



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

INSTRUMENTACIÓN DEL FENÓMENO DE MAGNETORRESISTENCIA EN
FERROMAGNÉTICOS SUAVES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ZAPATA FARFAN JENNYFER

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARÍA HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ, CCADET

MÉXICO, D. F. OCTUBRE DE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Garduño Mejía Jesús
Secretario: Dra. Sánchez Pérez Celia Angelina
Vocal: Dra. Montiel Sánchez María Herlinda
1 er. Suplente: Dra. Mejía Uriarte Elsi Violeta
2 do. Suplente: Dr. Álvarez Lucio Guillermo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO, CCADET-UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DRA. MONTIEL SÁNCHEZ MARÍA HERLINDA

FIRMA

*-Penoso es luchar con el corazón,
cada uno de nuestros deseos se compra al precio de nuestra alma-*

Heráclito.

...La creatividad nace de la angustia, como el día nace de la noche oscura...

Albert Einstein.

Índice general

Agradecimientos	I
Declaración	IV
Resumen	VI
Objetivos	IX
Índice de figuras	XI
Introducción	1
1. Fundamentos de Electricidad y Magnetismo	3
1.1. Campo Eléctrico y Campo Magnético	3
1.2. Campos Eléctrico y Magnético dentro de los Materiales	5
1.3. Ley de Ohm: Resistencia y conductividad	6
1.4. Materiales aislantes, semiconductores y conductores	8
1.4.1. Aislantes	11
1.4.2. Semiconductores	11
1.4.3. Conductores	12
2. Materiales Magnéticos	13
2.1. Orden Magnético y Magnetización	13
2.1.1. Momento magnético	13
2.1.2. Materiales Diamagnéticos	14
2.1.3. Materiales Paramagnéticos	15
2.1.4. Materiales con Magnetismo Colectivo	16
2.1.5. Interacción de Intercambio	22
2.1.6. Anisotropía Magnética	22
2.1.7. Dominios Magnéticos	23
2.1.8. Coercitividad	25
2.2. Magnetorresistencia	26
2.3. Magnetorresistencia Anisótropa	28

3. Procedimiento Experimental	31
3.1. Implementación Experimental del Fenómeno de Magnetorresistencia . . .	31
3.2. Desarrollo del Software en LabVIEW®	35
3.3. Diseño y Construcción del Portamuestras	35
3.4. Metodología de la Medición	37
4. Resultados y Discusión	40
4.1. Calibración del Sistema	40
4.1.1. Caracterización del Au	43
4.1.2. Caracterización del Cu	46
4.2. Mediciones en Materiales Ferromagnéticos	50
4.2.1. Niquel	51
4.2.2. Vitrovac 6030	54
4.2.3. Vitrovac 6025	58
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	64
Bibliografía	67

Agradecimientos

Comenzaré agradeciendo a la UNAM, ésta máxima casa de estudios de la cual orgullosamente formo parte y tuve la oportunidad de desarrollar una más de mis metas profesionales.

Gracias a todos los doctores que han forjado mi camino en el CCADET, como amigos y como profesores, siempre dejando una enseñanza de vida y académica que sin duda no tiene precio.

Gracias al CONACYT por brindarme el apoyo financiero para la realización de éste trabajo de tesis.

Quisiera agradecer a mi familia, a mis padres Silvia y Alberto por todo el apoyo, por su interés en mi superación y confianza en mi proceder, sin lugar a duda sin ustedes nada sería igual. Y una vez más el puntito aquel que estaba a lo lejos fue alcanzado y de nuevo existe uno que lo suple para poder seguir forjando el camino, ya todos sabemos que “no te pasa nada”.

A mis hermanos Israel y Jonathan, muchas gracias por seguir siendo ese ejemplo que me motiva a alcanzar cada día más metas, gracias por darme la dicha de ser tía a Kary, Yesenia y a mis sobrinos Fer, Vale y Andy, los adoro gracias por tantos momentos divertidos.

A Manuel, gracias corazón por todo el tiempo tan divertido que hemos pasado juntos, por cada instante también de estrés al que hemos sobrevivido y gracias por el soporte que me brindas día a día, sin duda no sería tan divertida la maestría y la vida.

A todos mis amigos del CCADET, Itzel, Gus, Benja, Ramiro, Chucho, Pablo, Omar, Luis, los queridos alma mater porque en el laboratorio sólo se tolera la perfección y a ... ok... sólo la perfección.

