

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
“PROPIEDADES MAGNETORESISTIVAS DE SISTEMAS  
MULTICAPA DE PELÍCULAS DELGADAS”**

**PRESENTADO POR:  
AMÉRICO MEJÍA LÓPEZ  
OSCAR MAURICIO OLMEDO MARTÍNEZ**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:  
LICENCIADO EN FÍSICA**

**SAN SALVADOR, EL SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2003**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
“PROPIEDADES MAGNETORESISTIVAS DE SISTEMAS  
MULTICAPA DE PELÍCULAS DELGADAS”**

**PRESENTADO POR:  
AMÉRICO MEJÍA LÓPEZ  
OSCAR MAURICIO OLMEDO MARTÍNEZ**

**ASESOR:**

**PHD. RAFAEL GÓMEZ ESCOTO**

**SAN SALVADOR, EL SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2003**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA  
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN  
“PROPIEDADES MAGNETORESISTIVAS DE SISTEMAS  
MULTICAPA DE PELÍCULAS DELGADAS”**

**PRESENTADO POR:  
AMÉRICO MEJÍA LÓPEZ  
OSCAR MAURICIO OLMEDO MARTÍNEZ**

**ASESOR: \_\_\_\_\_  
PHD. RAFAEL GÓMEZ ESCOTO**

**SAN SALVADOR, EL SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2003**

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

RECTOR: DRA. MARIA ISABEL RODRÍGUEZ

SECRETARIA GENERAL: LICDA. LIDIA MARGARITA MUÑOZ  
DE VELA

FISCAL GENERAL: LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR

## **FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

DECANO: LIC. LETICIA NOEMÍ PAÚL DE FLORES

SECRETARIA: LICDA. MARTA NOEMÍ DE ROSALES

DIRECTOR DE LA  
ESCUELA DE FÍSICA: M. Sc. ROSENDO PICHINTE A.

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2003**

## **DEDICATORIA**

- ❖ A mis padres Esperanza Bernandina López Quezada y Francisco Américo Mejía Bolaines.
- ❖ A mis amigos por todo su apoyo.

**Américo Mejía López**

Dedico toda mi carrera:

- ❖ A Dios Omnipotente. Por infundirme su hálito de Vida desde el principio hasta el final en esta etapa de mi vida.
- ❖ A mis padres: Óscar Emilio Olmedo y Marina Estela Martínez de Olmedo. Que gracias a su ayuda completa y desinteresada logré culminar con mis estudios universitarios.
- ❖ A mis hermanos: Edwar Emilio Olmedo Martínez y Osear Enrique Olmedo Martínez. Que por medio de sus palabras de aliento me impulsaron a terminar con mi carrera.
- ❖ A mis [amig@s](#) que de una forma u otra han estado conmigo.

**Oscar Mauricio Olmedo Martínez**

## AGRADECIMIENTOS

*A nuestro asesor de tesis:*

- ❖ Ph. Dr. Rafael Gómez Escoto. Que se mantuvo siempre pendiente en cada paso de este largo caminar, impulsándonos a continuar aún en los momentos más difíciles.

*A los observadores asignados por la Escuela de Física:*

- ❖ Lic. Luis Alfonso Alvarenga y Msc. Víctor Cortéz. Que con sus aportaciones y sugerencias a las diferentes partes del manuscrito legan a la Escuela de Física una mejor fuente de consulta para los alumnos que deseen continuar en el área del Estado Sólido.

*En la parte metodológica, se quiere perpetuar el agradecimiento en esta tesis al:*

- ❖ Sr. Tomas Emilio Caprín. Que de manera incondicional con su gran experiencia apoyó y orientó la construcción y modificación de piezas y montajes esenciales para llevar a feliz término la metodología de este trabajo de graduación. En forma especial, se le agradece por la construcción de la Fuente de Corriente Directa, sin la cual no hubiera sido posible caracterizar magnetoresistivamente las muestras.

*En la parte de la adquisición de equipo nuevo, se le agradece de manera particular a la:*

- ❖ Dra. Dina Larios de López. Que no escatimó esfuerzos para ayudarnos en la búsqueda y obtención de algún equipo (crisoles y medidor de campo magnético) en los E.U., lugar donde ella reside actualmente.

***Américo Mejía López***

**Oscar Mauricio Olmedo Martínez**



2.2.2	Colocación de la muestra en el montaje del Método de las Cuatro Puntas	37
2.2.3	Toma de datos	38
<b>Capítulo 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>		<b>42</b>
3.1	Elaboración de las muestras	42
3.2	Resultados de las muestras elaboradas con el método de evaporación al vacío	45
3.3	Resultados de las muestras elaboradas con el método de Sputtering	49
<b>Capítulo 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>58</b>
4.1	CONCLUSIONES	58
4.2	RECOMENDACIONES	61
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>63</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>66</b>

# INDICE DE FIGURAS

<b>Capítulo 1</b>	Pag.
<i>Figura 1.1: Dependencia de la magnetización espontánea de un ferromagnético contra la temperatura. [Pavlov, 1987]</i>	4
<i>Figura 1.2: Representación esquemática del intercambio directo</i>	7
<i>Figura 1.3: Representación esquemática del Superintecambio</i>	8
<i>Figura 1.4: Representación esquemática del intercambio doble</i>	8
<i>Figura 1.5: Representación esquemática del intercambio indirecto (RKKY)</i>	9
<i>Figura 1.6: Interacción RKKY: Se esquematiza el periodo de oscilación de la interacción con el parámetro de la red, oscila entre ferromagnético y antiferromagnético con la distancia. [Hartmann, 2000]</i>	10
<i>Figura 1.7: Sistema Multicapa: Acoplamiento antiferromagnético de las sucesivas capas magnéticas.</i>	14
<i>Figura 1.8: Representación esquemática de la densidad de estados en un metal de transición. [Gómez, 1998]</i>	17
<i>Figura 1.9: Sistema Multicapa: Dispersión para los dos canales de conducción (<math>\rho \uparrow \approx \rho \downarrow</math>)</i>	18
<i>Figura 1.10: Sistema Multicapa: Acoplamiento Ferromagnético de las sucesivas capas magnéticas.</i>	19
<i>Figura 1.11: Efecto GMR: Comportamiento de la resistencia respecto al campo magnético. [Parkin, 1993]</i>	20
<i>Figura 1.12: Período de acoplamiento oscilatorio para distintos metales</i>	21
<i>Figura 1.13: Intensidad del acoplamiento de intercambio para capas de <math>Ni_{80}Co_{20}</math> a través del metal espaciador Ru. [Parkin, 1993]</i>	22

## Capítulo 2

- Figura 2.1: Arreglo multicapa, 1. Sustrato, 2. Capa Buffer, 3. Metal no magnético, 4. Metal magnético. \_\_\_\_\_ 23
- Figura 2.2: Máquina Evaporadora: 1. Cámara de evaporación, 2. Medidor Penning Edwards Mod.8, 3. Bomba de difusión (Diffstak Edwards Mod.150M), 4. Consola, 5. Palanca A, 6. Medidor piranni Edwards Mod. 11, 7. Palanca B, 8. Bomba mecánica (Edwards Mod. EDM2), 9. Selector de corriente., 10. Cable de medición de corriente. \_\_\_\_\_ 26
- Figura 2.3: Montaje dentro de la cámara de evaporación: 1. Penning Edwards Mod. 8, 2. Electrodo, 3. Crisoles (Tungsteno), 4. Porta muestras, 5. Cristal medidor de espesores, 6. Soporte, 7. Soporte para electrodos, 8. Conexión para cristal medidor de espesores. \_\_\_\_\_ 28
- Figura 2.4: Esquema de los haces moleculares de los materiales hierro y cobre, “d” es la distancia de separación entre los crisoles, “h” es la altura entre el sustrato y los crisoles (fuentes de emisión de partículas). \_ 29
- Figura 2.5: Electrodo en la cámara de vaporación: 1. Electrodo común, 2. Cables de alimentación de corriente del transformador. \_\_\_\_\_ 30
- Figura 2.6: Palanca A y Palanca B de la maquina evaporadora \_\_\_\_\_ 31
- Figura 2.7: Geometría CIP (Current in Plane) \_\_\_\_\_ 34
- Figura 2.8: Geometría CPP (Current Perpendicular to Plane) \_\_\_\_\_ 34
- Figura 2.9: Montaje experimental del Método “Prueba de las Cuatro-Puntas”. [Smits, 1958] \_\_\_\_\_ 35
- Figura 2.10: Montaje de las cuatro puntas: 1. Muestra, 2. Contactos, 3. Soporte para la muestra (elaborado en plexiglás). \_\_\_\_\_ 37
- Figura 2.11: Circuito para medir resistividad en las muestra. 1. Muestra, 2. Milivoltímetro, 3. Fuente de corriente constante, 4. Contactos. \_\_\_\_ 39
- Figura 2.12: Electroimán utilizado para medir la magnetorresistencia en las muestras \_\_\_\_\_ 40

### **Capítulo 3**

<i>Figura 3.1: Arreglo Multicapa Elaborado: A) Sustrato, B) Capa Buffer, C) Capas magnéticas y no magnéticas, D) Capa protectora</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.2: Efecto GMR para la muestra 01: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 8 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.3: Efecto GMR para la muestra 02: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 7 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.4: Efecto GMR para la muestra 03: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 8 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3.5: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 01</i>	<i>55</i>
<i>Figura 3.6: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 02</i>	<i>56</i>
<i>Figura 3.7: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 03</i>	<i>57</i>

## INDICE DE ANEXOS

Pag.

*Anexo 1: Método de las cuatro puntas* \_\_\_\_\_ 67

*Anexo 2: Datos en bruto, magnetorresistencia de las muestras* \_\_\_\_\_ 69

*Anexo 3: Cuadro Resumen de las Muestras* \_\_\_\_\_ 76

## RESUMEN

Los sistemas multicapa han atraído la atención en las últimas décadas, en gran parte por la posibilidad de crear metales artificiales con nuevas propiedades. La estructura que se estudió en este trabajo de investigación es la más sencilla, y esta formada de películas delgadas de los metales ferromagnéticos: Fe ó Co y el metal no magnético Cu dispuestos alternadamente.

El estudio Teórico - Experimental se limitó a abordar exclusivamente el Efecto Magnetoresistivo Gigante (Efecto GMR) en un sistema multicapa como el descrito anteriormente. Con el fin de cumplir los objetivos propuestos en la investigación los sistemas multicapa de películas delgadas se fabricaron con la técnica de “Evaporación al Vacío”, para posteriormente caracterizar sus propiedades magnetoresistivas a través del arreglo llamado “Método de las Cuatro Puntas”. Sin embargo, a pesar de haber superado una amplia variedad de problemas de orden experimental tanto en la elaboración de estos sistemas como en la medición de sus propiedades, estas presentaron variaciones en sus resistividades entre el 1 al 2%, al ser sometidas a diferentes intensidades de campo magnético dentro de un rango de 0 a 1200 mT en ambas polaridades del mismo. Variaciones magnetoresistivas de este orden dan lugar a especular que probablemente tengan su origen en el Efecto Magnetoresistivo Anisotrópico (Efecto AMR). Con el fin de complementar el estudio, se recurrieron a muestras elaboradas con el método de Sputtering en una Universidad de Alemania, las que, al medirles sus propiedades magnetoresistivas presentaron una variación entre el 16 y 18% en sus resistividades, una alta simetría en su magnetoresistencia en ambos sentidos de campo magnético, características propias de un Efecto GMR; permitiendo así abrir un nuevo campo de investigación en la Escuela de Física, mediante la adquisición de nuevos conocimientos y la puesta a punto del equipo, logrando el desarrollo en torno a los sistemas multicapa y en general a la Física del Estado Sólido en nuestro país.

## INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades magnetoresistivas de sistemas multicapa de películas delgadas, surge de la necesidad de abrir un nuevo campo de estudio en la escuela de Física, orientada a las ciencias de los materiales y específicamente a la física de las películas delgadas, debido a la gran importancia que tienen este tipo de materiales en diversas áreas de aplicación como en la de sensores, así como en diversas áreas de la tecnología, específicamente en aquellas relacionadas con el almacenamiento de datos.

Con este fin se planteo el problema de elaborar sistemas multicapa con el método de evaporación al vacío, para después caracterizar sus propiedades magnetoresistivas, utilizando el sistema más simple de este tipo, que es aquel que consta de sucesivas capas alternas de un material magnético (Fe ó Co) y uno no magnético (Cu).

El problema antes mencionado se abordó en la presente investigación planteando el objetivo de hacer un estudio de las propiedades magnetoresistivas de películas delgadas, de forma cualitativa y cuantitativa en materiales ferromagnéticos. Para lograr esto fue necesario conocer en primer lugar, los aspectos teóricos relacionados con los sistemas multicapa, así como una serie de características que determinan las propiedades físicas de los metales involucrados en este tipo de arreglos.

Una vez se logró esto se procedió a trabajar en función de poner a punto el equipo para elaborar sistemas multicapa, lo cual involucró hacer una serie de adaptes, modificaciones y reparaciones a la maquina evaporadora, con el fin de hacer evaporaciones dobles controlando y midiendo cada uno de los espesores de las películas evaporadas. Enseguida se procedió a la elaboración de las

muestras, partiendo de evaporaciones de una sola capa buscando con esto determinar los parámetros experimentales adecuados para evaporar cada material, logrando finalmente elaborar sistemas con múltiples capas. Una vez elaboradas las muestras se midieron sus propiedades magnetoresistivas utilizando para ello el “método de las cuatro puntas”.

Finalmente con el fin de complementar el estudio en torno a las propiedades magnetoresistivas de sistemas multicapa de películas delgadas, se midieron muestras elaboradas con el método de Sputtering en la Universidad Técnica Superior de Darmstadt, Republica de Alemania.

Desde el punto de vista experimental la presente investigación tuvo como principal limitación la antigüedad de algunos de los equipos utilizados, lo cual limitó ó retraso el logro algunas de las metas planteadas. Específicamente resulto difícil, en algunos casos, tener control sobre el espesor de las películas evaporadas.

La investigación tuvo los siguientes alcances:

- ❖ Se adaptó con éxito el equipo de la escuela de Física para elaborar sistemas multicapa.
- ❖ Se pudo elaborar con éxito sistemas multicapa, controlando y midiendo los espesores de las películas evaporadas.
- ❖ Con el método de las cuatro puntas y con un arreglo para este fin se midieron con éxito las propiedades magnetoresistivas de las muestras elaboradas.

El presente trabajo se organizo de la siguiente manera: Introducción, Objetivos, Marco teórico, Metodología, Conclusiones y Recomendaciones, Bibliografía y Anexo.

# OBJETIVOS

## General

Hacer un estudio de las propiedades magnetoresistivas de sistemas multicapa, de forma cualitativa y cuantitativa en materiales ferromagnéticos.

## Específicos

- I. Conocer la teoría relacionada con los efectos magnetoresistivos en sistemas multicapa de películas delgadas.
- II. Adaptar el equipo para hacer sistemas multicapa con el fin de verificar sus propiedades magnetoresistivas.
- III. Indagar la ocurrencia de efectos magnetoresistivos en sistema multicapa elaborados con el método de evaporación al vacío.
- IV. Medir las propiedades magnetoresistivas de las muestras elaboradas

# Capítulo 1 MARCO TEORICO

Dado que el presente estudio se centra en las propiedades magnetoresistivas de sistemas multicapa de películas delgadas, se considera necesario discutir brevemente algunas bases sobre el ferromagnetismo, explicando el origen de este fenómeno magnético en términos de las interacciones de intercambio para después explicar el efecto GMR en un arreglo multicapa que es el objetivo de nuestra investigación.

## 1.1 Ferromagnetismo

En los sólidos aquellas sustancias que presentan momentos magnéticos intrínsecos los cuales no interactúan unos con otros presentan un comportamiento paramagnético, en estos materiales la susceptibilidad magnética es inversamente proporcional a la temperatura (lo cual es verdadero solo para temperaturas altas)  $\chi = C/T$  (ley de Curie). En ausencia de un campo magnético los momentos del sólido se orientan aleatoriamente, cuando aplicamos un campo magnético estos momentos se orientan en la dirección del mismo y como resultado aparece una magnetización en la dirección del campo, esta magnetización en función del campo magnético y la temperatura según el modelo de Brillouin es [Pavlov, 1987]

$$M = N\mu_B \tanh\left(\frac{\mu_B B}{K_B T}\right) \quad (1)$$

Donde:

N: Número de átomos

$\mu_B$ : Magnetón de Bohr. Es la unidad elemental en el magnetismo.

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A.m}^2$$

$K_B$ : Constante de Boltzman

T: Temperatura del sólido

M: Magnetización (Número de momentos magnéticos por unidad de volumen)

El paramagnetismo se manifiesta en sustancias cuyos electrones en los átomos tienen espines no compensados, es decir en átomos con número impar de electrones o con una capa electrónica interior parcialmente llena, es decir, estos electrones tienen un momento orbital y de espín los cuales hacen contribución al momento magnético. Por otra parte en los átomos e iones que tienen las capas electrónicas completamente llenas tanto el momento orbital como el momento de espín resultan ser nulos, por lo que no presentan un momento magnético resultante.

Sin embargo en los sólidos existe un gran número de sustancias que presentan una magnetización espontánea, es decir, magnetización distinta de cero incluso en ausencia de un campo magnético externo, a estas sustancias se les conoce como Ferromagnéticas. El ferromagnetismo no se presenta a todas las temperaturas, al elevarse esta la magnetización espontánea disminuye y a cierta temperatura  $T_c$  la magnetización desaparece, siendo este valor de temperatura una medida de la fuerza de la interacción magnética. Las siguientes sustancias manifiestan tener comportamiento ferromagnético:

*Metales del grupo 3d (Fe, Co, Ni)*

*Metales del grupo 4f (Gd, Dy, Tb, Ho, Er y Tm)*

Y además un gran grupo de compuestos químicos y aleaciones. Todos estos materiales presentan tanto estructuras cristalinas como magnetización de saturación ( $M_s$  cuando  $T \rightarrow 0K$ ) diferentes para cada uno, teniendo como

propiedad común átomos con capas d o f incompletas, lo cual conduce a que existan momentos magnéticos intrínsecos en los átomos.

