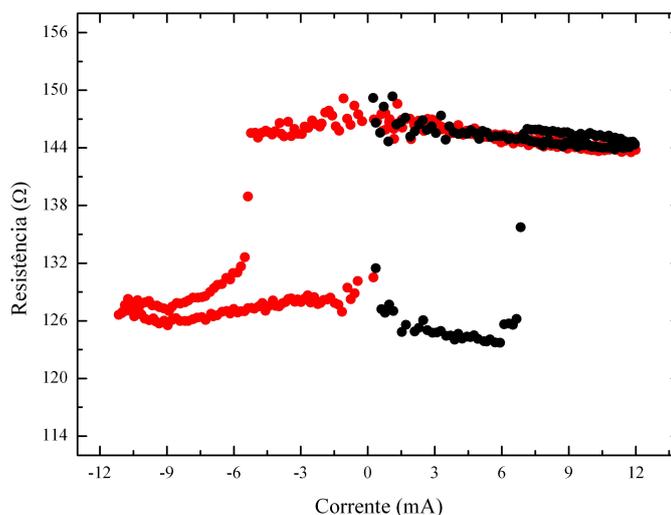


Figura 4.7: Duas curvas sobrepostas para testar se curva é devida à transferência de spin, tal que a primeira medida foi interrompida na metade. O tempo de espera entre as duas medidas foi de 150 segundos.

4.3 Uma camada magnética com ponteira coberta

A fim de confirmar a hipótese de que a camada ferromagnética sobre a ponteira assume o papel de polarizadora, construímos amostras com somente uma camada ferromagnética. Dessa forma, se não houver polarização efetiva dos spins eletrônicos na ponteira não veremos o efeito de transferência de spin na curva de resistência.

A curva obtida foi similar às medidas anteriores, confirmando a suposição de que a polarização se dá na ponteira coberta, como pode ser visto na Figura 4.8.

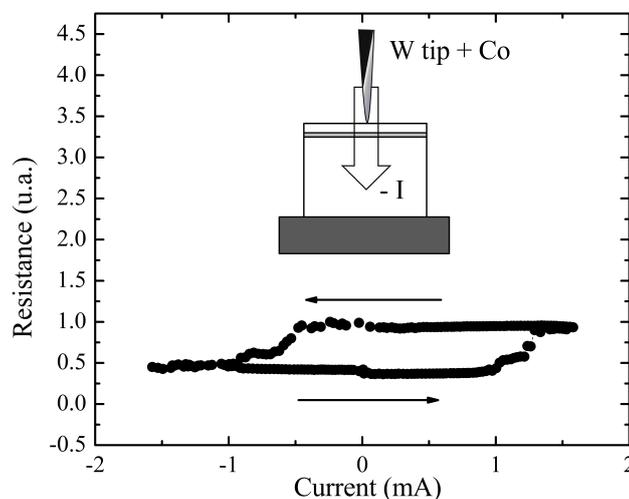


Figura 4.8: Exemplo de curva obtida em sistema composto por ponteira coberta com cobalto e amostra com uma camada ferromagnética.

As medidas das amostra *iii* com ponteiros cobertas com permalloy apresentaram o mesmo comportamento.

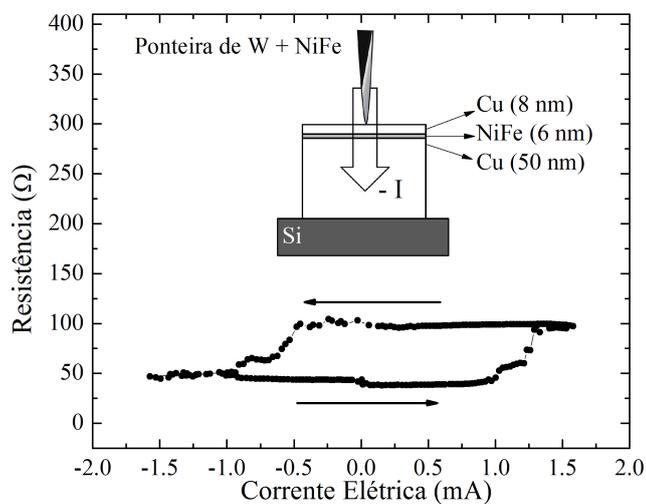


Figura 4.9: Medida feita na amostra *iii* e ponteira coberta com cobalto.