A Migue e Isaac por su hospitalidad y momentos de diversión, sin duda la estadía

en el laboratorio ha sido mejor con amigos como ustedes, gracias por todo el tiempo, por aquellos días en los que tenemos que quedarnos hasta morir en el laboratorio y porque siempre tienen esa disponibilidad para ayudar en lo que sea necesario, y en lo que no también.

A mi tutora la Dra. María Herlinda, gracias por apoyarme en este camino de aprendizaje y superación.

Al equipo de trabajo Juan, Lalo, Ever, Mary, Fer y Frank, por sus comentarios y la retroalimentación que hacen más interesante cada seminario y por esa disposición de compartir conocimientos.

A mis amigas por todo su apoyo y por ser mi segunda familia: Jessy, Liza, Elisa, Nicky e Itzel, las quiero mucho.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Jennyfer Zapata Farfan. México, D.F., 2015

Resumen

En este trabajo se estudia el fenómeno de Magnetorresistencia Anisótropa (AMR por sus siglas en inglés *Anisotropic Magnetoresistance*), la cual se define como la variación de la resistencia en función de la orientación de la corriente aplicada con respecto a un campo magnético externo, éste fenómeno ocurre en metales y en el caso del presente trabajo se detectó en materiales ferromagnéticos ultra suaves.

El trabajo se divide en dos partes, la primera se centra en la implementación de la técnica de magnetorresistencia (MR) y la segunda en la detección del fenómeno de MR en ferromagnéticos ultra suaves. Lo anterior se realizó con el objetivo de detectar una corriente de espín y establecer la magnitud del fenómeno y condiciones bajo las cuales ocurre.

La principal contribución del trabajo es la detección del cambio de ΔR para materiales ferromagnéticos, mismos que se asocian con dispersiones originadas por el espín.

Cabe mencionar que la corriente de espín es un fenómeno que aún no se ha podido detectar, en este trabajo se propone que los cambios originados en la corriente eléctrica en materiales ferromagnéticos tienen origen en el acoplamiento magnético del espín.

Para ello se realiza un sistema de caracterización con el cual se lleven a cabo mediciones en materiales puramente metálicos y metálicos-ferromagnéticos que ayuden en el entendimiento del proceso ocurrido al someter una muestra a campo magnético.

Para la detección de la variación de la resistencia, se emplea un equipo medidor de conductancias y se genera un campo magnético a partir de un electroimán en el rango de -2 mT a 2 mT.

Los equipos se sincronizan y controlan mediante un software en LabVIEW, el cual controla la corriente y el barrido en campo magnético que se suministra a la muestra para observar el comportamiento eléctrico de la misma. Debido a que el porcentaje de cambio de la AMR es del 5 al 20 %, se requiere un portamuestras basado en el método Kelvin (también conocido como método de 4 puntas), ya que permite medir resistencias

menores a 10Ω reduciendo la contribución eléctrica por contacto óhmico que se tiene al medir con un voltímetro convencional, con ello se tiene una medición más precisa del valor de la resistencia. Se destaca la importancia del diseño del porta-muestras debido a que no existen dispositivos comerciales de 4 puntas para la medición de MR en ferromagnéticos.

Se realizaron mediciones en conductores tales como Au y Cu los cuales son considerados como materiales patrón para determinar el funcionamiento adecuado del equipo. En los materiales metálicos el cambio en la resistencia se asocia al efecto Hall.

En los materiales ferromagnéticos se encontró un menor porcentaje de cambio de ΔR , mismo que se atribuye a la anisotropía magnética del material, por lo que la magnitud del efecto AMR se minimiza, sin embargo se determina que si existe AMR (Magnetorresistencia anisótropa), ya que el cambio de la resistencia varía de acuerdo a la orientación con la que la muestra sea excitada con campo magnético.

Objetivos

Objetivo General

Instrumentar el fenómeno de magnetorresistencia (MR) para la caracterización de ferromagnéticos suaves con el objetivo de determinar la posible existencia de una corriente de espín.

Objetivos Particulares

- Diseñar y construir un porta-muestras para la colocación de los materiales a caracterizar.
- Diseñar el software de control para un medidor de conductancia, un electroimán y un teslámetro.
- Calibrar el sistema con un material estándar o patrón.
- Establecer un protocolo de medición para la implementación de la técnica de MR.
- Medir aleaciones para la detección del efecto de MR y validación del sistema.