Para explicar el ordenamiento de los momentos magnéticos, es decir, la magnetización espontánea, P. Weiss [Pavlov, 1987] supuso que en los ferromagnéticos existía un campo molecular interno  $B_i$  en analogía al campo magnético externo, que tiende a alinear los momentos en los paramagnéticos, además supuso que este campo molecular es proporcional a la magnetización

$$B_i = \lambda M \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es conocida como la constante del campo molecular. El campo efectivo que actúa sobre los momentos magnéticos en presencia de un campo magnético externo es el siguiente

$$B_{ef} = B_i + B \quad (3)$$

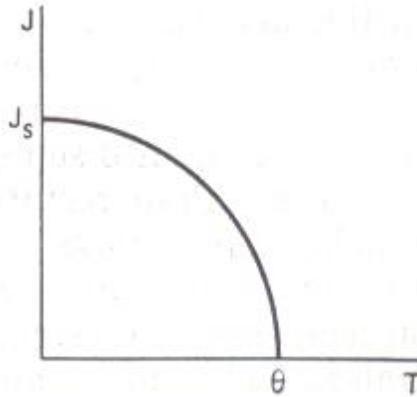
Sustituyendo B por  $B_{ef}$  en la ecuación (1) podemos hallar la magnetización

$$M = N\mu_B \text{TanH} \left( \frac{\mu_B}{K_B T} (B + \lambda M) \right) \quad (4)$$

La cual es conocida como ecuación de Curie – Weiss. La susceptibilidad para los ferromagnéticos viene dada por

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \quad (5)$$

Donde C es la constante de Curie – Weiss, T la temperatura del sólido y  $T_C$  la temperatura de Curie, la dependencia para la magnetización en los ferromagnéticos con la temperatura se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1: Dependencia de la magnetización espontánea de un ferromagnético contra la temperatura. [Pavlov, 1987]**

El modelo empírico planteado por Weiss permitió explicar varias propiedades conocidas por resultados experimentales para los ferromagnéticos, sin embargo no explicaba cual era el origen del campo molecular que ordenaba los momentos magnéticos.

En experimentos realizados por Dorfman y otros [Pavlov, 1987] se demostró que la interacción que ordenaba los momentos no era de origen magnético (esto como aproximación ya que la interacción magnética es pequeña y puede despreciarse sin pérdidas considerables), quedaba entonces suponer que la interacción que llevaba al alineamiento de los momentos magnéticos en los ferromagnéticos era de origen electrostático.

### **1.1.1 Interacción de Intercambio y el Ferromagnetismo**

Frenkel y Heisenberg [Pavlov, 1987] mostraron que, si existe una interacción electrostática intensa entre los electrones, puede resultar conveniente, desde el punto de vista energético, el estado con orientación paralela de los espines, es decir, el estado magnetizado. La interacción eléctrica de dos electrones no

depende de los espines de los electrones, pero la energía total del sistema si. Los cálculos mecanocuánticos detallados de la interacción eléctrica de dos electrones, teniendo en cuenta su momento de espín, conducen a la siguiente conclusión: En la expresión de la energía de interacción resultante, además del término coulombiano puramente clásico, figura un término adicional específicamente cuántico, dependiente de la orientación mutua de los espines. Esta energía adicional recibe el nombre de *energía de intercambio o de canje*. Para el caso más sencillo de dos electrones toma la siguiente forma.

$$E_{\text{int}} = -A(\sigma_1 \cdot \sigma_2) \quad (6)$$

Donde:

A: Integral de intercambio

$\sigma_1, \sigma_2$ . Son los vectores unitarios de los espines

La dependencia de la energía total del sistema respecto de los espines viene dada por el Hamiltoniano de espín [Kagánov, 1985].

$$H_s = \bar{E} - A(\sigma_1 \cdot \sigma_2) \quad (7)$$

Donde  $\bar{E}$  es la energía de interacción electrostática.

Si:

$A > 0$  ( $\sigma_1 \cdot \sigma_2 = 1$ ) el mínimo de energía favorece acoplamiento paralelo

$A < 0$  ( $\sigma_1 \cdot \sigma_2 = -1$ ) el mínimo de energía favorece acoplamiento antiparalelo

Esto es debido a que el estado de mínima energía se presenta cuando esta energía (energía de intercambio) se resta a la energía total del sistema.

Algunas características importantes de la energía de intercambio son las siguientes [Kagánov, 1985]:

- 1) La integral de intercambio es isótropa, es decir, el giro simultáneo de los espines en una misma dirección, no hace variar la energía de intercambio.
- 2) La integral de intercambio depende del valor de la energía electrostática de los electrones, debido a ello, no es pequeña, aunque como regla  $|A| < E$ .
- 3) En el caso de la interacción de intercambio entre átomos esta depende de la separación de los mismos y disminuye con brusquedad (de modo exponencial) a medida esta distancia supera el parámetro de la red.

Si se Generaliza el resultado para un gran número de electrones (un sólido) tenemos

$$H_S = E - \sum_{i,j} A_{ij}(\sigma_1 \cdot \sigma_2) \quad i \neq j \quad (8)$$

La suma se lleva a cabo por todos los átomos del cristal, las integrales de intercambio  $A_{ij}$  disminuyen muy rápidamente con la distancia, por lo que tan solo la interacción de intercambio con los vecinos más próximos es sustancial.

La dependencia de la energía total del sistema con respecto a la orientación paralela o antiparalela es resultado del principio de exclusión de Pauli que impone la antisimetría de la función de onda, es decir, un cambio de signo cuando se permutan dos electrones. Un estado antisimétrico ( $\uparrow\downarrow$ ) de espín esta asociado con un estado orbital simétrico ( $\uparrow\uparrow$ ) y viceversa. El estado simétrico o

antisimétrico del electrón describe movimientos orbitales diferentes, por lo que para cada estado corresponde diferentes energías. Y cual de las dos energías resulta menor depende del problema concreto. Esto conduce a que el estado de mínima energía se presente para ciertos casos con una orientación paralela y en otros antiparalela de los espines electrónicos. [Cahn et al, 1992]

Existen dos tipos de interacción de intercambio que se presentan en los sólidos. [Gomez, 2003]

### 1. Intercambio Directo:

Cuando los orbitales magnéticos de dos átomos vecinos están suficientemente extendidos se presenta una superposición directa entre ellos, lo cual conduce a una interacción efectiva entre los espines de estos átomos. Esta interacción se conoce como intercambio directo, decae exponencialmente con la distancia y es característica de los metales de transición 3d, (Fe, Co y Ni) es decir, de los ferromagnéticos.

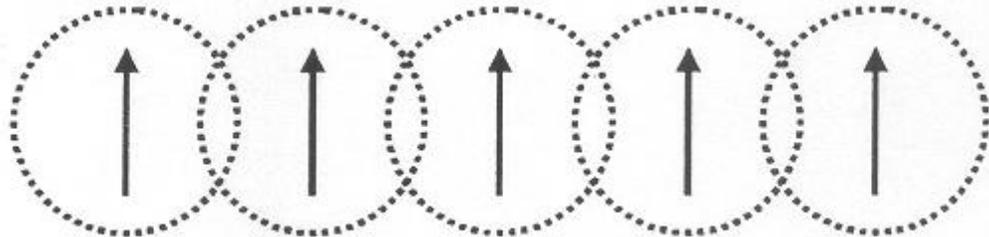


Figura 1.2: Representación esquemática del intercambio directo

### 2. Intercambio indirecto:

Cuando la interacción de los iones magnéticos se realiza indirectamente, es decir, cuando debido a la distancia de separación no hay superposición directa de las funciones de onda y la interacción se lleva cabo a través de un intermediario se dice que se tiene una interacción de intercambio indirecto. Esta se presenta de tres formas diferentes:

**Súper intercambio:** Se presenta cuando los iones magnéticos están separados por un Ion no magnético (es decir un Ion con sus capas electrónicas completamente llenas) la interacción de intercambio se establece por medio de los electrones del Ion no magnético común a ambos. Esto es común en los aislantes.

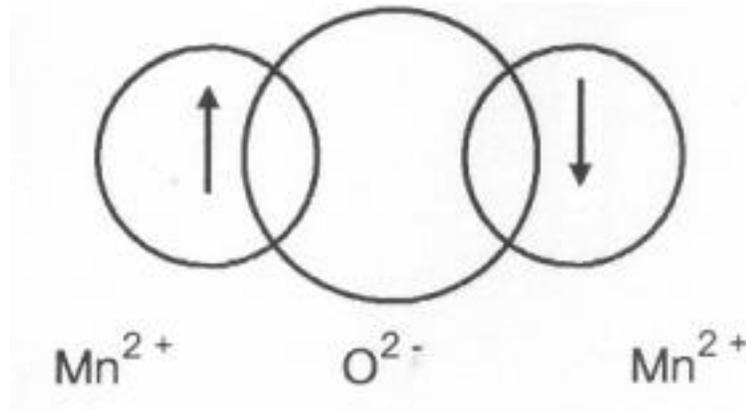


Figura 1.3: Representación esquemática del Superintercambio

**Intercambio doble:** Se observa en materiales semiconductores, sistemas en los cuales los iones magnéticos se presentan en dos estados de valencia diferentes. El intercambio se establece a través de saltos del electrón extra de un Ion a otro utilizando como intermediario el Ion no magnético.

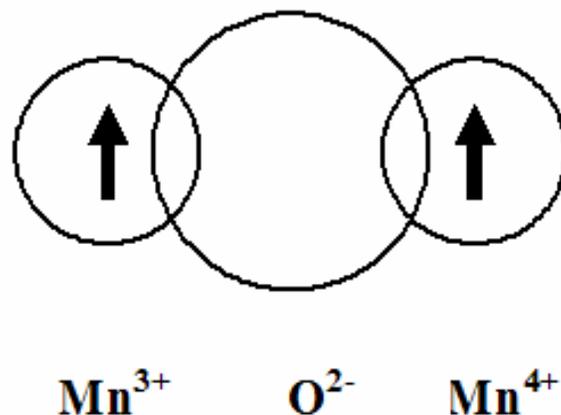
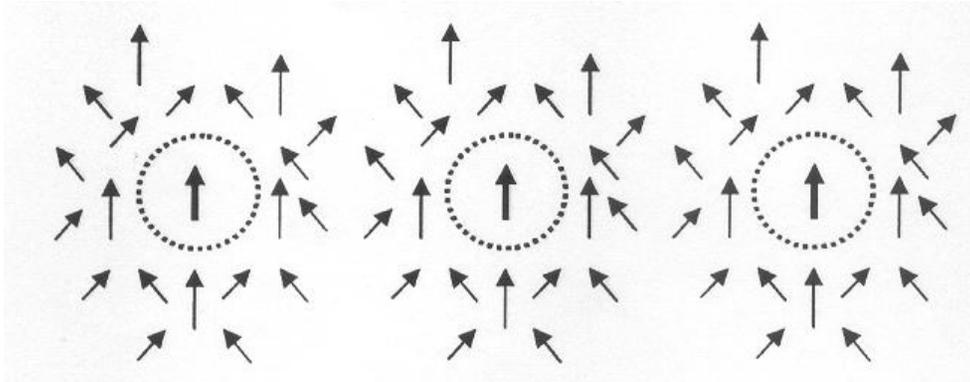


Figura 1.4: Representación esquemática del intercambio doble

**Interacción RKKY:** Llamada así en honor a los físicos que trabajaron en la explicación de este fenómeno (Ruderman y Kittel, 1954; Kasuya, 1956; Yosida, 1957). Se presenta entre momentos localizados en una matriz no magnética, por medio de los electrones de conducción: El momento de espín de un átomo, interactúa con los electrones de conducción (Figura 1.5) que circulan mas o menos libres por la red, los cuales adquieren una polarización determinada en sus espines, transmitiendo de esta forma la información a otros átomos vecinos, produciendo una interacción indirecta entre los momentos magnéticos de espín de los átomos vecinos.



**Figura 1.5: Representación esquemática del intercambio indirecto (RKKY)**

Esta interacción es observada con mayor frecuencia que el intercambio directo, debido a su largo alcance, es característica de los metales y además es de carácter oscilatorio, con un periodo de oscilación relacionado con el parámetro de la red del sólido tal y como se muestra en la Figura 1.6.

El mecanismo que conduce a que la interacción RKKY posea un carácter oscilatorio se debe a que el momento magnético del átomo polariza los electrones de conducción en sus alrededores, los cuales debido al principio de exclusión de Pauli tienden a alejarse unos de otros. Cuando estos electrones llegan a las proximidades de otro Ion magnético se ven igualmente polarizados y

así sucesivamente lo cual conduce a que se presente una oscilación con la distancia de esta interacción.

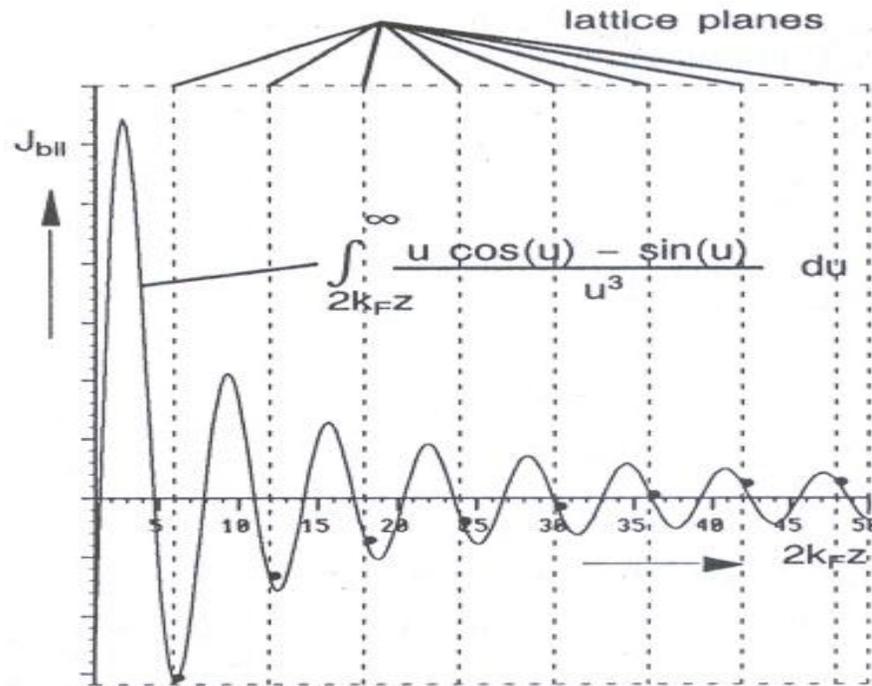


Figura 1.6: Interacción RKKY: Se esquematiza el periodo de oscilación de la interacción con el parámetro de la red, oscila entre ferromagnético y antiferromagnético con la distancia. [Hartmann, 2000]

## 1.2 *Magnetoresistencia en metales*

Es ampliamente conocido que los electrones libres en un metal pueden ser acelerados y conducidos por la acción de un campo eléctrico. En su movimiento a través del potencial periódico del cristal, se oponen las oscilaciones térmicas (fonones) de átomos y moléculas en el cristal, así como todas las alteraciones del potencial periódico de la red, en términos de defectos de la periodicidad de la misma (Defectos estructurales e impurezas). Esta oposición de la red cristalina real al paso de los electrones se conoce como resistencia eléctrica y produce una corriente estacionaria con una velocidad de deriva  $v_d$  para los electrones de conducción. [Pavlov, 1987]

$$\mathbf{v}_d = \left( \frac{e\mathbf{E}}{m^*} \right) \tau \quad (9)$$

Donde:

$\mathbf{E}$ : Campo eléctrico

$m^*$ : masa efectiva de los electrones

$\tau$ : Tiempo de relajación

La densidad de corriente en función de la velocidad de deriva  $v_d$  se puede expresar como:

$$\mathbf{J} = ne\mathbf{v}_d \quad (10)$$

Con  $n$ : Concentración electrónica

Por otra parte según la ley de Ohm, la relación existente entre el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y la densidad de corriente  $\mathbf{J}$ , se puede expresar como:

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E} \quad (11)$$

Donde el factor de proporcionalidad  $\sigma_0$  es un tensor de 2° orden y representa la conductividad eléctrica del material.

Si el material es isótropo, la conductividad eléctrica es un escalar y comparando la ecuaciones 9, 10 y 11 tenemos:

$$\sigma_0 = \frac{ne^2\tau}{m^*} = \frac{1}{\rho} \quad (12)$$

Donde  $\rho$  es la Resistividad eléctrica.

Si ahora, además del campo eléctrico aplicamos un campo magnético  $\mathbf{B}$ , se encuentra que  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{J}$  dejan de ser vectores paralelos, y los electrones de conducción en el cristal se mueven bajo el efecto de una fuerza adicional:

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_d \times \mathbf{B}) \quad (13)$$

Consecuencia de la fuerza eléctrica ( $-e\mathbf{E}$ ) y la fuerza de Lorentz ( $-e\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ )

La fuerza de Lorentz [Pavlov, 1987] obliga a los electrones de conducción a moverse en trayectorias curvilíneas en lugar de rectas que son las que se esperarían si no existiera el campo magnético, aumentando con ello la probabilidad de encontrarse con centros de dispersión, lo cual puede conducir a un aumento en la resistencia eléctrica y por consiguiente una disminución en la conductividad.

En general, se considera que las diferentes contribuciones a la resistividad son aditivas (Regla de Matthiesen) [Gómez, 1998]:

$$\rho = \rho_0 + \rho_p + \rho_m \quad (14)$$

Donde:

$\rho_0$ : Resistividad residual a bajas temperaturas (depende de los defectos e impurezas en el cristal)

$\rho_p$ : Resistividad que depende de los procesos de dispersión debidos a la energía térmica de la red (fonones)

$\rho_m$ : Resistividad como resultado de la dispersión espín dependiente (magnones)

La fracción de la resistencia que resulta como consecuencia de la aplicación de un campo magnético externo  $\mathbf{B}$ , se denomina magnetorresistencia. Esta magnitud es adicional y en realidad se toma como una variación en la resistencia de la forma:

$$\Delta\rho = \frac{\rho(B) - \rho(B = 0)}{\rho(B = 0)} \quad (15)$$

En general este resultado depende de la temperatura, así como de la dirección y magnitud de  $\mathbf{B}$ .

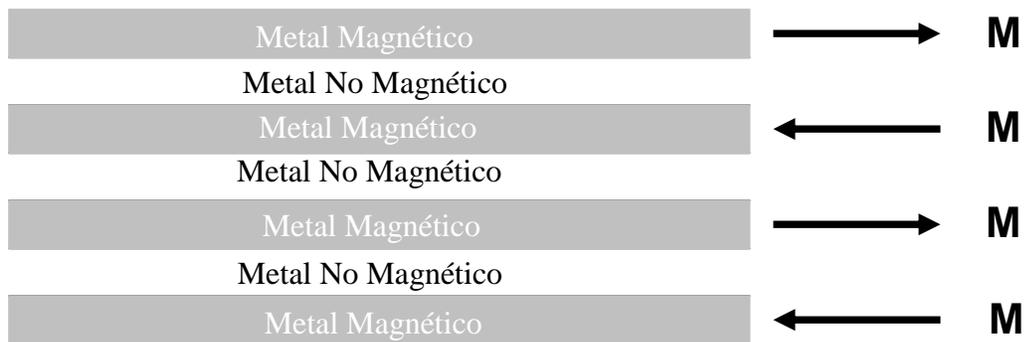
En los materiales ferromagnéticos la magnetorresistencia se debe a la interacción de los electrones de conducción con los momentos localizados en el material. En este caso la magnetorresistencia esta determinada por la dirección de la corriente eléctrica en relación con la dirección de  $\mathbf{B}$  y de la magnetización local.