Analisando as Figuras 4.4, 4.6 e 4.9 é possível observar que a variação da resistência para as duas últimas (ponteiros cobertas) é significativamente maior, aproximadamente 25% para a segunda e 50% para a terceira, em comparação com os 15% da primeira.

4.4 Discussão de resultados

Para melhor entender os resultados, nos utilizamos de dois diagramas esquemáticos relativos ao efeito de transferência de spin para os casos: I) ponteira com feita e II) ponteira com cobertura magnética, como pode ser visto nas Figuras 4.10 e 4.11.

Lembrando que a magnetização do ferromagneto obedece a relação $\vec{M} \propto (n_{\uparrow} - n_{\downarrow})$.

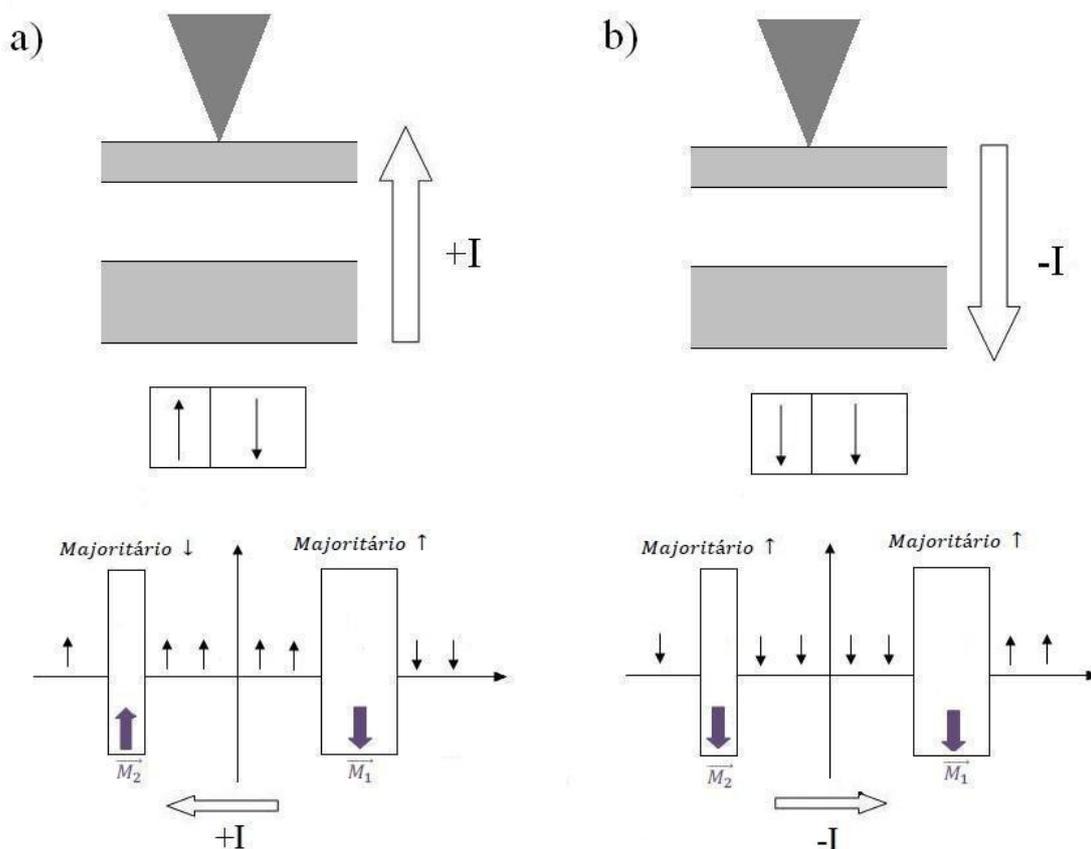


Figura 4.10: Esquema de sistema com ponteira como feita para a) correntes positivas e b) correntes negativas. As setas pretas no último gráfico indicam o sentido de spin e as roxas a magnetização da camada.