Índice de figuras

1.1. Representación de las líneas de Campo Eléctrico entre dos cargas puntuales de signos contrarios.	4
1.2. Dispersión del electrón por choques en una estructura.	7
1.3. Curvas de distribución de fuerza y energía interatómica.	10
1.4. Tipos de enlaces primarios.	11
1.5. Representación de la teoría de bandas para materiales conductores, semiconductores y aislantes.	12
2.1. Comportamiento de un material diamagnético superconductor.	15
2.2. Momentos magnéticos atómicos de un material paramagnético.	16
2.3. Estructura de dominios de un material Ferromagnético.	17
2.4. Alineación magnética de un material Ferrimagnético.	17
2.5. Disposición de momentos magnéticos en un material Antiferromagnético.	18
2.6. Orden Magnético a) Ferromagnético a $T=0$ K, b) Antiferromagnético a $T=0$ K, c) Ferrimagnético a $T=0$ K y d) Paramagnético=Ferromagnético con T_C	19
2.7. Curva de magnetización de un material magnético.	20
2.8. Procesos magnéticos ocurridos en un material magnético al ser sometido a campo magnético externo.	21
2.9. Interacción de intercambio en una red magnética.	22
2.10. Anisotropía Magnética: a-c) representación de la anisotropía de forma con momentos magnéticos d) anisotropía magnetocristalina.	23
2.11. Representación gráfica de la pared de dominio de un material ferromagnético.	24
2.12. Estructura de dominios en distintos tipos de materiales.	25
2.13. Ciclos de histéresis para distintos materiales magnéticos.	26
2.14. Lazo de histéresis donde se observan los fenómenos de nucleación y anclaje.	26
2.15. Dispersión electrónica debida a colisiones con la estructura.	27

2.16. Rangos típicos de sensores magnéticos basados en el fenómeno de Magnetorresistencia - AMR: Magnetorresistencia Anisótropa, SV: sensores de válvula de espín, InSb: Semiconductores Magnetorresistivos, GMR: Sensores multicapa de magnetorresistencia gigante, CMR: sensores de magnetorresistencia colosal.	28
2.17. Curva de AMR de un material ferromagnético.	29
2.18. Curva de respuesta de MR para el óxido de magnanita.	30
3.1. Implementación del método Kelvin o de 4 puntas para la medición de resistencia.	32
3.2. Mediciones de MR a baja temperatura en la universidad de Ohio, departamento de Investigación Física (izquierda) y laboratorio del instituto de la facultad de Ciencias de la UNI de Perú, grupo de materiales nanoestructurados (derecha).	32
3.3. Medidor de conductancias marca Keithley.	33
3.4. Curva de calibración del electroimán GMW para diferentes distancias entre los polos magnéticos.	34
3.5. Panel de control de la fuente de alimentación.	35
3.6. Sustitución del Test-Fixture (TF): a) TF comercial, b) TF desarrollado en el CCADET	36
3.7. Prototipo No.1 del porta muestras.	36
3.8. Prototipo No. 2 del porta muestras.	37
3.9. Sistema de caracterización implementado.	38
3.10. Arreglos para mediciones de AMR, a) Arreglo 1: corriente perpendicular al flujo de campo magnético, b) Arreglo 2: corriente paralela al flujo de campo magnético.	39
4.1. Respuesta eléctrica lineal de Au para campo magnético de ± 2 mT.	41
4.2. Respuesta de MR del Au en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	43
4.3. Respuesta de MR del Au en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	44
4.4. Respuesta de MR del Au en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	46
4.5. Respuesta de MR del Cu en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	47
4.6. Respuesta de MR del Cu en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	48
4.7. Respuesta de MR del Cu en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	49
4.8. Respuesta de MR del Ni en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	51
4.9. Respuesta de MR del Ni en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	52

4.10. Respuesta de MR del Ni en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	54
4.11. Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	55
4.12. Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	56
4.13. Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	57
4.14. Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	59
4.15. Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	60
4.16. Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.	61
4.17. Curvas de comparación de la respuesta de ΔR para cada material. a) Arreglo 1, b) Arreglo 2	62
4.18. Resultados para las mediciones de AMR en ferromagnéticos ultrasuaves.	63

Introducción

Actualmente los estudios para la determinación del fenómeno de magnetorresistencia anisótropa se encuentran especializados en óxidos metálicos, sin embargo dicho fenómeno también se encuentra presente en materiales ferromagnéticos suaves con propiedades igualmente metálicas.