Existen diferentes efectos magnetoresistivos entre los cuales tenemos: AMR (Efecto Magnetoresistivo Anisotrópico), CMR (Efecto Magnetoresistivo Colosal), TMR (Magnetoresistencia por Efecto Túnel) y GMR (Efecto Magnetoresistivo Gigante) entre otros. El efecto magnetoresistivo de interés para nuestra investigación es el efecto GMR.

### 1.3 Efecto Magnetoresistivo Gigante (GMR)

Los arreglos de sistemas multicapa han atraído el interés de muchos investigadores en las últimas décadas, en gran parte debido a la posibilidad de crear materiales artificiales con nuevas propiedades, resultando en particular de gran interés los sistemas multicapa de materiales magnéticos debido a la gran variedad de aplicaciones tecnológicas que estos tienen, tales como dispositivos de almacenamiento de datos y sensores [Parkin, 1993].

La estructura más simple de este tipo es aquella compuesta por películas alternantes de un metal magnético con uno no-magnético. (Figura 1.7)



**Figura 1.7: Sistema Multicapa: Acoplamiento antiferromagnético de las sucesivas capas magnéticas.**

En 1988 Baibich [White, 1992] y otros reportaron cambios en la resistividad del orden del 50% en arreglos de sistemas multicapa de  $(\text{Fe/Cr})_n$ , a este enorme cambio en la resistividad (en función del campo magnético) en sistemas de este tipo se le dió el nombre de Efecto Magnetoresistivo Gigante "GMR".

Fenomenológicamente, el “GMR” es un efecto mecano – cuántico que aparece bajo ciertas condiciones geométricas, en películas delgadas de materiales metálicos, en donde se ha depositado alternadamente materiales ferromagnéticos y no magnéticos. Las capas magnéticas exhiben una magnetización espontánea antiferromagnética (Figura 1.7) a espesores del orden de 10 a 20 Å (Sección 1.3.3), esto determina una resistividad intrínseca en el material, el efecto se presenta cuando la resistividad tiene una disminución sustancial con la aplicación de un campo magnético que induce una alineación paralela de los sucesivos momentos magnéticos. Este efecto se caracteriza por la razón  $\Delta R/R$ , donde  $\Delta R$  es la disminución total de la resistividad cuando el campo magnético aplicado se incrementa hasta la saturación (campo magnético cuando los momentos de las capas magnéticas están alineados paralelamente) y  $R$  es la resistividad intrínseca de la muestra.

***Para que el efecto “GMR” aparezca se deben cumplir las siguientes condiciones:***

1. Debe haber una forma de cambiar la orientación relativa de la magnetización de las capas magnéticas adyacentes en el arreglo multicapa (campo magnético externo).
2. El espesor de cada una de las películas delgadas debe ser menor y preferiblemente una fracción del libre camino medio del electrón en el arreglo multicapa.
3. Los centros de dispersión deben interactuar mas efectivamente, así como la disponibilidad de estados electrónicos libres debe ser mayor para electrones cuyo espín se orientan antiparalelamente a la dirección de la magnetización en el medio, que para aquellos que se orientan paralelamente.

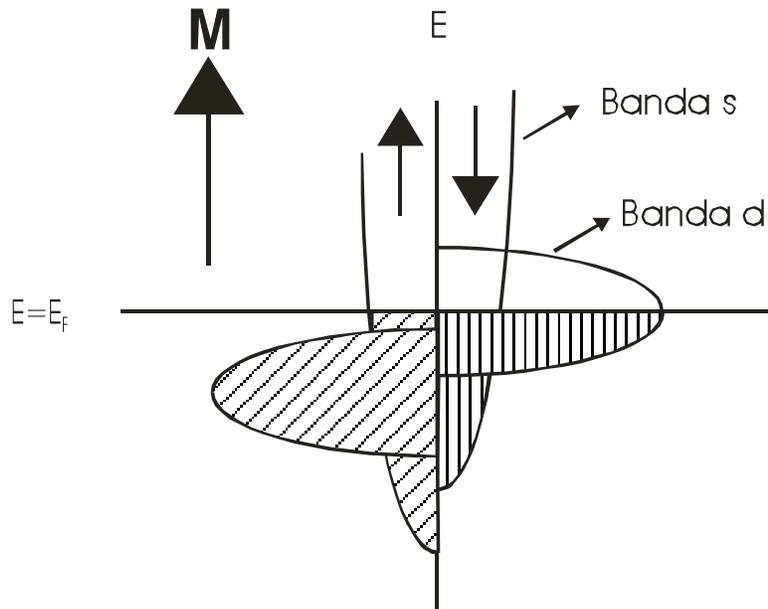
Para entender la física detrás del efecto GMR es necesario explicar algunas de las propiedades de transporte de los metales ferromagnéticos.

### **1.3.1 Resistencia en los metales magnéticos**

Generalmente se asume que en los metales ferromagnéticos la conductividad es en su mayoría llevada a cabo por electrones de las bandas “sp”, debido a que tienen orbitas muy excéntricas y como consecuencia tienen una masa efectiva muy pequeña, en contraste con los electrones de la banda “d” que tienen una masa efectiva muy grande. [Parkin, 1993]

Mott [Hartmann, 2000] en la década de 1930, estableció que la corriente de conducción en los metales ferromagnéticos puede ser dividida en dos canales de conducción independientes, llamados electrones con espín “up” y “down”, entendiendo como electrones con espín “up” aquellos que tienen su espín en la misma dirección que la magnetización local. Además considero que estos canales de conducción no se mezclan debido a que el proceso que puede causar un cambio en los espines es la dispersión por magnones y la densidad de estos es muy baja por debajo de la temperatura de Curie  $T_C$ , es decir, la temperatura de ordenamiento ferromagnético.

La banda “d” juega un papel muy importante ya que provee estados finales donde los electrones “sp” pueden ser dispersados (Figura 1.8). La densidad de estados cerca del nivel de Fermi para los electrones con espín “up” y “down” en la banda “d” es diferente en cada caso, esto conduce a que en promedio la dispersión de los dos canales de conducción sea diferente, es decir, dispersa mas efectivamente electrones cuyo espín es contrario a la magnetización local.



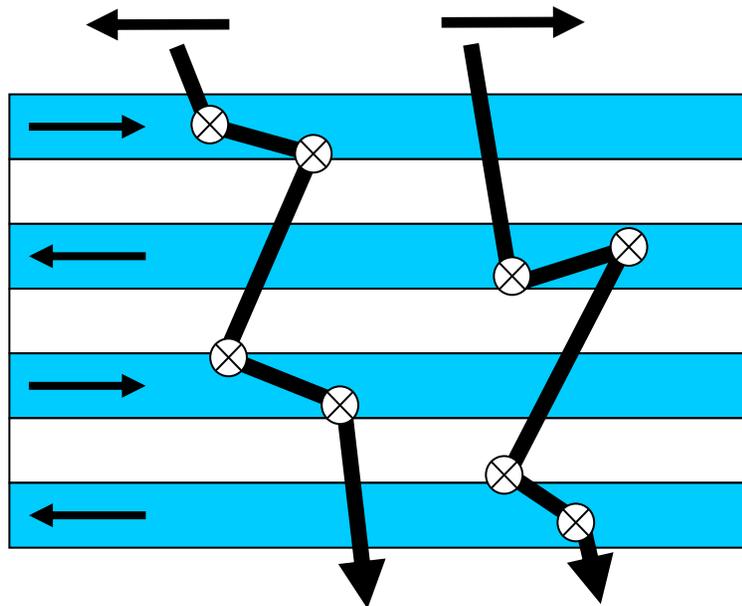
**Figura 1.8: Representación esquemática de la densidad de estados en un metal de transición. [Gómez, 1998]**

Como en cualquier otro metal los portadores de carga se ven sujetos a distintos procesos de dispersión como son: por impurezas, defectos estructurales, fonones, magnones, etc. Sin embargo, el proceso de dispersión que nos interesa para comprender el efecto GMR, es precisamente la dispersión diferencial debida a las magnetizaciones locales.

### **1.3.2 Modelo Fenomenológico del Efecto “GMR”**

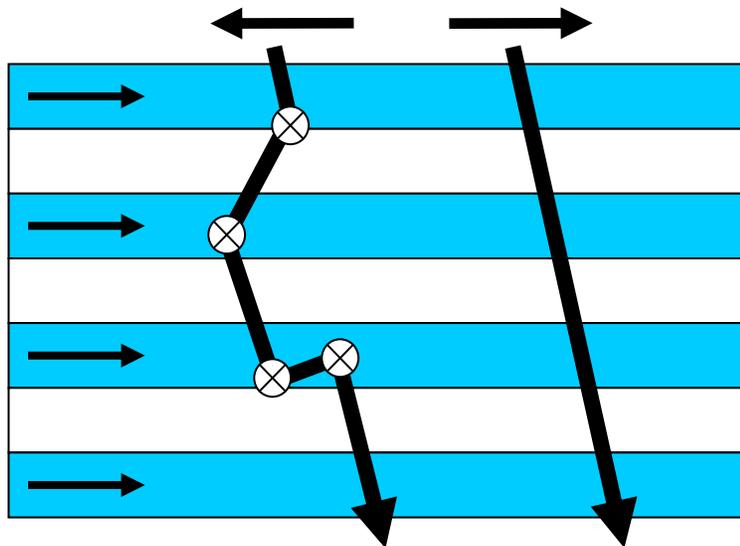
La resistividad que presenta un metal cuando fluye en el una corriente eléctrica está determinada por los procesos de dispersión ya mencionados anteriormente. Así cuando fluye una corriente eléctrica a través del arreglo multicapa, los dos canales de conducción se verán dispersados en forma similar, es decir, la resistividad para ambos canales será aproximadamente igual ( $\rho \uparrow \approx \rho \downarrow$ ).

En un arreglo multicapa se observa que en los dos canales de conducción la dispersión se presenta de la siguiente manera: Al pasar por la primera capa los electrones de un canal de conducción tienen el espín en la misma dirección que la magnetización local, es decir, se comportan como electrones “up” y son levemente dispersados, mientras que los electrones del otro canal de conducción tienen sus espines contrarios a la magnetización local, es decir, son down y por lo tanto son fuertemente dispersados, en la siguiente capa la situación se invierte y así sucesivamente (Figura 1.9). Esto conduce a una resistividad bastante alta para los dos canales de conducción (similar para ambos), lo cual determina una resistividad intrínseca del arreglo en ausencia de campo magnético externo. [White, 1992]



**Figura 1.9: Sistema Multicapa: Dispersión para los dos canales de conducción ( $\rho \uparrow \approx \rho \downarrow$ )**

Por otra parte si se aplica un campo magnético lo suficientemente intenso en el plano de la muestra, se logra que el acoplamiento antiferromagnético del arreglo multicapa pase a ser ferromagnético (Figura 1.10).



**Figura 1.10: Sistema Multicapa: Acoplamiento Ferromagnético de las sucesivas capas magnéticas.**

Con esto cambia la dispersión que presentan los dos canales de conducción. Por un lado uno de los canales de conducción se ve siempre dispersado, ya que los espines de sus electrones son contrarios a las magnetizaciones locales, mientras que el otro canal de conducción ve altamente favorecido su avance en el arreglo ya que los espines de sus electrones están en la misma dirección que todas las magnetizaciones locales. Esto provoca un aumento en el libre camino medio de los electrones para este ultimo canal y por lo tanto una disminución considerable en la resistencia del arreglo. Al fenómeno de la disminución de la resistencia con la aplicación de un campo magnético en el plano de un arreglo multicapa se le conoce como efecto GMR. [White, 1992]

La dependencia de la resistencia en función del campo magnético para sistemas multicapa de  $(\text{Fe/Cu})_n$  se muestra en la Figura 1.11.

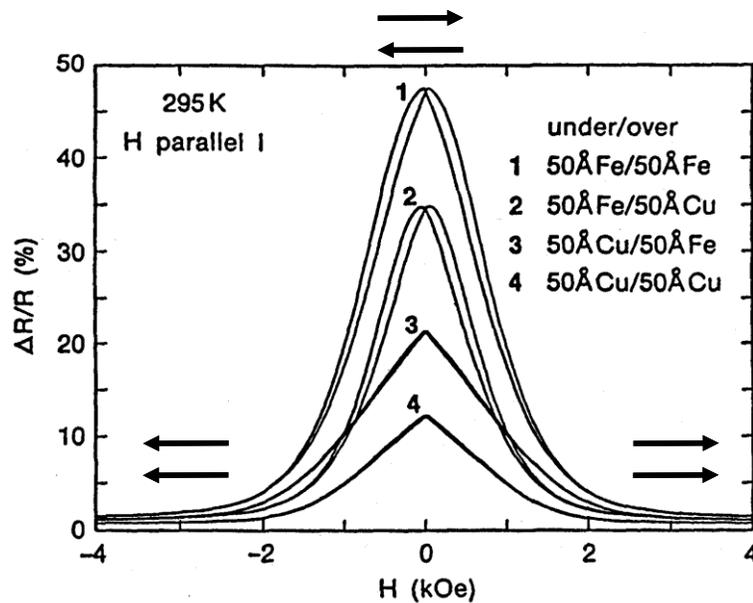


Figura 1.11: Efecto GMR: Comportamiento de la resistencia respecto al campo magnético. [Parkin, 1993]

### 1.3.3 Acoplamiento oscilatorio entre las capas magnéticas

La primera evidencia de acoplamiento antiferromagnético en capas magnéticas separadas por un metal no magnético fue observada por primera vez en arreglos de Fe/Cr. Debido a varios estudios se concluyó que existe un acoplamiento oscilatorio en función del espesor de la capa espaciadora, es decir, del metal no magnético. Posteriormente se demostró que el acoplamiento antiferromagnético y sus oscilaciones no está limitado a un pequeño grupo de multicapas sino es una propiedad general de la mayoría de metales de transición y de los metales nobles. [Parkin, 1993]

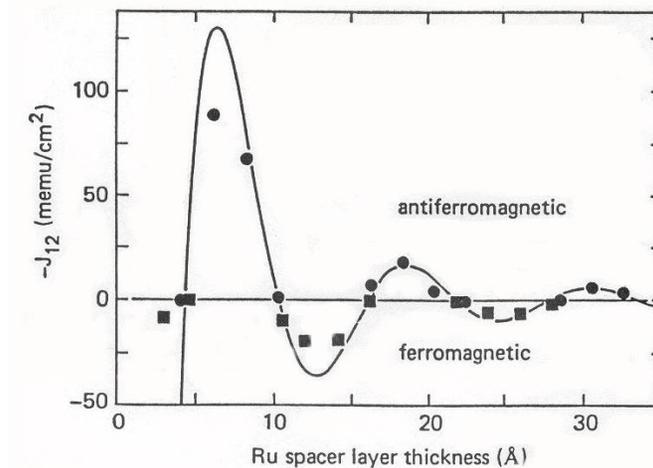
Como se puede ver en la Figura 1.12 el período de oscilación para la mayoría de los metales es muy similar con excepción del Cr para el cual el período es significativamente más grande.

Element	$A_1$ (Å)		$\Delta A_1$ (Å)		$J_1$ (erg/cm <sup>3</sup> )		P (Å)
	$A_1$	$\Delta A_1$	$J_1$	P			
Ti	9	3	7	7	0.1	9	0.1
V	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Cr	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Mn	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Fe	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Co	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Ni	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Cu	9	3	7	7	0.1	9	0.1
Zr	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Nb	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Mo	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Tc	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Ru	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Rh	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Pd	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Ag	9.5	2.5	5.2	3	0.02	*	*
Hf	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Ta	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
W	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Re	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Os	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Ir	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Pt	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03
Au	7	2	5.5	3	0.01	*	0.03

 No coupling is observed with Co

Figura 1.12: Periodo de acoplamiento oscilatorio para distintos metales. [Parkin, 1995]

El origen del acoplamiento oscilatorio en función de la capa espaciadora es debido a una interacción del tipo RKKY, con la diferencia de que el periodo de oscilación para esta interacción esta relacionada con la capa espaciadora mientras que en el RKKY el período de oscilación esta relacionado con el parámetro de la red. En la Figura 1.13 se muestra el período de oscilación para el metal espaciador Rutenio (Ru).



**Figura 1.13: Intensidad del acoplamiento de intercambio para capas de  $\text{Ni}_{80}\text{Co}_{20}$  a través del metal espaciador Ru. [Parkin, 1993]**

El efecto GMR se presenta cuando un arreglo multicapa con acoplamiento antiferromagnético pasa a ser ferromagnético con la aplicación de un campo magnético externo, de aquí que resulta de gran importancia el espesor de la capa espaciadora (o metal no magnético) para lograr el acoplamiento antiferromagnético. Como puede verse en la Figura 1.13 un acoplamiento fuertemente antiferromagnético para el caso del Ru se presenta alrededor de los 7 – 8 Å. En general al momento de fabricar el arreglo multicapa es necesario tener un control muy preciso de los espesores de las capas espaciadoras. Además de esto tener en cuenta el material utilizado como espaciador del cual dependerá el espesor que deberán tener las capas para que el arreglo presente un acoplamiento antiferromagnético.

## Capítulo 2 METODOLOGIA

Con el fin de cumplir los objetivos planteados en la investigación se presenta la metodología experimental que guió el presente trabajo, el cual se dividió en dos grandes etapas.

### 2.1 *Elaboración de las Muestras*

Esta primera etapa de la fase experimental consistió en la fabricación de películas delgadas en Sistemas Multicapa con materiales magnéticos y no magnéticos depositados alternadamente los cuales pueden ser Fe/Cu, o bien Co/Cu. Cabe mencionar que en la construcción de un sistema de películas delgadas como este, se realiza una evaporación por cada deposición de material (ya sea magnético o no magnético) sobre el sustrato, lo que equivale a decir a “n” deposiciones igual “n” evaporaciones, para la elaboración de la muestra final. La técnica que fue usada para ello, es la llamada TÉCNICA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO. A continuación se describe el sistema multicapa que se elaboró.

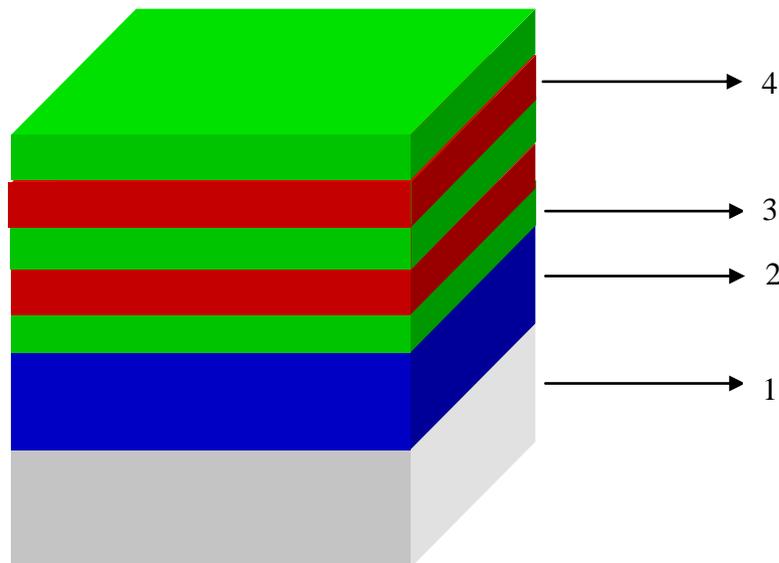


Figura 2.1: Arreglo multicapa, 1. Sustrato, 2. Capa Buffer, 3. Metal no magnético, 4. Metal magnético.