Na Figura 4.10 há a composição de três figuras: a figura superior indica o sentido da corrente elétrica no arranjo experimental; a imagem do meio demonstra o sentido relativo entre as magnetizações das camadas ferromagnéticas que constituem o sistema e na última está apresentado como os spins se propagam na amostra.

Observando essa última imagem fica mais simples entender como o transporte é dependente de spin. Para a Figura 4.10(a), em que a corrente é positiva, os spins majoritários da camada F_1 (mais grossa) spins up, não sofrerão resistência ao percorrê-la. Por outro lado, os spins down, minoritários, sofrerão resistência ao movimento, gerando uma zona de acumulação destes no lado direito da camada. Como os spins up estão em maior número a esquerda de F_1 , eles transferem parte do seu momento angular de spin para a magnetização \vec{M}_2 por interação de troca, o que a faz assumir uma configuração antiparalela com \vec{M}_1 . Essa é o arranjo que resulta na resistência mais alta observada na curva $R \times i$.

De maneira inversa, quando a corrente é negativa, como na Figura 4.10(b), os elétrons com spins minoritários da camada F_1 , nesse caso os down, ficam acumulados a esquerda da camada,

enquanto que os majoritários a atravessam sem grande espalhamento. Devido à acumulação de spins down entre os dois ferromagnetos, a magnetização de F_2 sofrerá um torque, tal que ela se alinhará paralelamente com \vec{M}_1 . Essa configuração resulta em baixa resistência do sistema.