Los materiales ferromagnéticos son ampliamente utilizados en dispositivos de almacenamiento, sensores de presencia, entre otras implementaciones en el área automotriz, de comunicaciones, militar y medica. Por lo anterior, y debido que el magnetismo es un área en desarrollo se decidió dedicar este trabajo de tesis a la caracterización magnetoeléctrica de materiales ferromagnéticos.

Para la medición de éstos materiales, se tiene registro de la implementación del método Kelvin o también llamado método de 4 puntas, sin embargo no existe instrumentación comercial para la determinación de la magnitud del fenómeno.

Se emplean materiales ferromagnéticos suaves ya que se requieren campos magnéticos de baja intensidad para excitarlos y generar una respuesta, por lo que es importante llevar a cabo un estudio detallado del comportamiento eléctrico dependiente de la magnetización, ya que de acuerdo a su respuesta se puede contribuir a la construcción de dispositivos más pequeños y sensitivos.

Para la implementación de la técnica de 4 puntas, se propone un diseño de portamuestras que permita la medición de parámetros como Voltaje y Corriente, mismo que se construye para las condiciones de los equipos que se tienen en el laboratorio de magnetismo del grupo de Materiales y Nanotecnología.

Al no existir dispositivos o puntas comerciales se pretende introducir un modelo que permita la medición de dichos parámetros, valorar su respuesta y establecer un protocolo de medición que valide la técnica de caracterización en ferromagnéticos suaves.

Con lo anterior se establecen las bases de medición de MR en ferromagnéticos suaves, trabajo que en México no se ha reportado, esto debido a la falta de instrumentación en los grupos de trabajo del área de magnetismo.

Fundamentos de Electricidad y Magnetismo

1.1. Campo Eléctrico y Campo Magnético

Campo Eléctrico

Al hablar de campo eléctrico, se habla de un campo vectorial que permite determinar la fuerza ejercida sobre una carga en una determinada posición en el espacio [1]. La magnitud del campo magnético se expresa como fuerza por unidad de carga, cuya contribución puede ser aproximada mediante una carga llamada *carga de prueba* sobre la cual se realiza el cálculo de los Newtons que se ejercen por acción de otra carga en un punto distinto del espacio. Por convención y con el objetivo de poder determinar la dirección del campo eléctrico, el signo de la carga eléctrica de prueba se toma positivo.

De acuerdo a la ley de Coulomb¹[2], alrededor de una carga eléctrica se forma un espacio en el cual existen líneas de flujo eléctrico, mismas que pueden interaccionar con otras cargas, y en caso de que éstas se encuentren lo suficientemente cerca, las propiedades de dicho espacio se ven modificadas. El primer concepto de campo eléctrico lo propuso Faraday²[3] en 1832 con el principio de inducción magnética [4], el cual se refiere a la generación de una fuerza electromotriz (FEM) en un conductor cuando éste se somete a un campo magnético.

Tomando en cuenta a la carga de prueba o bien una carga positiva aleatoria, el

¹Llamada así en honor al físico, matemático e ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806).

²Michael Faraday 1791-1867, físico y químico británico que realizó aportaciones en el área de electromagnetismo y electroquímica.

campo eléctrico se encuentra dirigido hacia afuera de manera radial y viaja hacia el interior de la carga negativa (ver figura 1.1). El efecto de este campo se puede observar en un espacio determinado al rededor de la carga, mismo que decrece rápidamente conforme se aumenta la distancia. La intensidad de campo eléctrico se obtiene dividiendo la fuerza eléctrica por la magnitud de la carga de prueba [4], [5] como se observa en la ecuación 1.1, donde las unidades de campo en el sistema internacional (SI) son Newton por Coulomb [N/C].

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q} \quad (1.1)$$

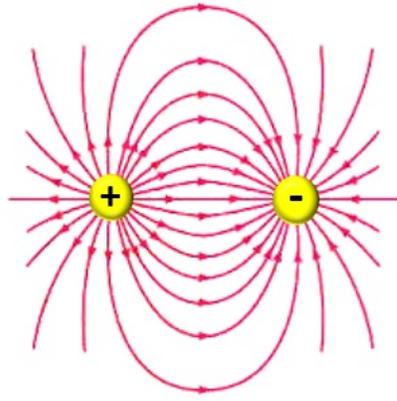


Figura 1.1: Representación de las líneas de Campo Eléctrico entre dos cargas puntuales de signos contrarios.