El sustrato que se utilizó fue una oblea de Silicio {100}. La capa buffer es un metal magnético (Fe ó Co) cuyo fin es orientar en una dirección predeterminada la magnetización de las capas magnéticas sucesivas que constituyen el arreglo multicapa. Posteriormente a la capa buffer siguen las capas magnéticas (Fe ó Co) y no magnéticas (Cu) que se disponen en forma alternada en el sistema multicapa.

Conocidas las diferentes partes que constituyen el arreglo multicapa a continuación se presenta los pasos necesarios para elaborar una muestra con estas características:

### **2.1.1 Preparativos hechos al sustrato antes de la evaporación**

El sustrato que se utilizó fue el Si {100} en forma de obleas con 100 mm de diámetro y se cortó con las siguientes dimensiones:  $2.3 \times 1.1 \text{ cm}^2$ , usando una cortadora de diamante.

El procedimiento para cortar la oblea fue el siguiente:

- a) Se marcó la oblea de la cara opaca con las dimensiones de la muestra que se desea obtener usando un plumón y una regla.
- b) Sobre las marcas hechas se rasgó con la cortadora de diamante.
- c) Se colocó en una superficie plana y limpia cuyo borde coincida con la marcación hecha antes sobre la oblea.
- d) En la parte de la oblea que toca la superficie se colocó una regla cuyo borde coincide con la marcación y en la otra parte se aplicó un golpe seco a lo largo de la marcación con otra regla en posición perpendicular a ésta. Con esto lo que se logra es hacer el corte deseado.
- e) Se repitieron los literales (a) al (d) para darle las dimensiones de la muestra que se necesita.

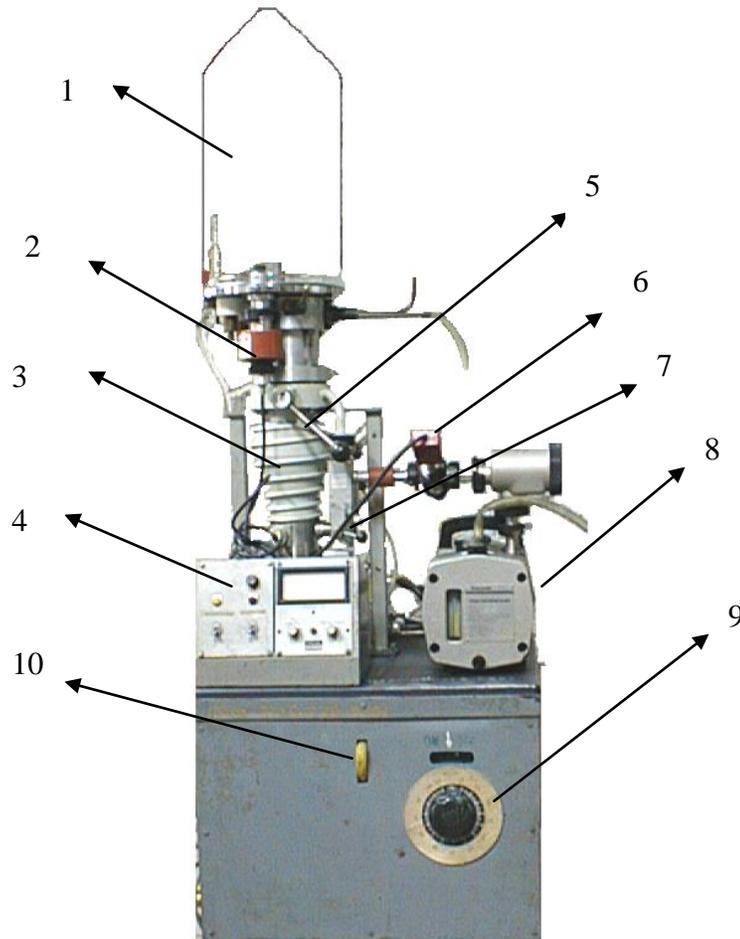
## **Limpieza del sustrato de Silicio**

En un beaker con una solución de NaOH al 5% normal se introdujo el cristal (sustrato), se puso a calentar hasta su punto de ebullición, dejándolo así por 5 minutos. Posteriormente se fue disminuyendo la concentración de NaOH, aforando un poco de solución mientras se agregaba agua destilada, hasta tener la seguridad de que se halla eliminado el NaOH (para evitar que el cristal se oxide), enseguida se retiro el cristal de la solución (agua destilada), se seco y finalmente se limpió con acetona.

## 2.1.2 Proceso de elaboración de las muestras

### **Conocimientos básicos acerca de la máquina evaporadora**

El esquema global de la máquina evaporadora es el siguiente:



**Figura 2.2: Máquina Evaporadora: 1. Cámara de evaporación, 2. Medidor Penning Edwards Mod.8, 3. Bomba de difusión (Diffstak Edwards Mod.150M), 4. Consola, 5. Palanca A, 6. Medidor piranni Edwards Mod. 11, 7. Palanca B, 8. Bomba mecánica (Edwards Mod. EDM2), 9. Selector de corriente., 10. Cable de medición de corriente.**

Una breve descripción de las partes mencionadas anteriormente es la siguiente:  
Es en la cámara de evaporación donde irá el montaje del sustrato, los materiales a evaporar y el cristal de cuarzo, el cual servirá para medir el espesor de cada capa formada en cada evaporación. El Medidor Penning es el que proporciona

un dato de presión de vacío dentro de la cámara de evaporación, cuando se esta usando la bomba de difusión. La consola no es mas que un panel donde están los interruptores de encendido de las bombas de vacío y la pantalla de lectura de vacío preliminar. Las palancas son únicamente compuertas internas que sirven para dirigir el vacío que se está llevando a cabo en las partes de la máquina evaporadora.

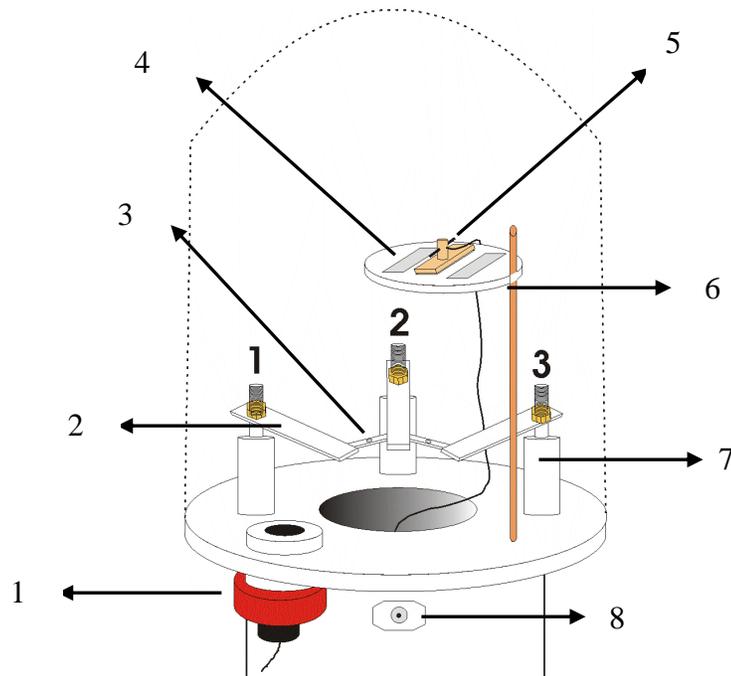
El proceso para elaborar las muestras involucra las siguientes etapas.

1. Montaje de los diferentes elementos que se ubicaron en la cámara de evaporación
2. Proceso de obtención del vacío.
3. Proceso de evaporación múltiple de los materiales.

#### **2.1.2.1 Montaje de los diferentes elementos que constituyen la cámara de evaporación**

El equipo se montó tal y como lo muestra la Figura 2.3. Existe dos equipos que físicamente no están dentro de la cámara de evaporación: El termazip (Termómetro digital, GTH-1160 Greisinger Electronic) que se conecta con los termopares y el medidor de espesor que, a través de una serie de adaptadores BNC – LEMO (conectores para el manejo de frecuencias), conecta con el cristal de cuarzo dentro de la cámara de evaporación.

A continuación se describen algunos aspectos que se tuvieron en cuenta a la hora de montar estos elementos con el fin de obtener una muestra con las características que se desean.

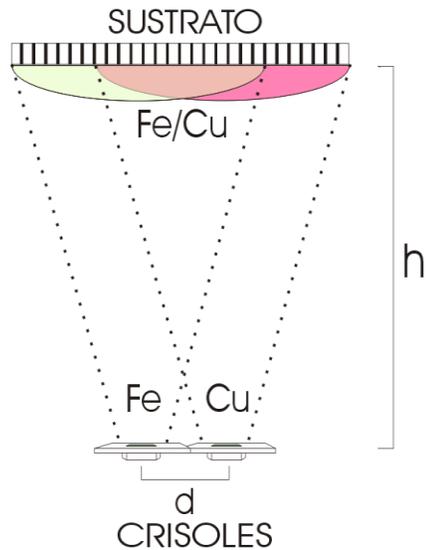


**Figura 2.3: Montaje dentro de la cámara de evaporación: 1. Penning Edwards Mod. 8, 2. Electrodo, 3. Crisoles (Tungsteno), 4. Porta muestras, 5. Cristal medidor de espesores, 6. Soporte, 7. Soporte para electrodos, 8. Conexión para cristal medidor de espesores.**

Los Termopares tienen que hacer contacto con los crisoles para medir sus temperaturas en el momento de la evaporación. La separación de los crisoles así como la separación crisoles - sustrato fueron variables que se tomaron en cuenta, como se muestra en la Figura 2.4, los haces moleculares que emergen de cada uno de los crisoles deben alcanzar el sustrato colocado como blanco, de manera que los dos haces moleculares presenten una región de intercepción, justamente a la altura que se encuentra el sustrato.

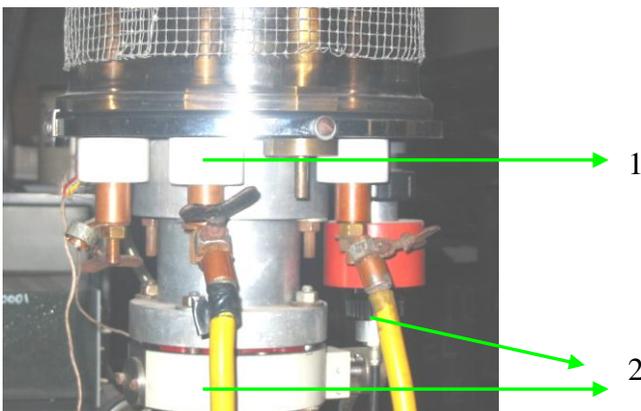
Puesto que la evaporación fue doble, un electrodo fue siempre común para cada una de las evaporaciones, este electrodo es el número 2 (Figura 2.3). El material de los crisoles fue otro elemento que se tomó en cuenta, ya que no todos los elementos pueden ser evaporados con un mismo crisol, debido a que a temperaturas del orden  $10^3$  °C puede haber una reacción entre el elemento a

evaporar y el crisol que se está utilizando; en nuestro caso el crisol utilizado fue el tungsteno, material adecuado para la evaporación de hierro, cobre y cobalto.



**Figura 2.4:** Esquema de los haces moleculares de los materiales hierro y cobre, “d” es la distancia de separación entre los crisoles, “h” es la altura entre el sustrato y los crisoles (fuentes de emisión de partículas).

Una verificación importante que se tuvo que hacer siempre después de haber puesto todos los elementos es la prueba de la continuidad. Para ello se desconectó uno de los cables de corriente (Figura 2.5) y con un voltímetro se procedía a medir la continuidad, con el fin de verificar la correcta conexión de los crisoles con los electrodos.



**Figura 2.5: Electrodo en la cámara de vaporación: 1. Electrodo común, 2. Cables de alimentación de corriente del transformador.**

### **2.1.2.2 Proceso de obtención del vacío**

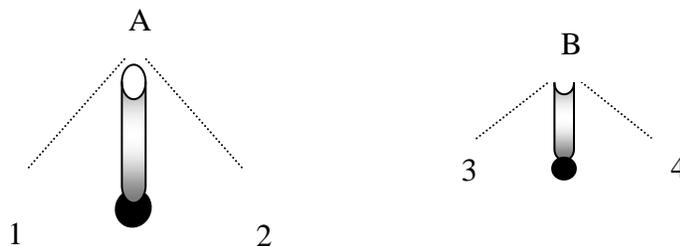
El proceso de obtención del vacío consta de dos etapas, para lo cual se utiliza una Bomba Mecánica y otra de Difusión.

La finalidad de estas dos bombas (mecánica y difusión) es obtener un alto vacío en la Cámara de Evaporación. Esto se logra realizando los siguientes pasos:

#### ***Bomba mecánica***

1. Con las palancas A y B del equipo en la posición 2 y 4 respectivamente (Figuras 2.2 y 2.6), se encendió la bomba mecánica durante 40 minutos, con la cual se obtiene un vacío en la cámara de evaporación de aproximadamente  $7 \times 10^{-2}$  torr.
2. Enseguida con la palanca A en la misma posición y la palanca B en la posición 3, se realizó vacío durante 10 minutos, con esto se obtuvo vacío en la bomba de difusión alcanzando una presión de  $6.5 \times 10^{-2}$  torr.

3. Finalmente se puso la palanca A en la posición 1, haciendo vacío en todo el sistema, alcanzando una presión de  $7 \times 10^{-2}$  torr, en un tiempo de 15 minutos.



**Figura 2.6: Palanca A y Palanca B de la maquina evaporadora**

### ***Bomba de difusión***

Con la presión inicial obtenida con la Bomba Mecánica (presión preliminar), y con el Sistema de Enfriamiento en funcionamiento (circulación de agua en el sistema), se activa la Bomba de Difusión dejándola trabajar aproximadamente 35 minutos, con lo cual se alcanza una presión del orden de  $10^{-5}$  torr siendo un vacío suficiente para poder evaporar.

Una vez la bomba de difusión alcanzó el vacío requerido para iniciar el proceso de evaporación de los materiales, se colocaron las palancas A y B en las posiciones 2 y 4 respectivamente, evitando de esta forma que las evaporaciones de los materiales contaminen el aceite de la bomba de difusión.

#### **2.1.2.3 Proceso de evaporación múltiple de los materiales**

Antes de proceder a evaporar los metales sobre el sustrato es necesario hacer un ajuste o calibración al aparato medidor de espesores, lo cual se describe brevemente a continuación.

### ***Calibración del medidor de espesores***

El medidor de espesores alcanza su óptimo estado de funcionamiento 15 minutos después de haberse encendido. El proceso para calibrar el medidor de espesores (QSG) es el siguiente: Después de que el equipo se estabiliza se pone el rango de medición en la escala mayor es decir 100, se introduce en el aparato el valor de la densidad (en  $\text{g/cm}^3$ ) del material que se va a evaporar y se ajusta la frecuencia de manera que el medidor este en cero, con lo cual se está listo para medir el espesor de la película a depositar.

El sustrato y el cristal están colocados a una misma altura con el fin de que se deposite la misma cantidad de material sobre ambos durante en el proceso de evaporación.

El modo en que opera el cristal del medidor de espesor es el siguiente: Durante el proceso de evaporación de los materiales, la frecuencia inherente del cristal de cuarzo que actúa como sensor, cambia continuamente en virtud del aumento de la masa que se está depositando sobre él. El aparato tiene la función de convertir esta variación de frecuencia del cristal a una variación del espesor depositado, proporcionando de esta forma el espesor de las películas evaporadas.

### ***Proceso de evaporación***

Antes de iniciar este proceso, es necesario conocer de antemano la temperatura de fusión y evaporación de cada uno de los materiales bajo la presión existente dentro de la cámara de evaporación. Una vez conocido esto, se inicia propiamente el proceso de evaporación que comienza con:

- a) La aplicación de la corriente a uno de los crisoles, teniendo en cuenta que el tiempo que se tarda en cada evaporación debe ser el más corto posible para tener buenas deposiciones, ya que si permanece demasiado tiempo un crisol incandescente esto calienta el sustrato con lo cual no se logra una óptima adherencia de los metales sobre el mismo. Además hay que tener en cuenta a su vez diferentes parámetros como son la temperatura en los crisoles, el tiempo de cada evaporación y el espesor de cada película a elaborar.
- b) Una vez alcanzado el espesor adecuado de la primera capa, se llevó la corriente a cero, y se cerró el paso de la misma con un interruptor ubicado en la parte inferior de la máquina evaporadora.
- c) Se cambió el paso de la corriente por la acción de llevar el cable no común de un electrodo hacia el otro para iniciar la evaporación del otro material.
- d) Se repitieron los pasos (a) - (c) hasta obtener el número de capas deseadas.

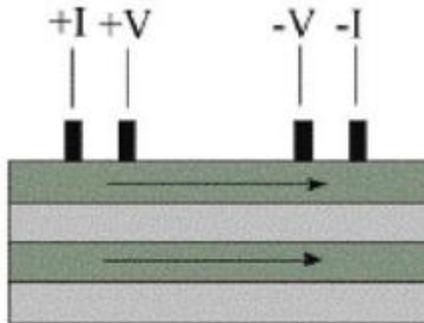
Una vez terminado el proceso de evaporación de los materiales que constituyen el arreglo multicapa se desconectó la Bomba de difusión y se dejó el sistema de enfriamiento funcionar unos 15 minutos para que el aceite de la bomba se condense. Luego se colocó la Palanca A en la posición 1 (Figura 2.6) para unir la cámara de evaporación con la Bomba de difusión y se procedió a eliminar el vacío de todo el sistema rotando la perilla ubicada en el lado opuesto del medidor piranni Edwards (Figura 2.2), y posteriormente se desconectó la Bomba mecánica.

Finalmente se limpiaron todos los elementos (electrodos, paredes, etc) dentro de la Cámara de Vacío incluyendo la campana de vidrio dejando con esto a punto el equipo para la siguiente evaporación.