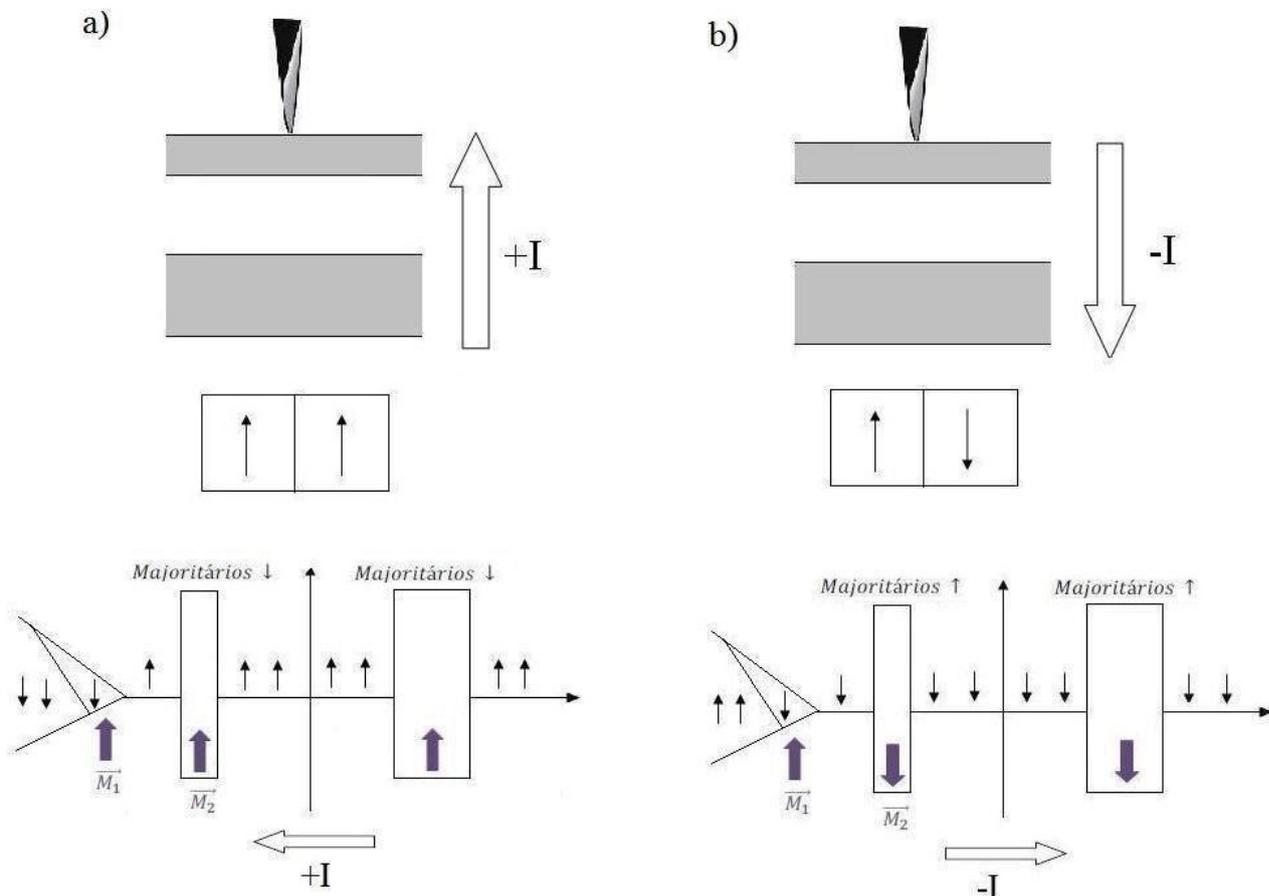


Figura 4.11: Esquema de sistema com ponteira com cobertura magnética para a) correntes positivas e b) correntes negativas. As setas pretas no último gráfico indicam o sentido de spin e as roxas a magnetização da camada.

Para o caso da inclusão de mais uma camada ferromagnética a situação se inverte. Como pode ser visto da Figura 4.11(a), quando a corrente é positiva e for atravessar a cobertura ferromagnética da ponteira, somente os elétrons com spins majoritários (down), com relação a magnetização da ponta, conseguirão. Os spins minoritários (up) ficarão acumulados no filme de tal forma que as magnetizações das camadas grossa e fina da amostra absorverão parte do momento angular de spin dos elétrons da corrente elétrica e, assim, assumirão uma configuração paralelo com relação a \vec{M}_1 . Como nesse caso a presença do material ferromagnético na ponteira força os spins a assumirem um dos estados possíveis, a polarização é maior em comparação com o caso em que a polarizadora estivesse no filme. Dessa forma, o filme se comporta como se contesse somente um ferromagneto. O estado descrito é o de menor resistência na curva $R \times i$.

Quando a corrente é negativa, somente os spins majoritários com relação a \vec{M}_1 conse-

guirão atravessar a ponteira. Os spins minoritários, nesse caso os up, serão acumulados na ponta e os majoritários, down entram no filme. Portanto, as magnetizações das camadas do filme se alinharão antiparalelamente com a da ponteira, como visto na figura. Esse estado é o de maior resistência da medida $R \times i$. Esses dois casos, dessa forma, concordam com o experimento.

5 *Conclusões e Perspectivas*

Neste trabalho foi realizada uma série de experimentos em sistemas nanoscópicos visando à observação do fenômeno de transferência de spin via nanoponteiras de tungstênio. Tanto as amostras de filmes finos como as pontas foram fabricadas no Laboratório de Magnetismo da UFRGS. O sistema de medidas construído para o experimento é bastante sensível, já que a aproximação da ponteira com relação à amostra deve ser lenta o suficiente para manter a sua integridade e a estabilidade mecânica durante o processo de aquisição de dados. Por esse motivo, não é possível medir uma grande quantidade de amostras em um curto intervalo de tempo. Além disso, as amostras fabricadas, principalmente as que possuíam trilhas, também são sistemas que requerem cuidado.