## **2.2 Medición de las propiedades magnetoresistivas de la muestra**

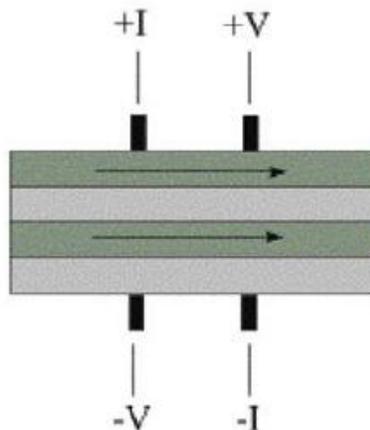
Existen dos configuraciones o geometrías con las que se puede medir el efecto GMR en sistemas multicapa:

1. Configuración corriente en el plano (CIP Current in Plane, Figura 2.7)



**Figura 2.7: Geometría CIP (Current in Plane)**

2. Configuración corriente perpendicular al plano (CPP Current Perpendicular to Plane, Figura 2.8)



**Figura 2.8: Geometría CPP (Current Perpendicular to Plane)**

Cabe mencionar que la geometría CIP es más fácil de llevar a la práctica que la geometría CPP, cuya implementación requiere de técnicas sofisticadas de nanolitografía [Hartmann, 2000], por lo que se optó en esta investigación utilizar la geometría CIP, recurriendo para ello al método de las cuatro puntas cuyo esquema se presenta a continuación:

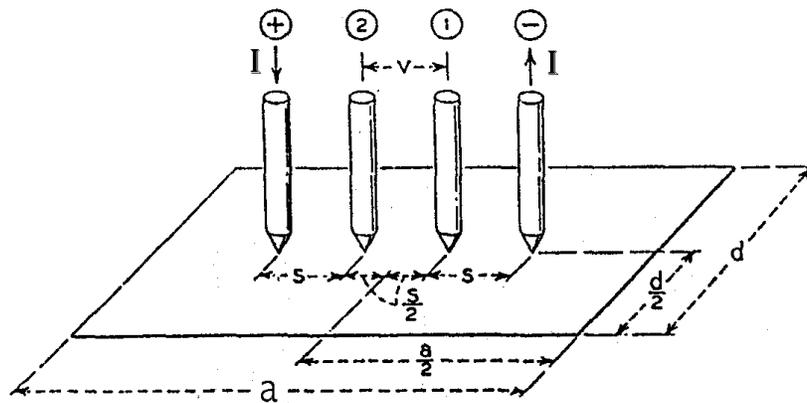


Figura 2.9: Montaje experimental del Método “Prueba de las Cuatro-Puntas”. [Smits, 1958]

Las puntas exteriores, son los electrodos (positivo y negativo) a los que se les suministrará un flujo de corriente (Ver Anexo 1) y en las puntas interiores se medirá la diferencia de potencial cuya magnitud física servirá finalmente para conocer el valor de la resistividad de la muestra con la fórmula. [Smits, 1958]

$$\rho_s = \frac{V}{I} C\left(\frac{a}{d}, \frac{d}{s}\right) \quad (16)$$

Donde:  $\rho_s$  : resistividad de la muestra.

V: voltaje medido entre las puntas interiores.

I : corriente aplicada a la muestra.

$C\left(\frac{a}{d}, \frac{d}{s}\right)$ : Factor de corrección, depende de la geometría de la muestra

s: distancia de los electrodos

d. ancho de la muestra

a: largo de la muestra

El método exige que las 4 puntas sean equidistantes entre sí.

Como el Efecto GMR consiste en la variación de la resistencia debido a la variación de un campo magnético aplicado al plano de la muestra, describimos el diseño experimental que se utilizó para la medición de esta variación.

Primeramente se presenta el listado del equipo necesario para la medición del efecto GMR:

- 1 Un electroimán (Model J Research Aluminum – Foil Electromagnet 4", Air – cooled coils, Atomic Laboratorios Inc.)
- 2 Una fuente de corriente directa constante doblemente regulada, diseñada y manufacturada en los talleres de la escuela de Física, Universidad de El Salvador.
- 3 Un Teslametro (Smart Magnetic Sensor Model SMS102, Tel-Atomic Inc.)
- 4 Un Milivoltímetro HP 3468A.
- 5 Montaje para el Método de las Cuatro Puntas (Elaborado en esta investigación)
- 6 Soporte del montaje para el Método de las Cuatro Puntas (Elaborado en esta investigación)

A continuación se describe el procedimiento para medir el efecto GMR:

### 2.2.1 Puesta a punto del equipo

Antes de empezar a utilizar el equipo es necesario que las fuentes del electroimán se estabilicen para obtener un óptimo funcionamiento del mismo, de modo que el campo generado no sufra variaciones. El tiempo necesario para que se estabilicen las fuentes es alrededor de media hora.

### 2.2.2 Colocación de la muestra en el montaje del Método de las Cuatro Puntas

Para lograr esto se siguieron los pasos que a continuación se mencionan:

1. Poner los alambres de cobre en los contactos del montaje de las cuatro puntas (Figura 2.10).
2. Introducir la muestra dentro del montaje de las cuatro puntas.
3. Ensamblar el soporte en el montaje de las cuatro puntas.
4. Conectar la fuente de corriente y milivoltímetro al montaje de las cuatro puntas. (Figura 2.12)

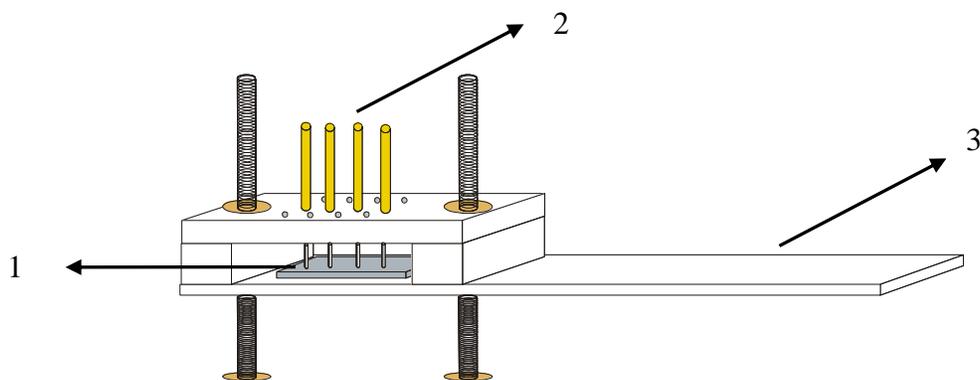


Figura 2.10: Montaje de las cuatro puntas: 1. Muestra, 2. Contactos, 3. Soporte para la muestra (elaborado en plexiglás).

Cada par de contactos eléctricos van conectados de forma independiente a dos aparatos. El primer par de contactos exteriores se conectaron a una fuente de corriente, mientras que el par interior a un milivoltímetro el cual da una lectura muy precisa del orden de los  $10^{-6}$  voltios. Esta configuración permite que se le inyecte corriente a la muestra para medir el voltaje que se genera entre el par de contactos interiores.

### **2.2.3 Toma de datos**

En esta última parte de la metodología referente al efecto GMR, las variables principales que entran en acción son: El campo magnético aplicado a la muestra, el voltaje medido en la muestra y la corriente aplicada a la muestra la cual se fija durante el experimento. Al mencionar las variables principales, no se puede dejar de lado las variables que se podrían clasificar como intervinientes como son: La temperatura del ambiente, el calentamiento del equipo (electroimán), humedad relativa del aire, magnetización remanente del electroimán y de la muestra, etc.

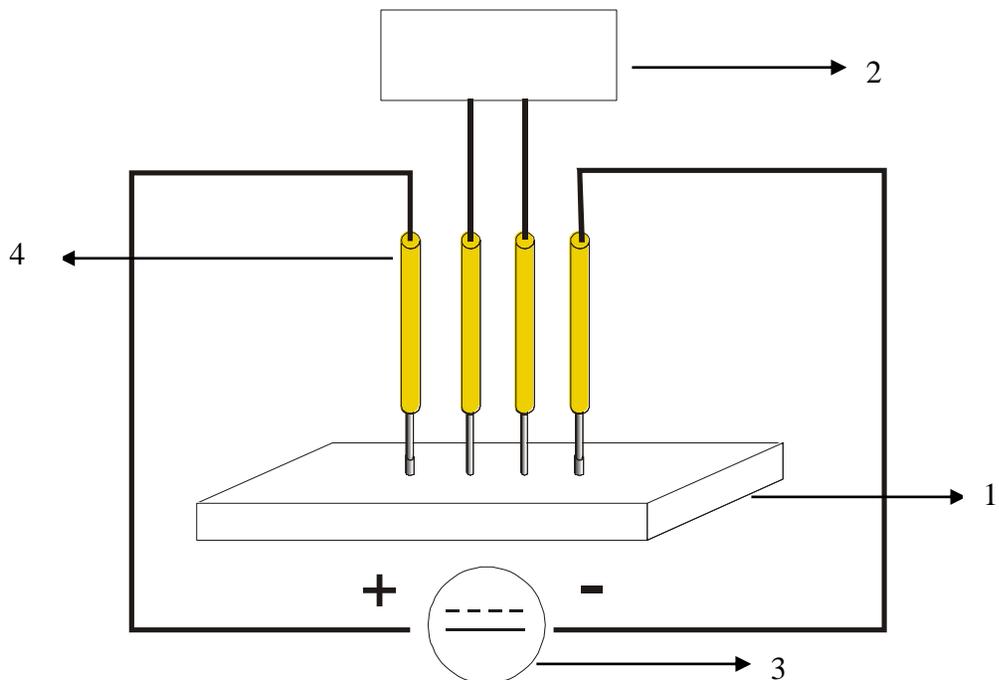
Tanto la temperatura ambiente como la temperatura de las bobinas que generan el campo magnético son factores que influyen en las medidas que uno pretende tomar, ya que tanto la conductividad como la resistividad de los metales presentan una dependencia en su valor con respecto a la temperatura, de aquí que resulta importante realizar las diferentes mediciones bajo condiciones ambientales aproximadamente iguales, debido a que en el equipo estas variables ambientales no pueden ser controladas.

Otro aspecto que hay que considerar es la precisión con la que se debe medir las variables que intervienen en el experimento. Para el caso del milivoltímetro fue necesario hacerle una Caja de Faraday conectada a tierra a manera de que hubiera menos perturbaciones procedentes del medio ambiente en las medidas

que se toman del potencial con el fin de mejorar la precisión con la que éste se mide.

Tomando en cuenta estas consideraciones se procede a describir cual fue la metodología utilizada para la toma de datos:

Con el circuito que se muestra en la Figura 2.11, se fijo la corriente a un valor de 1.2mA (constante durante todo el experimento), esto genera un potencial en los contactos internos el cual fue medido con un milivoltímetro, con lo cual se determinó la resistencia de la muestra en ausencia de campo magnético  $R(B=0)$ , es decir, su resistencia intrínseca.



**Figura 2.11: Circuito para medir resistividad en las muestra. 1. Muestra, 2. Milivoltímetro, 3. Fuente de corriente constante, 4. Contactos.**

Posteriormente el circuito se introdujo en el electroimán (Figura 2.12) haciendo un barrido del campo magnético (Campo magnético en el plano de la muestra) en el rango de 0 a 1200mT en ambos sentidos, es decir, campo positivo (hacia la derecha) y campo negativo (hacia la izquierda). El barrido se hizo cada 100mT excepto en los primeros 100mT donde se tomaron datos aproximadamente cada 15mT. Con cada valor de campo se fue registrando el potencial generado en los contactos internos.

Este proceso se repitió al menos 7 veces por cada muestra y en cada sentido del campo a manera de poderle dar un tratamiento estadístico adecuado a los datos obtenidos.



**Figura 2.12: Electroimán utilizado para medir la magnetorresistencia en las muestras**

Con los datos de campo magnético, potencial eléctrico y corriente se pudo obtener la variación de la resistencia en la muestra conforme varia el campo magnético, la cual se expresaron posteriormente en graficas donde se tabularon Campo magnético (**B**) contra la variación de la resistencia con respecto a la resistencia intrínseca  $\Delta R/R$  (%), a manera de ver cuanto fue el cambio neto en la resistencia de la muestra bajo el efecto del campo magnético.

La incerteza al medir la variación en la resistencia se obtuvo de la siguiente forma: En primer lugar, se obtuvo para cada muestra la razón  $\Delta R/R$  por cada uno de los recorridos y en cada sentido del campo magnético, enseguida se procedió a obtener la desviación estándar para los recorridos en una y en otra dirección para cada una de las muestras, es decir, si se tomaron 18 pares de datos (campo magnético y potencial) por cada recorrido, se obtuvo la desviación estándar para cada variación de la resistencia correspondiente a un valor determinado de campo magnético. Y finalmente se obtuvo el promedio de las desviaciones para cada sentido de campo.

## Capítulo 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 *Elaboración de las muestras*

La presente investigación se planteó el objetivo de elaborar sistemas multicapa con el método de evaporación al vacío para luego medirles sus propiedades magnetoresistivas. Para ello se tuvo que hacer una serie de reparaciones, ajustes y adaptes a la vieja máquina evaporadora de la Escuela de Física, necesarios para realizar evaporaciones dobles (evaporación de dos metales sobre un mismo sustrato) y a la vez medir y controlar los espesores de cada capa evaporada. A continuación se enumeran los pasos que se llevaron a cabo para cumplir con este objetivo:

- 1- **Puesta en funcionamiento de la máquina evaporadora.** Para poner a punto la maquina evaporadora se hicieron una serie de reparaciones que finalmente permitieron la deposición óptima de las muestras. En esta línea se resolvió un problema de falso contacto que presentó el transformador de corriente y por otra parte se repararon los termopares de la máquina evaporadora con el fin de medir la temperatura de los crisoles durante el proceso de evaporación.
- 2- **Adapte a la máquina para evaporaciones dobles:** Con el fin de poder realizar evaporaciones dobles fue necesario la construcción de distintas piezas para colocar ambos crisoles a una misma altura, y cumplir de esa manera con la geometría requerida por el experimento de deposición. Todo esto implicó la elaboración de seis electrodos tomando en cuenta sus longitudes para que la distancia entre ambos y el sustrato fuese la adecuada con el fin de lograr una evaporación óptima de los materiales.

También fue necesario la construcción de un soporte cilíndrico para los electrodos, según se muestra en la Figura 2.3.

3- **Control de los espesores:** Con el fin de medir los espesores de las películas evaporadas fue necesario realizar los siguientes adaptes a la máquina evaporadora:

- i. Reparación del aparato medidor de espesores Balzers QSG 301. El aparato no funcionaba debido a que el filtro de entrada de corriente estaba dañado, debiendo ser reemplazado.
- ii. Instalación del transductor de espesores (cristal de cuarzo Balzers QSK 301) a la máquina evaporadora. El mencionado transductor pertenecía a otra máquina evaporadora ya en desuso, por lo que se tuvo que hacer un montaje especial para adaptarlo a nuestra máquina evaporadora, lo cual implicó colocar el cristal transductor y el sustrato a la misma altura y además establecer la conexión de los conectores tipo BNC a Lemo, para el manejo de las señales del cristal de cuarzo al aparato de lectura de espesores, el cual es exterior a la máquina evaporadora.

4- **Adaptes para la seguridad de los usuarios:** Por seguridad de los usuarios se construyeron seguros metálicos tipo mariposa para sostener los cables de corriente del transformador a la cámara de evaporación (Figura 2.5).

5- **Adquisición de crisoles:** Finalmente para evaporar los materiales fue necesario adquirir crisoles de tungsteno (los cuales fueron adquiridos en E.U.). Los crisoles de tungsteno (49 x 12 x 0.40) mm resultan adecuados para evaporar hierro, cobalto y cobre. En el proceso de evaporación los crisoles son llevados a altas temperaturas (800-1100°C), de aquí que resulta importante la elección del material de que este elaborado el crisol, ya que este no debe reaccionar con el material a evaporar, debido a los efectos de contaminación del material a depositar.

Una vez superados los problemas antes mencionados se procedió con la etapa de la elaboración del sistema multicapa.

Durante el proceso de evaporación de las muestras resultó sumamente difícil controlar la temperatura de los crisoles, es decir, la temperatura necesaria para poder evaporar los materiales que conformarían el arreglo multicapa. El problema se debió a dos circunstancias: El termazip (medidor de temperatura) no dio un dato real de la temperatura, debido a mal funcionamiento y además para poder medir con precisión esta variable fue necesario poner en contacto los termopares con los crisoles, resultando en muchos casos la fusión de la punta de contacto (termopares) del termazip con los crisoles, debido a las altas corrientes que circulaban por ellos.

Al no poder conocer la temperatura real de los crisoles resultó crítico el control de la corriente que pasaba a través de estos, ya que la corriente es la que genera la temperatura necesaria para la evaporación de los metales, por lo que el proceso se llevó a cabo en función de esta variable (corriente). Se hicieron varias pruebas para encontrar la corriente necesaria para poder evaporar cada uno de los materiales (Fe, Co y Cu). En algunas de estas pruebas las evaporaciones no resultaron del todo bien, debido a que en algunos casos no se

lograba depositar ningún material sobre el sustrato, lo cual era evidente a simple vista. Por otra parte se observó que para tiempos de evaporación muy prolongados el sustrato sufría sobrecalentamiento excesivo, impidiendo con esto una buena deposición sobre el mismo. Sin embargo, al final se logró determinar el valor crítico de corriente para cada material a ser depositado:

Fe  $\approx$  280A    Co  $\approx$  270A    Cu  $\approx$  250A

La calibración del equipo medidor de espesores, también reportó algunas dificultades, debido a falsos contacto entre los conectores, que no fue posible aislar y corregir completamente, por lo que en algunas ocasiones la práctica de deposición se vió limitada, al no poder determinar con exactitud el espesor de la película depositada.

A pesar de todo esto se logró calibrar con éxito el medidor de espesores, por lo que se pudo conocer con bastante precisión y dentro del error experimental los espesores de las películas elaboradas, minimizando con esto el tiempo de cada evaporación y por consiguiente el calentamiento innecesario del sustrato.

### ***3.2 Resultados de las muestras elaboradas con el método de evaporación al vacío***

Inicialmente se elaboraron muestras monocapa de películas delgadas, de un solo material metálico (Fe, Co ó Cu), con la finalidad de determinar todos los parámetros experimentales necesarios, que permitieran la deposición exitosa de muestras multicapa de películas delgadas. Estos parámetros fueron:

- 1) Adherencia al sustrato***
- 2) Crecimiento uniforme de la película***
- 3) Control del vacío (entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  torr)***

- 4) **Control de la corriente eléctrica para el calentamiento de los crisoles**
- 5) **Control de la temperatura de deposición**
- 6) **Control de la velocidad de crecimiento de la película**
- 7) **Control del espesor final de la película depositada**
- 8) **Deposición alterna de dos materiales diferentes**

Una vez que se logró optimizar cuantitativa y cualitativamente los parámetros antes listados, se procedió a elaborar muestras con un solo par de capas por cada material. A medida que se superaron distintos problemas técnicos en la deposición, se logró elaborar muestras con un número mayor de pares de capas (material magnético - material no magnético), hasta elaborar un sistema multicapa con las siguientes características:



**Nomenclatura:**

**Sustrato[Buffer + capas magnética y no magnética + capa protectora]**

**Figura 3.1: Arreglo Multicapa Elaborado: A) Sustrato, B) Capa Buffer, C) Capas magnéticas y no magnéticas, D) Capa protectora**

**Muestra 00**

La estructura de la muestra elaborada es la siguiente:



El espesor de los 20 pares de capas es en promedio.

Dimensiones de la muestra: (25.19 x 11.19) mm  $\pm$  0.01mm

Las especificaciones con las que se elaboró la **muestra 00** se presentan a continuación:

*Vacío =  $3.0 \times 10^{-5}$  torr*

*Tiempo para alcanzar vacío = 1:40 min*

*Corriente promedio para evaporar Co = 270 A  $\pm$  1 A  $\rho(\text{Co})=8.96 \text{ g/cm}^3$*

*Tiempo promedio para evaporar cada capa de Co = 13 s*

*Corriente promedio para evaporar Cu = 252 A  $\pm$  1 A  $\rho(\text{Cu})=8.9 \text{ g/cm}^3$*

*Tiempo promedio para evaporar cada capa de Cu = 12 s*

*Tiempo total de trabajo = 2:40 min.*

### ***Medición de la magnetoresistencia***

La medición del efecto GMR se hizo utilizando una corriente constante de  $I=(1.141 \pm 0.001)\text{mA}$  para cada una de las muestras, con una separación de los contactos de 5 mm. Cada uno de los contactos está hecho de oro y platino con el fin de evitar cualquier reacción con el medio, así como asegurar condiciones óptimas de conductividad.

***Resistividad intrínseca Muestra 00***  $\rho = 9.8788 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0.18\%$

Al medir la variación de la resistividad de la **muestra 00** en función del campo magnético se obtuvo  $\Delta R/R = (1.28 \pm 0.14)\%$  para un campo entre (0 a 1200mT)  $\pm 1\text{mT}$ .

Esta variación en la resistencia es relativamente pequeña, y por tanto no se puede identificar positivamente como debida a un efecto magnetoresistivo

gigante, sin embargo es posible especular que probablemente tenga su origen en el efecto AMR (Magnetorresistencia anisotrópica) y se precisa de mayor investigación para determinar a ciencia cierta el origen de la variación observada.

Siendo que todas las muestras multicapa de películas delgadas elaboradas por el método de evaporación al vacío presentaron variaciones del orden de magnitud antes señalado, no fue posible cumplir el propósito de elaborar muestras que presentaran el efecto GMR. Sin embargo, esto no descarta la posibilidad de elaborar muestras GMR por el método de evaporación, dado que se puede discutir la existencia de las siguientes limitaciones en su elaboración:

- 1) Se tuvo limitaciones sobre el control de la corriente que suministra el equipo. En el proceso de evaporación, cuando se alcanza el espesor deseado de una capa, no había manera de interrumpir inmediatamente el flujo de corriente, ya que esto dependía del tiempo de reacción del experimentador y del tiempo en llevar el selector de corriente desde un valor determinado a cero. Esta falta de control en la corriente no permitió elaborar muestras con una mayor precisión en cuanto al espesor de las mismas, factor que resulta crítico para que en un sistema multicapa se presente el efecto GMR.
- 2) Otro factor fue la pérdida parcial de vacío debida a las sucesivas evaporaciones, lo cual puede conducir a una mala formación de las películas delgadas, debido a que la presencia de moléculas de aire no solamente tienden a reducir el libre camino medio de los átomos del material a depositar, si no que también pueden reaccionar con los mismos, produciendo oxidaciones indeseables en la película depositada.

Debido a estas limitaciones y con el fin de complementar el estudio se recurrió a muestras elaboradas en Alemania con el método de Sputtering, que es una técnica de deposición al vacío asistida con plasma frío de un gas inerte, por ejemplo, Argón (Ar). El plasma es producido mediante la aplicación de altos voltajes a una cantidad residual de gas Ar introducido en la cámara de deposición, y luego es confinado con campos magnéticos. De esta manera es posible generar un flujo de iones pesados de Ar, que al impactar sobre la superficie del material a depositar (cátodo), expulsan átomos del mismo, los cuales finalmente se depositan sobre el sustrato (ánodo), produciendo películas muy finas y bien conformadas. Los resultados al medir sus propiedades magnetoresistivas se presentan a continuación.

### **3.3 Resultados de las muestras elaboradas con el método de Sputtering**

#### **Muestra 01**

##### **Estructura:**



Dimensiones de la muestra: (18.35 x 10.89) mm $\pm$  0.01mm

Resistividad intrínseca  $\rho = 4.6836 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0.12\%$

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético positivo (0 a 1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (16.05 \pm 0.27)\%$$

**Sensibilidad: 0.90 %/mT**

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético negativo (0 a -1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (15.81 \pm 0.11)\%$$

**Sensibilidad: 0.91 %/mT**

### **Muestra 02**

***Estructura:***



Dimensiones de la muestra: (16.11 x 10.89) mm  $\pm$  0.01mm

Resistividad intrínseca  $\rho = 5.0633 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0.11\%$

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético positivo (0 a 1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (16.04 \pm 0.12)\%$$

**Sensibilidad: 1.05 %/mT**

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético negativo (0 a -1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (16.17 \pm 0.10)\%$$

**Sensibilidad: 1.00 %/mT**

### Muestra 03

**Estructura:**



Dimensiones de la muestra: (21.31 x 10.89)mm  $\pm$  0.01mm

Resistividad intrínseca  $\rho = 3.3863 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 0.12\%$

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético positivo (0 a 1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (17.72 \pm 0.08)\%$$

**Sensibilidad: 0.89 %/mT**

La variación total de la resistividad aplicando un campo magnético negativo (0 a -1200mT) es la siguiente:

$$\Delta R/R(\%) = (17.55 \pm 0.07)\%$$

**Sensibilidad: 0.91 %/mT**

Las gráficas que muestran la relación entre el cambio de la resistividad respecto de la inducción magnética se presentan en las Figuras 3.2, 3.3 y 3.4 para cada una de las muestras respectivamente. A pesar que se hizo las mediciones hasta 1200mT en ambas direcciones se optó por acotar las gráficas a 400mT, debido a que para campos mayores a este valor la variación en la resistividad es prácticamente despreciable.

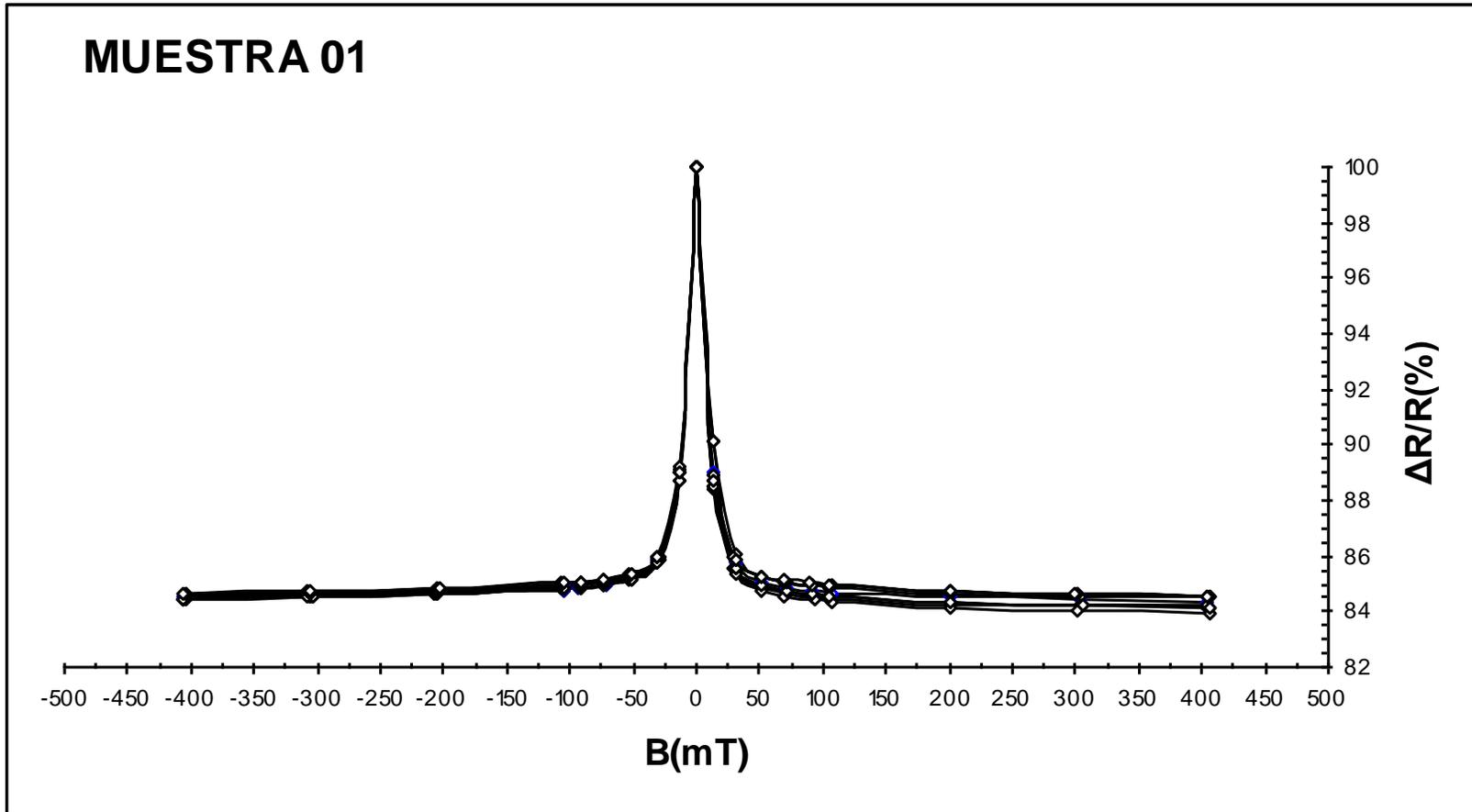


Figura 3.2: Efecto GMR para la muestra 01: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 8 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.

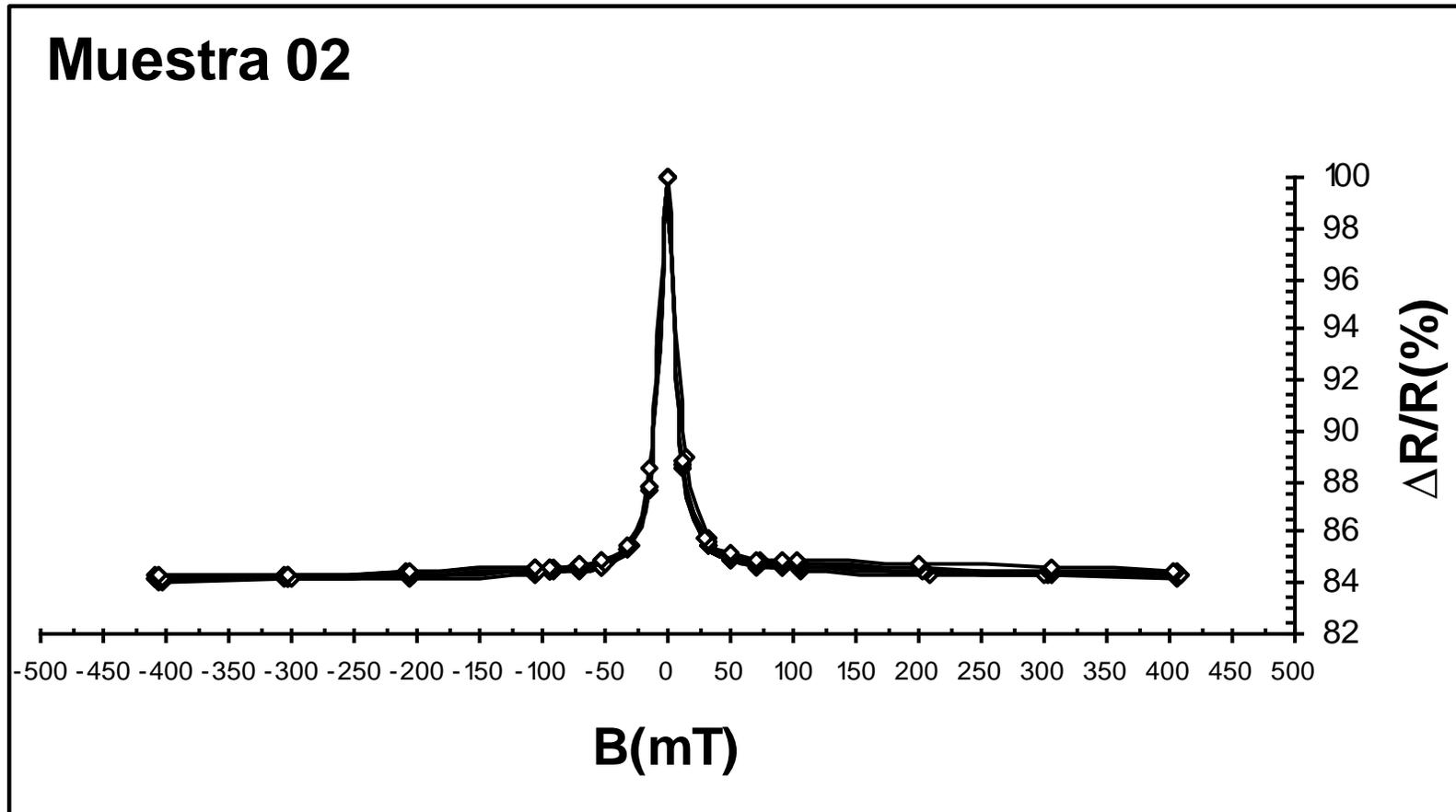


Figura 3.3: Efecto GMR para la muestra 02: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 7 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.

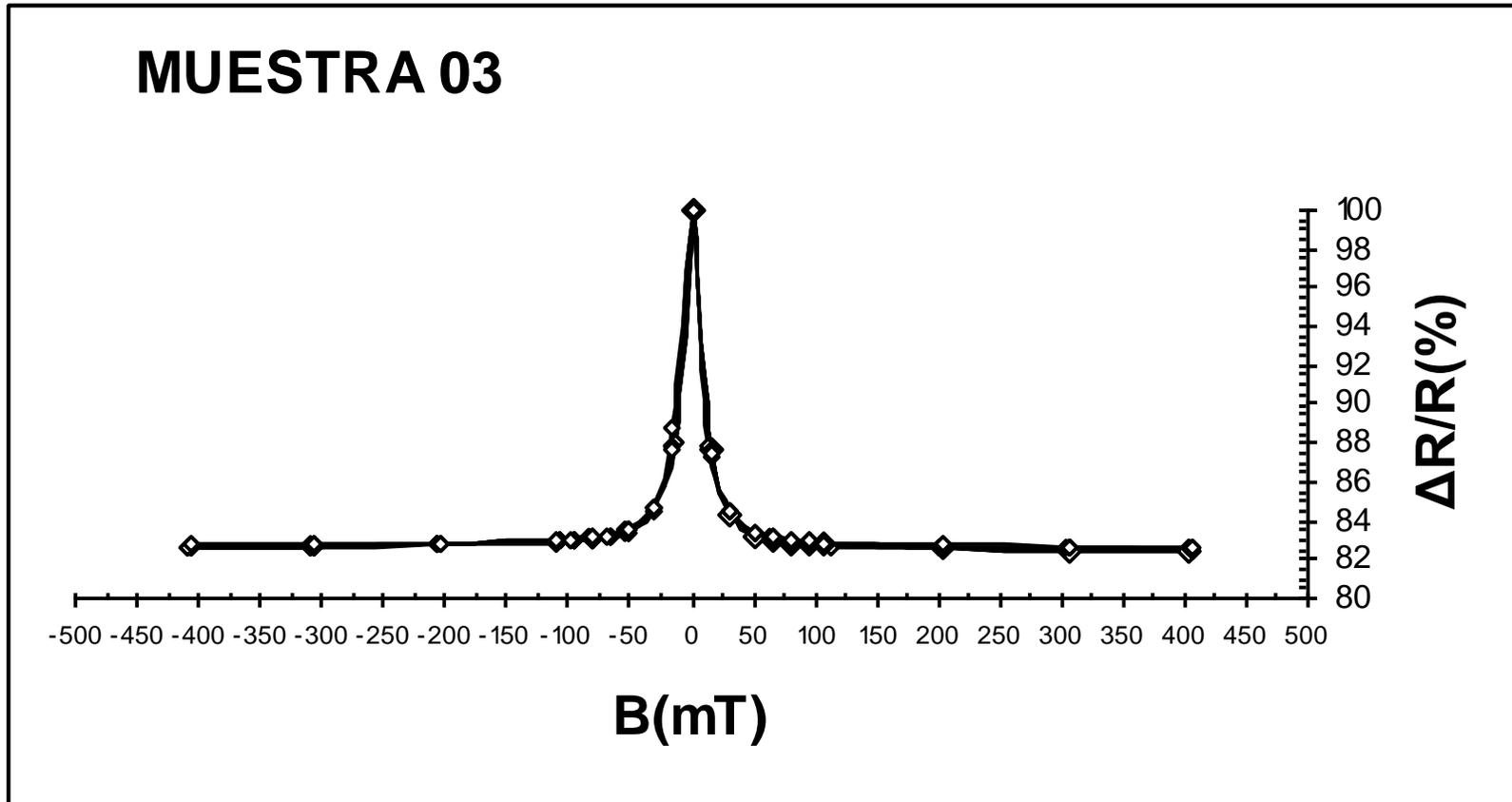


Figura 3.4: Efecto GMR para la muestra 03: Dependencia de la resistividad respecto a la inducción magnética, se hizo 8 recorridos completos en cada dirección del campo magnético.

Como se puede observar en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 las muestras presentan un decaimiento drástico en la resistividad respecto del campo magnético ( $\Delta R/R$ ), para variaciones relativamente pequeñas del campo, lo cual es un indicativo de una alta sensibilidad de los arreglos multicapa para campos magnéticos pequeños, al menos para los primeros 100mT en ambas direcciones del campo, siendo un indicativo de esto que en promedio el 96.06% de la variación total de la resistividad se observa para los 100 primeros miliTesla. Ciertamente, el valor de sensibilidad calculado como la pendiente de la curva a un tercio de la altura máxima de pico, es del orden de 0.94 %/mT.

Esta característica es efectivamente muy propicia para aplicaciones tecnológicas del efecto GMR, por ejemplo en el campo de la fabricación de sensores.