Os resultados do trabalho podem ser divididos em duas partes:

- I. Observação do efeito de transferência de spin via ponteiras como feitas (tungstênio puro);
- II. Observação do efeito via ponteiras com cobertura de material magnético.

No primeiro caso foi constatado que o comportamento resistivo do sistema apresentava variação brusca, a qual associamos ao efeito de magnetorresistência gigante: quando as magnetizações das camadas ferromagnéticas assumem diferentes configurações relativas, devido à transferência de spin. No segundo caso houve uma inversão na dependência da curva $R \times i$. Esse comportamento pode ser entendido assumindo que o papel de camada polarizadora passa a ser da camada sobre a ponteira.

Estes resultados mostram que as ponteiras, as quais são dispositivos simples e eficientes, nos permitem medir a transferência de spin sem necessitar de sistemas complexos e caros como nanopilares. Essa ferramenta apresenta grande potencial tecnológico, já que reduziria custos de fabricação e simplificaria o método hoje empregado de gravação e leitura de dados, como nas memórias MRAM.

As perspectivas para futuros trabalhos na área são muitas. Dentre elas estão:

- a. Análise detalhada de processo de polarização de spin que acontece na ponteira.

- b. Quais motivos são significativos para aumento no efeito de transferência de spin quando as amostras são medidas com ponteiros recobertas.
- c. Estudo de efeitos térmicos que influenciam as medidas.
- d. Possibilidade de utilizar as ponteiros de tungstênio em sistemas magnéticos para análise do efeito de hiperfrequência.

Bibliografia

- [1] M. N. B. et al., “Giant magnetoresistance of (001)fe/(001)cr magnetic superlattice,” *Physical Review Letters*, vol. 61, no. 21, p. 2472 a 2475, 1988.
- [2] F. W. G. Binasch, P. Grünberg, “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange,” *Physical Review B*, vol. 39, p. 4828, 1989.
- [3] J. C. Slonczewski, “Current-driven excitation of magnetic multilayers,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 159, no. 1-2, p. L1 a L7, 1996.
- [4] L. Berger, “Emission of spin waves by a magnetic multilayer traversed by a current,” *Physical Review B*, vol. 54, p. 9353, 1996.
- [5] J. B. W.-C. C. M. S. V. T. M. Tsoi, A. G. M. Jansen and P. Wyder, “Excitation of a magnetic multilayer by an electric current,” *Physical Review Letters*, vol. 80, p. 4281, 1998.
- [6] N. F. Mott, “The electrical conductivity of transition metals,” *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 153, p. 699 a 717, 1936.
- [7] A. Fert, “Nobel lecture: Origin, development, and future of spintronics,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 80, p. 1517 a 1530, 2008.
- [8] J. Slonczewski, “Currents and torques in metallic magnetic multilayers,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 247, p. 324 a 338, 2002.
- [9] R. O. R. R. da Cunha, *Transferência de Spin em Nanopilares e Nanocontatos Magnéticos*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- [10] J. R. R. E. B. Myers, D. C. Ralph, “Current-induced switching of domains in magnetic multilayers devices,” *Science*, vol. 285, p. 867 a 870, 1999.
- [11] H. A. Brataas, A. D. Kent, “Current-induced torque in magnetic materials,” *Nature materials*, vol. 11, p. 372 a 381, 2012.
- [12] A.-S. Lucier, “Preparation and characterization of tungsten tips suitable for molecular electronics studies,” Master’s thesis, McGill University - Center for the Physics of Materials, 2004.
- [13] Y. G. Bing-Feng Ju, Yuan-Liu Chen, “The art of electrochemical etching for preparing tungsten probes with controllable tip profile and characteristic parameters,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, p. 013707, 2011.
- [14] M. Heinemann, *Fabricação e Caracterização de Nanoponteiras de Tungstênio para Medidas de Transferência de Spin*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso.

- [15] M. M.-J. L. R.O.Cunha, D.L.Baptista, “Reference layer exchange in spin transfer torque experiment using magnetic-coated nanometric point contacts,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 324, p. 3002 a 3005, 2011.