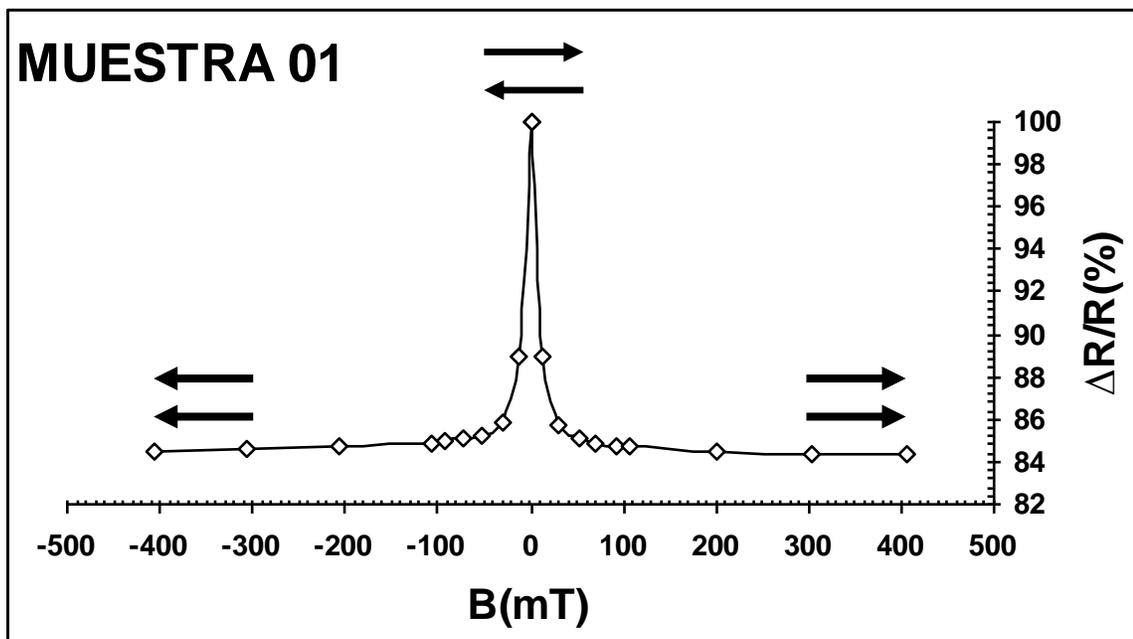


Figura 3.5: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 01

El fuerte decaimiento de la resistividad observado se explica por el hecho de que ha medida que el campo magnético aplicado al arreglo multicapa se va

intensificando, sus magnetizaciones, acopladas en un principio antiferromagnéticamente, van adquiriendo debido a la aplicación de este campo la configuración paralela de las sucesivas magnetizaciones del arreglo, logrando con esto cambiar las condiciones de dispersión de los portadores de carga en las sucesivas capas del arreglo, disminuyendo con ello notablemente el valor de la resistividad de la muestra.

Sin embargo, la variación de resistividad con respecto al campo magnético, producto del cambio de orientación de los momentos magnéticos, cesa significativamente en el instante que sus magnetizaciones adquieren en promedio la configuración ferromagnética (Figuras 3.5, 3.6 y 3.7). A este valor de campo se le conoce como campo de saturación y tiene un valor para las muestras medidas de alrededor de 100 a 150 mT.

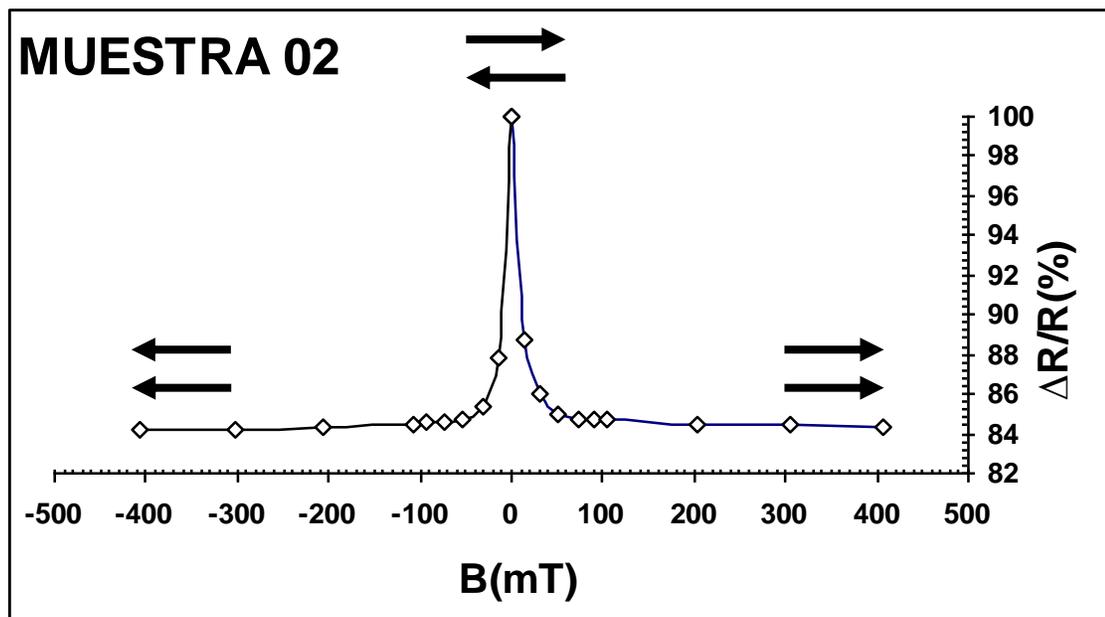


Figura 3.6: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 02

La respuesta magnetoresistiva de las muestras es indiferente a la orientación del campo magnético, propiedad que se manifiesta claramente en la alta simetría

observada en las gráficas dentro del error experimental cometido, ya que en promedio hay una diferencia del 0.18% entre la variación en la resistividad para campo positivo y negativo para las muestras. Esta simetría observada en la configuración utilizada, así como el orden de variación en la resistividad ( $\Delta R/R$ ) indican que estas muestras presentan el efecto magnetoresistivo gigante "GMR".

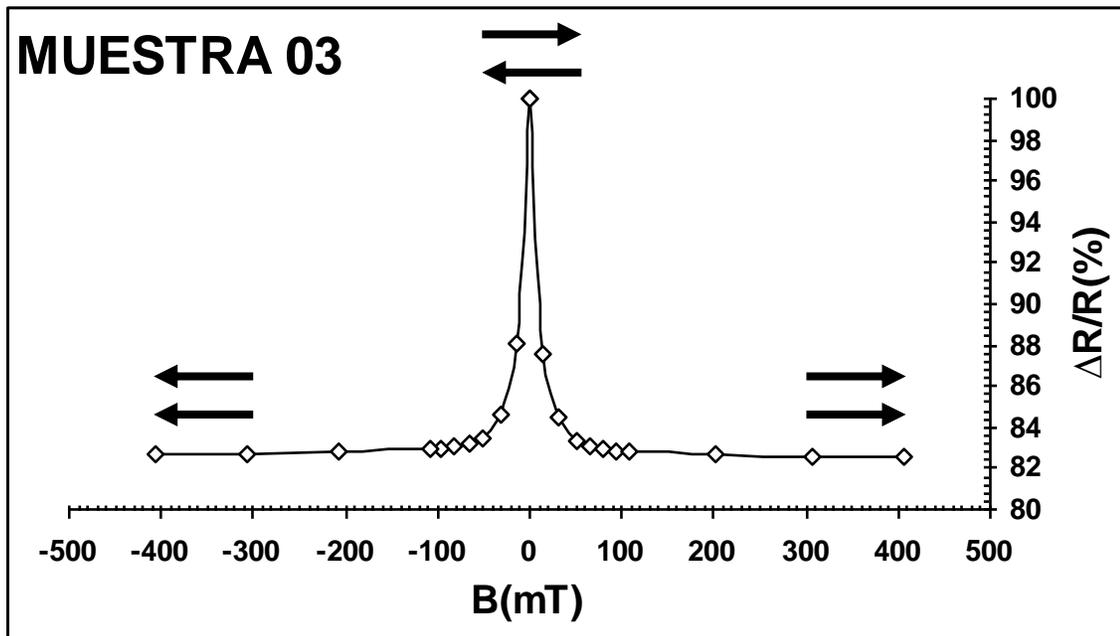


Figura 3.7: Gráfico efecto magnetoresistivo gigante promedio para la muestra 03

Para mayores detalles sobre la medición de las propiedades magnetoresistivas de las muestras, así como de su estructura y características ver Anexo 2 y Anexo 3.

## **Capítulo 4      CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1    CONCLUSIONES**

En la presente investigación se logró elaborar con éxito, mediante la técnica de evaporación al vacío, sistemas multicapa de películas delgadas, depositando alternadamente materiales magnéticos (Fe, ó Co) y un material no magnético (Cu) sobre sustrato de silicio, para posteriormente medirles sus propiedades magnetoresistivas.

El proceso involucró conocer en primer lugar la teoría relacionada con las propiedades magnetoresistivas y de transporte en sistemas multicapa de películas delgadas, y en especial el efecto “GMR” (efecto magnetoresistivo gigante) que se produce, por ejemplo, cuando materiales magnéticos y no magnéticos se depositan alternadamente, configurando un sistema con ciertas condiciones geométricas particulares. También fue necesario conocer aspectos teóricos tanto de las propiedades magnéticas de los sólidos (magnetismo atómico, ferromagnetismo, antiferromagnetismo, etc.) así como de las interacciones entre los momentos magnéticos localizados que determinan las distintas propiedades de los sistemas multicapa y específicamente cual es el mecanismo que conduce a la aparición del efecto “GMR”.

Finalmente se discutieron los distintos mecanismos de interacción magnética a distancia, responsables de los efectos magnetoresistivos en materiales cristalinos, de donde se puede concluir que no existe aun una teoría unificada que pueda explicar todos los fenómenos magnetoresistivos, por lo que se recurre a modelos fenomenológicos los cuales describen con buen grado de aproximación las características observadas para cada caso particular.

Desde el punto de vista experimental, también se logró medir con éxito, mediante el método de las cuatro puntas y con la elaboración de un arreglo para este fin, las propiedades magnetoresistivas tanto de las muestras elaboradas con la técnica de evaporación al vacío, así como una serie de muestras elaboradas con el método de sputtering en Alemania, las cuales fueron utilizadas con el fin de complementar el estudio en torno a las propiedades magnetoresistivas de sistemas multicapa de películas delgadas.

Al medir las propiedades magnetoresistivas de las muestras elaboradas con la técnica de evaporación al vacío se pudo observar una variación máxima del orden de un 2% en la resistencia de las mismas. Variaciones de este tamaño no pueden ser asociadas con el efecto magnetoresistivo gigante y es presumible que el excesivo error en el control de los espesores de cada película sea responsable de que no se lograra hacer “match” en la delicada geometría del sistema, para generar el necesario acoplamiento antiferromagnético entre las capas magnéticas sucesivas en el arreglo.

Cada película fue depositada con un espesor aproximado de  $(54 \pm 5) \text{ \AA}$ , y no fue posible mejorar este error, debido a las limitaciones experimentales del sistema de evaporación, las cuales son en todo caso superables, pero quedaron fuera del alcance de este trabajo.

Por otra parte las muestras elaboradas con el método de Sputtering mostraron variaciones en la resistividad del orden de **16 – 18%** para una variación de campo magnético de unos 100 mT, con una sensibilidad del orden de **1 %/mT**. Estos parámetros, junto con las características de la curva  $\Delta R/R \times B$ , como su forma y simetría para campos magnéticos con diferente polaridad, permiten definitivamente concluir que estas muestras presentan efecto “GMR” con una alta sensibilidad para campos pequeños. Estas características de las muestras

medidas son precisamente las deseables al pasar a una fase de aplicación tecnológica, por ejemplo, en la fabricación de sensores, los cuales normalmente deberán funcionar con una alta sensibilidad para campos muy pequeños.

En términos generales podemos afirmar que la investigación fue un éxito, ya que se logró elaborar arreglos multicapa con la técnica de evaporación al vacío posterior a la superación de distintos problemas de orden técnico, lo cual nos condujo a la posibilidad de poderles medir sus propiedades magnetoresistivas. El cumplimiento de estos objetivos permite abrir un nuevo campo de investigación en la Escuela de Física, mediante la adquisición de nuevos conocimientos y la puesta a punto de equipo (elaboración de distintos montajes, reparaciones y adaptes) permitiendo el desarrollo en torno a los sistemas multicapa de películas delgada y en general de la Física del Estado Sólido.

## **4.2 RECOMENDACIONES**

El campo de los efectos magnetoresistivos es reciente y continúa encontrando diversas aplicaciones tecnológicas en diversos dispositivos de almacenamiento de datos y en sensores, por lo que recomendamos continuar impulsando el tema en esta área de estudio multidisciplinario ya sea ofertándolo como tema de exposición con el objetivo que el estudiante avanzado lo conozca y le despierte un interés en esta área, o como tema de graduación para el estudiante egresado.

En este sentido se recomienda realizar estudios desde un punto de vista teórico del tema, ya que los fundamentos que describen las propiedades magnetoresistivas de los sólidos es todavía un tema que se encuentra en estudio, debido a que no existe un modelo teórico unificado que pueda explicar todas las propiedades magnetoresistivas observadas.

Desde el punto de vista experimental a pesar de que se logró fabricar sistemas multicapa complejos (es decir sistemas con múltiples capas), en esta área se tiene aun mucho por hacer, por lo que recomendamos a la Escuela de Física la adquisición de nuevos equipos con el fin de desarrollar de mejor manera esta área de investigación, facilitando con esto que el investigador pueda elaborar sistemas multicapa que efectivamente presenten efecto magnetoresistivo gigante, por ejemplo el control de los espesores de las películas evaporadas aun sigue siendo una variable sobre la cual no se tiene pleno control, por lo que se recomienda instalar a la máquina evaporadora algún dispositivo que controle el paso de corriente como puede ser un contactor (switch para manejo de corrientes muy grandes); lo que mejoraría en gran medida el control sobre los espesores depositados en cada evaporación.

Otro aspecto a tomar en cuenta es el vacío, donde se recomienda diseñar e instalar una trampa de nitrógeno, además de la instalación de un sistema cerrado de enfriamiento por agua para la bomba de difusión de la máquina evaporadora. Esto traería como consecuencia un mejoramiento sustancial en el vacío obtenido por la máquina, lo cual permitiría elaborar películas con una mejor calidad.

Por otra parte es importante conocer la estructura de las películas elaboradas, por lo que se recomienda la adquisición de equipos que permitan estudios en función de caracterizar la estructura de las muestras utilizando para ello por ejemplo un equipo de difracción de R-X entre otros.

Finalmente la realización de estudios de este tipo resultan de gran importancia, ya que contribuyen a desarrollar tanto la ciencia como la tecnología, aspectos que son necesarios para la generación de conocimientos que permitan dar solución a distintos problemas del país.

## BIBLIOGRAFIA

- Allenspach R. and Weber W. 1998. "GMR, Oscillatory Coupling, and Related Studies. Oscillatory magnetic properties". *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 42, No. 1. U.S.A.
- Bunshah Rointan F. 1982. "Evaporation" in *Deposition Technologies Films and Coating*. Noyes Publications. Park Ridge, New Jersey, U.S.A.
- Cahn, Hansen And Kramer. 1992. *Electronic and Magnetic Propierties of Metals and Ceramic, Part I. Material Science and Technology* vol. 3A.
- Derbyshire K., Korczynski E. 1995. "Giant Magnetoresistence for Tomorrow's Hard Drives". *Solid State Technolgy*. September.
- Gómez R. A. 1998. *Charakterisierung der elektrischen und magnetishchen Eigenschaften von heterogen granularen Dünnschichtstrukturen*. Universität Darmstadt.
- Gómez R. A. 2003. "Origen cuántico de las interacciones magnéticas". *Quehacer Científico*. Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador. El Salvador.
- Hartmann Uwe (ed). 2000. *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistence, Fundamentals and Industrial Aplications*. Springer series in Surface Sciences. Berlin Heidelberg.

- Jones B. A. 1998. "GMR, Oscillatory Coupling, and Related Studies. Theory of exchange coupling in magnetic multilayers". *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 42, No. 1. U.S.A.
- Kagánov M., Tsukérnik V. 1985. *La Naturaleza del Magnetismo*. Editorial MIR, Moscú.
- Landau L. D., Lifshitz E. M. 1972. *Curso de Física Teórica Vol. 3: Mecánica Cuántica No – Relativista*. Editorial Reverte S. A. Segunda Edición.
- Levy Peter M., Zhang S. 1996. "Current Status of our Understanding of magnenotransport in magnetic multilayer". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 164(1996) 284-292. Elsevier Science.
- McKelvey John P. 1976. *Física del Estado Sólido y de Semiconductores*. Editorial Limusa. Mexico.
- Nesbet R. K. 1998. "GMR, Oscillatory Coupling, and Related Studies. Theory of spin-dependent conductivity in GMR materials". *IBM Journal of Research and Development*. Vol. 42, No. 1. U.S.A.
- Parkin S. S. P. 1993. "Giant Magnetoresistance and Oscillatory Interlayer Coupling in Polycrystalline Transition Metal Multilayers". *IBM Research Division*. New York, California and Zurich.
- Pavlov P. V., Jojlov A. F. 1987. *Física del Estado Sólido*. Editorial MIR, Moscú.
- Smits F. M. 1958. Measurement of Sheet Resistivities with the Four Point Probe. *The Bell System Technical Journal*.

Strong J. 1965. *Técnicas de Física Experimental Tomo II*. EUDEBA Editorial Universitaria de Buenos Aires. Buenos Aires.

White Robert L. 1992. "Giant Magnetoresistance: A Primer". *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 28, No. 5.

Yosida Kei. 1998. *Theory of Magnetism*. Springer Series in Solid State Sciences. Berlin Heidelberg.

Zhang S., Levy P. M. and Fert A. 1992. "Conductivity and Magnetoresistance of magnetic multilayers structures". *Physics A Review. The American Physical Society*. Volume 45, number 15.

# ANEXOS

## Anexo 1: Método de las cuatro puntas

El propósito del método de las cuatro puntas es la medición de la resistividad, ya sea de un material cuyo espesor sea mucho mayor que sus dimensiones laterales (Muestra volumétrica) o muestras cuyo espesor sea mucho menor que sus dimensiones (Películas delgadas), se muestra esquemáticamente el método en la siguiente figura:

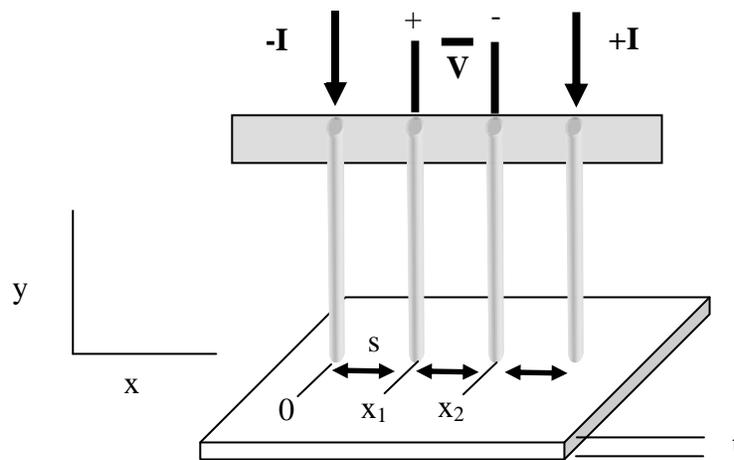


Figura 1: diagrama esquemático del método cuatro puntas

### Muestra volumétrica

Para el caso de una muestra semi - infinita cuyo espesor  $t \gg s$ , donde “s” es la separación entre las puntas de prueba, y si asumimos una simetría esférica de la corriente que emana de las puntas de prueba tenemos que a partir de la definición de resistencia en forma diferencial

$$\Delta R = \rho \left( \frac{dx}{A} \right)$$

y llevando a cabo la integración entre las puntas de prueba donde el voltaje es medido tenemos

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left( -\frac{1}{x} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} = \frac{1}{2s} \frac{\rho}{2\pi}$$

Por otra parte, debido a la superposición de corrientes en las dos puntas exteriores tenemos que  $R=V/2I$ , y sustituyendo en la ecuación anterior llegamos a la expresión de la resistividad para un volumen:

$$\rho = 2\pi s \left( \frac{V}{I} \right)$$

### **Películas delgadas**

Para una película muy delgada ( $t \ll s$ ), se obtiene anillos de corriente en lugar de esferas, por lo que la expresión para el área es  $A=2\pi xt$ , entonces

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xt} = \int_s^{2s} \frac{\rho}{2\pi t} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln(x) \Big|_s^{2s} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln(2)$$

y de acuerdo a lo anterior  $R=V/2I$ , por lo que la resistividad es:

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln(2)} \left( \frac{V}{I} \right)$$

Nótese que la expresión anterior ha sido derivada bajo la consideración de que la muestra es semi – infinita, por supuesto en la practica las muestras tiene dimensiones finitas y es necesario tomar en cuenta las condiciones de contorno. Sin embargo en diferentes trabajos se ha abordado el tema y se ha demostrado que para  $(t/s) \leq 0.5$  no se requiere la utilización de factores de corrección, así como para el caso en que la frontera mas cercana a las puntas de prueba sea al menos  $5s$ .

## Anexo 2: Datos en bruto, magnetorresistencia de las muestras

Tabla I: Datos para la muestra 00

RECORRIDOS					
1		2		3	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
12	0.901	12	0.899	12	0.908
51	0.901	51	0.898	51	0.907
102	0.901	101	0.898	106	0.906
57	0.901	155	0.898	156	0.907
203	0.900	205	0.898	205	0.907
254	0.900	252	0.898	255	0.907
305	0.900	302	0.898	305	0.907
350	0.900	354	0.898	350	0.907
403	0.900	405	0.898	402	0.907
450	0.900	452	0.898	451	0.907
501	0.899	501	0.897	501	0.907
603	0.899	605	0.898	600	0.907
702	0.899	707	0.897	701	0.906
801	0.898	802	0.897	802	0.906
905	0.897	903	0.897	906	0.906
1004	0.897	1002	0.897	1003	0.907
1101	0.897	1103	0.897	1104	0.907
1200	0.897	1200	0.896	1200	0.906

$$V(B=0)=(-.916\pm 0.001)\text{mV}$$

$$B\pm 1\text{mT}$$

$$V\pm 0.001\text{mV}$$

**Tabla II: Datos para la muestra 01 campo Positivo**

RECORRIDOS															
1		2		3		4		5		6		7		8	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
14	2.099	13	2.098	13	2.065	14	2.058	14	2.061	14	2.069	14	2.061	14	2.066
31	2.004	30	1.992	32	1.990	31	1.987	31	1.991	31	1.999	30	2.001	31	2.000
51	1.985	51	1.975	51	1.977	52	1.973	51	1.977	52	1.985	52	1.985	51	1.985
71	1.979	72	1.970	72	1.972	70	1.967	71	1.973	72	1.980	70	1.980	70	1.982
91	1.977	91	1.969	91	1.970	93	1.965	91	1.970	92	1.978	92	1.978	90	1.979
106	1.976	106	1.966	106	1.968	108	1.964	106	1.968	107	1.977	107	1.977	105	1.977
202	1.971	202	1.962	201	1.964	202	1.959	201	1.964	202	1.972	202	1.973	201	1.973
303	1.969	303	1.960	305	1.961	301	1.957	305	1.961	301	1.970	302	1.971	300	1.970
405	1.967	405	1.958	403	1.960	406	1.954	406	1.959	406	1.968	406	1.968	404	1.968
506	1.959	504	1.957	503	1.958	506	1.952	506	1.958	506	1.966	506	1.967	505	1.967
604	1.958	605	1.955	604	1.957	605	1.950	604	1.957	605	1.965	602	1.966	603	1.965
702	1.957	704	1.952	702	1.953	702	1.951	701	1.954	702	1.964	703	1.964	703	1.964
803	1.957	805	1.953	805	1.953	804	1.952	802	1.953	803	1.963	803	1.963	805	1.964
903	1.953	903	1.954	905	1.951	904	1.951	901	1.953	902	1.963	902	1.963	902	1.963
1004	1.952	1004	1.953	1006	1.950	1006	1.952	1005	1.952	1005	1.961	1004	1.962	1005	1.962
1102	1.951	1100	1.952	1101	1.949	1105	1.951	1104	1.952	1104	1.960	1105	1.961	1105	1.962
1202	1.951	1205	1.952	1204	1.947	1203	1.951	1204	1.951	1204	1.960	1203	1.961	1204	1.961

**$V(B=0)=(2.328\pm 0.001)mV$**

**$B\pm 1mT$**

**$V\pm 0.001mV$**

**Tabla III: Datos para la muestra 01 campo Negativo**

RECORRIDOS															
1		2		3		4		5		6		7		8	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
14	2.058	13	2.066	13	2.060	13	2.067	13	2.066	13	2.069	13	2.070	13	2.070
31	1.992	30	1.994	32	1.990	30	1.995	32	1.990	31	1.996	32	1.995	32	1.995
53	1.976	51	1.978	51	1.977	53	1.977	51	1.977	53	1.979	53	1.981	51	1.981
72	1.972	74	1.972	74	1.972	74	1.973	72	1.973	74	1.975	74	1.977	74	1.977
93	1.970	92	1.970	92	1.970	91	1.971	92	1.971	91	1.973	92	1.974	91	1.974
106	1.968	106	1.969	107	1.969	105	1.970	104	1.970	107	1.972	107	1.973	105	1.973
207	1.964	205	1.965	207	1.964	208	1.966	206	1.965	205	1.968	205	1.969	204	1.969
306	1.962	304	1.962	306	1.963	304	1.963	307	1.962	306	1.965	307	1.967	305	1.967
406	1.960	407	1.960	404	1.960	407	1.961	407	1.960	404	1.964	404	1.965	407	1.965
508	1.958	506	1.959	509	1.959	507	1.960	506	1.959	508	1.962	507	1.963	507	1.963
604	1.957	605	1.958	603	1.958	606	1.959	605	1.957	606	1.962	604	1.963	604	1.963
708	1.955	706	1.957	709	1.957	709	1.952	705	1.956	706	1.961	707	1.962	709	1.962
806	1.953	805	1.956	804	1.956	804	1.955	807	1.959	807	1.960	805	1.961	805	1.961
903	1.955	902	1.955	903	1.955	903	1.954	904	1.957	905	1.959	905	1.960	903	1.960
1002	1.954	1001	1.954	1002	1.954	1003	1.953	1004	1.957	1004	1.957	1004	1.959	1004	1.959
1107	1.953	1106	1.953	1105	1.954	1106	1.952	1103	1.955	1106	1.955	1105	1.958	1108	1.958
1200	1.952	1203	1.952	1205	1.953	1201	1.952	1206	1.955	1203	1.954	1203	1.957	1202	1.957

$$V(B=0)=(2.321\pm 0.001)\text{mV}$$

$B\pm 1\text{mT}$

$V\pm 0.001\text{mV}$

**Tabla IV: Datos para la muestra 02 campo Positivo**

RECORRIDOS													
1		2		3		4		5		6		7	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
14	2.094	13	2.083	13	2.083	13	2.086	13	2.085	13	2.088	13	2.089
32	2.016	31	2.010	31	2.010	32	2.011	32	2.012	31	2.014	30	2.017
51	2.000	50	1.996	50	1.997	51	1.998	50	2.000	50	2.001	50	2.003
70	1.995	72	1.991	72	1.993	73	1.994	73	1.995	73	1.997	72	1.998
93	1.992	91	1.990	92	1.991	91	1.992	93	1.993	90	1.995	90	1.997
104	1.991	105	1.988	106	1.990	106	1.991	106	1.992	104	1.994	103	1.996
206	1.986	208	1.984	206	1.986	207	1.987	203	1.988	201	1.990	201	1.992
302	1.984	305	1.982	301	1.983	304	1.985	305	1.986	305	1.988	307	1.989
407	1.982	405	1.980	407	1.982	408	1.983	408	1.984	406	1.986	404	1.988
501	1.980	502	1.978	504	1.980	503	1.982	504	1.982	503	1.984	501	1.987
604	1.977	602	1.977	603	1.979	601	1.981	606	1.981	604	1.982	603	1.986
707	1.975	708	1.976	706	1.977	705	1.979	707	1.980	708	1.982	707	1.985
802	1.974	803	1.975	804	1.977	804	1.978	804	1.979	802	1.981	805	1.984
903	1.974	903	1.974	905	1.976	904	1.977	900	1.978	901	1.981	905	1.983
1001	1.974	1001	1.974	1002	1.974	1002	1.977	1001	1.977	1004	1.979	1004	1.981
1104	1.973	1104	1.973	1103	1.974	1106	1.976	1106	1.977	1103	1.978	1102	1.981
1200	1.972	1206	1.972	1202	1.973	1205	1.975	1204	1.976	1206	1.976	1205	1.979

**$V(B=0)=(2.352\pm 0.001)mV$**

**$B\pm 1mT$**

**$V\pm 0.001mV$**

**Tabla V: Datos para la muestra 02 campo Negativo**

RECORRIDOS													
1		2		3		4		5		6		7	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
15	2.098	15	2.076	15	2.081	15	2.080	15	2.079	16	2.075	15	2.081
30	2.025	31	2.020	31	2.021	31	2.021	30	2.024	30	2.026	31	2.025
52	2.006	54	2.007	54	2.008	54	2.006	51	2.009	53	2.010	54	2.012
72	2.002	72	2.003	71	2.004	72	2.003	74	2.004	72	2.005	72	2.008
94	2.000	90	2.001	94	2.002	93	2.002	91	2.003	94	2.004	94	2.005
107	1.999	109	2.000	107	2.001	106	2.001	103	2.002	107	2.004	106	2.005
206	1.995	205	1.996	206	1.997	202	1.997	207	1.998	208	2.000	207	2.001
302	1.993	302	1.993	301	1.995	305	1.995	307	1.996	303	1.998	304	1.997
407	1.991	404	1.991	408	1.993	408	1.993	404	1.995	408	1.997	407	1.997
507	1.989	507	1.990	505	1.992	503	1.992	503	1.994	506	1.995	507	1.995
603	1.988	602	1.989	607	1.990	603	1.991	605	1.992	604	1.994	606	1.993
706	1.988	702	1.988	707	1.989	707	1.989	705	1.991	707	1.992	704	1.993
805	1.986	806	1.988	805	1.988	803	1.989	807	1.990	803	1.992	807	1.990
905	1.986	907	1.985	906	1.987	905	1.988	905	1.990	904	1.990	905	1.990
1006	1.985	1007	1.985	1007	1.986	1007	1.987	1005	1.988	1005	1.989	1007	1.990
1103	1.985	1101	1.985	1102	1.986	1107	1.987	1108	1.988	1100	1.989	1102	1.989
1207	1.983	1203	1.984	1201	1.984	1204	1.986	1203	1.988	1205	1.989	1206	1.988

**$V(B=0)=(2.369\pm 0.001)mV$**

**$B\pm 1mT$**

**$V\pm 0.001mV$**

**Tabla VI: Datos para la muestra 03 campo Positivo**

RECORRIDOS															
1		2		3		4		5		6		7		8	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
15	1.403	15	1.397	15	1.402	15	1.402	14	1.405	15	1.402	15	1.403	15	1.401
31	1.351	32	1.350	30	1.352	31	1.351	30	1.353	30	1.354	30	1.354	30	1.353
51	1.334	53	1.332	52	1.333	52	1.333	52	1.334	52	1.335	52	1.335	51	1.336
66	1.330	65	1.329	65	1.329	65	1.330	66	1.330	64	1.332	66	1.331	66	1.331
80	1.327	80	1.327	80	1.327	80	1.327	81	1.327	81	1.329	81	1.329	80	1.329
94	1.326	96	1.325	96	1.326	96	1.326	96	1.326	94	1.327	94	1.328	94	1.328
107	1.325	112	1.324	106	1.325	106	1.325	108	1.326	107	1.327	108	1.327	108	1.327
202	1.322	200	1.322	203	1.322	204	1.323	202	1.323	202	1.324	204	1.324	203	1.325
306	1.321	304	1.321	305	1.321	307	1.321	307	1.322	307	1.323	304	1.323	306	1.324
406	1.320	404	1.320	406	1.320	404	1.321	405	1.321	404	1.322	405	1.322	406	1.323
505	1.320	504	1.320	505	1.320	506	1.320	504	1.321	507	1.321	506	1.321	506	1.322
603	1.319	604	1.319	603	1.319	604	1.319	605	1.320	604	1.321	605	1.321	602	1.322
705	1.318	706	1.318	703	1.318	705	1.319	704	1.319	706	1.320	706	1.320	704	1.321
807	1.318	805	1.318	808	1.318	806	1.319	808	1.319	806	1.320	808	1.320	806	1.321
901	1.317	901	1.318	902	1.318	900	1.318	903	1.318	903	1.320	903	1.319	902	1.321
1007	1.317	1005	1.317	1006	1.317	1006	1.318	1007	1.318	1008	1.319	1004	1.319	1008	1.320
1107	1.317	1106	1.317	1106	1.317	1105	1.317	1105	1.318	1107	1.319	1108	1.319	1105	1.320
1207	1.316	1207	1.316	1206	1.316	1205	1.317	1205	1.317	1205	1.318	1205	1.319	1208	1.320

**$V(B=0)=(1.601\pm 0.001)mV$**

**$B\pm 1mT$**

**$V\pm 0.001mV$**

**Tabla VII: Datos para la muestra 03 campo Negativo**

RECORRIDOS															
1		2		3		4		5		6		7		8	
B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)	B(mT)	V(mV)
15	1.422	14	1.409	14	1.410	14	1.410	15	1.405	15	1.407	15	1.407	15	1.404
30	1.354	30	1.356	31	1.353	30	1.355	30	1.355	30	1.355	30	1.356	30	1.356
52	1.337	52	1.336	53	1.335	52	1.336	52	1.337	52	1.337	53	1.337	52	1.338
67	1.332	66	1.332	65	1.332	65	1.332	66	1.333	65	1.333	68	1.333	68	1.333
81	1.330	80	1.330	80	1.330	82	1.330	83	1.331	81	1.331	82	1.331	82	1.331
96	1.329	95	1.328	98	1.328	95	1.328	96	1.329	96	1.330	96	1.330	97	1.329
108	1.328	106	1.328	109	1.327	107	1.328	108	1.328	109	1.329	108	1.329	110	1.329
206	1.325	205	1.325	205	1.325	207	1.325	208	1.325	207	1.326	206	1.326	205	1.326
308	1.324	309	1.323	307	1.324	305	1.323	307	1.324	308	1.325	307	1.325	306	1.325
408	1.323	405	1.323	407	1.323	408	1.323	406	1.324	406	1.325	408	1.324	406	1.325
508	1.322	507	1.322	507	1.322	509	1.323	508	1.323	508	1.324	506	1.324	507	1.324
607	1.322	609	1.322	605	1.321	607	1.322	608	1.323	608	1.324	608	1.323	608	1.324
707	1.321	706	1.321	706	1.321	708	1.322	708	1.322	708	1.323	706	1.323	708	1.324
807	1.321	807	1.320	808	1.321	807	1.321	807	1.322	805	1.323	806	1.322	806	1.323
904	1.321	904	1.320	903	1.321	904	1.321	903	1.321	906	1.322	902	1.322	903	1.323
1008	1.320	1006	1.320	1008	1.320	1009	1.320	1009	1.321	1009	1.322	1006	1.321	1007	1.322
1109	1.322	1106	1.320	1110	1.320	1108	1.320	1106	1.321	1108	1.321	1110	1.321	1110	1.322
1208	1.319	1207	1.319	1209	1.319	1206	1.320	1209	1.320	1209	1.321	1209	1.321	1209	1.321

$V(B=0)=(1.601\pm 0.001)mV$

**B±1mT**

**V±0.001mV**

### Anexo 3: Cuadro Resumen de las Muestras

Muestra	Método de Elaboración	Características Físicas		Resistividad intrínseca $\Omega.cm$	$\Delta R/R(\%)$	Sensibilidad $\%/mT$	Calidad
		Dimensiones (mm)	Estructura				
1c	Evaporación al vacío	Porta muestra (vidrio)	Vidrio [Cu1340Å] $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Buena
1f	Evaporación al vacío	Porta muestra (vidrio)	Vidrio [(Fe1340Å) $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Buena
2c	Evaporación al vacío	23.08 x 11.43	Si[100][Cu1100Å] $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Mala
3c	Evaporación al vacío	23.05 x 11.52	Si[100][(Cu360Å) $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Buena
2f	Evaporación al vacío	23.05 x 11.52	Si[100][(Fe450Å) $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Buena
3f	Evaporación al vacío	23.05 x 11.52	Si[100][(Fe400Å) $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Mala
4f	Evaporación al vacío	Porta muestra (vidrio)	Vidrio [(Fe200Å) $\pm 5\text{Å}$	---	---	---	Buena
000	Evaporación al vacío	22.35 x 10.51	Si[100][(Fe120Å/Cu110Å)x3] $\pm 5\text{Å}$	$5.7214 \times 10^{-4}$	0.60	---	Buena
001	Evaporación al vacío	21.27 x 9.89	Si[100][ * + (Co57Å /Cu72 Å)x20+Co240Å] $\pm 5\text{Å}$	--	--	--	Mala
00	Evaporación al vacío	25.19 x 11.19	Si[100][Co285Å+ (Co45Å /Cu63 Å)x20+Co270Å] $\pm 5\text{Å}$	$9.8788 \times 10^{-5}$	1.28	---	Buena
01	Sputtering	18.35 x 10.89	Si[100][Co50 Å + (Co12 Å /Cu9 Å)x20 +Co50 Å] $\pm 1\text{Å}$	$4.6836 \times 10^{-5}$	16.05	0.90	Buena
					15.81	0.91	Buena
02	Sputtering	16.11 x 10.89	Si[100][Co50 Å +(Co12 Å /Cu10 Å)x20 +Co50 Å] $\pm 1\text{Å}$	$5.0633 \times 10^{-5}$	16.04	1.00	Buena
					16.17	1.05	Buena
03	Sputtering	21.31 x 10.89	Si[100][Co50 Å +(Co12 Å /Cu11 Å)x20 +Co50 Å] $\pm 1\text{Å}$	$3.3863 \times 10^{-5}$	17.72	0.89	Buena
					17.55	0.91	Buena

\* Se evaporó sin poderse medir el espesor