Campo Magnético

El campo magnético, al igual que el eléctrico hace referencia a una región en el espacio sobre la cual actúan las líneas de fuerza al rededor de un dipolo magnético o carga eléctrica en movimiento. En cualquier punto, éste se encuentra especificado por dos valores, la dirección y la magnitud [6]. Se trata de un vector axial y se define en términos de la fuerza de Lorentz¹[7] la cual explica la fuerza experimentada por una partícula que se encuentra inmersa en un campo magnético. Dicha ley se puede expresar a partir de la densidad de corriente de una partícula en una trayectoria arbitraria, quedando una fuerza neta como se observa en la ecuación 1.2 [8].

$$\mathbf{F} = qv \times \mathbf{B} \quad (1.2)$$

Si la partícula se somete a campos eléctrico y magnético, la fuerza electromagnética total se expresa como se observa en la ecuación 1.3, donde v es la velocidad de la carga,

¹Llamada así en honor al físico Holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928).

\mathbf{E} es la intensidad de campo eléctrico y \mathbf{B} es la inducción magnética. Dicha expresión pone en manifiesto que una carga que se encuentra en movimiento relativo con respecto a una fuente, experimenta una fuerza conocida como fuerza magnética [5].

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.3)$$

1.2. Campos Eléctrico y Magnético dentro de los Materiales

Tanto el campo magnético \mathbf{H} como la inducción magnética \mathbf{B} se relacionan mediante $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$, relación que sólo se considera en el vacío, al introducir un material se incluye un término llamado vector de magnetización, cuya magnitud se define como la densidad de volumen de momentos magnéticos y la expresión se reescribe como se muestra en la ecuación 1.4 [9], [10].

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (1.4)$$

La magnetización es una propiedad que determina el valor máximo de campo magnético que puede ser generado por un cuerpo totalmente magnetizado [9]. Dentro de un material \mathbf{B} y \mathbf{H} pueden ser diferentes en magnitud y dirección debido a la magnetización, por ejemplo, si \mathbf{M} es paralela al campo magnético externo \mathbf{H} , se introduce un término llamado susceptibilidad magnética χ como se muestra en la ecuación 1.5, la cual describe la linealidad de un material al ser expuesto a un campo magnético, dando lugar a una relación lineal entre \mathbf{B} y \mathbf{H} la cual se expresa mediante la ecuación 1.6 [11], [12]. La susceptibilidad magnética, propuesta por William Thomson (Lord Kelvin) se define como el grado de magnetización de un material sometido a un campo magnético [13].

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H} \quad (1.6)$$

De la ecuación 1.6, se define otro término llamado permeabilidad magnética $\mu_0(1 + \chi)$, se expresa de acuerdo a la ecuación 1.7, con μ_r como la permeabilidad relativa, cuyo valor típico en el vacío es $\mu_r = 1$ y en la materia en general $\mu_r \geq 1$ [1], [9].

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (1.7)$$

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), las unidades de \mathbf{H} son Amperes por metro (A/m), mientras que su unidad en el sistema gaussiano¹ [14] es el Oersted (Oe)

¹(Denominado así en honor al matemático, astrónomo, geodesta y físico alemán Carl Friedrich Gauss).

cuyo análisis dimensional corresponde al gauss; el valor para μ_0 es $4\pi \times 10^{-7} \text{VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$ aplicable al vacío, en cuyo caso también se puede decir que $B=1$ Tesla (T) correspondiente a $H = 10^4$ Oe [9], [15], [16].

La unidad de \mathbf{B} en el SI es el tesla (T), que equivale a Weber por metro cuadrado (Wb/m^2) o bien volt-segundo por metro cuadrado (Vs/m^2), también expresado en unidades fundamentales como $\text{kg s}^{-2}\text{A}^{-1}$. En el sistema de unidades gaussiano se expresa como gauss (G), siendo a su vez $1 \text{ maxwell}/\text{cm}^2$ que equivale en unidades cegesimales fundamentales a $\text{cm}^{-1/2}\text{g}^{1/2}\text{s}^{-1}$ [15].

De acuerdo a lo anterior, al tener una carga en movimiento se tiene una corriente eléctrica, misma que puede fluir en el vacío si se le inyectan portadores de carga o bien en un material metálico aplicando un voltaje. La fuerza de la corriente eléctrica I se define como la carga que fluye a través de una sección transversal Δt , tal como lo muestra la ecuación 1.8 [9], cuya unidad es el Ampere¹ [17].

$$I = \frac{q}{\Delta t} \quad (1.8)$$

En materiales metálicos se presenta la propiedad de conducción de corriente eléctrica, dicha propiedad se asocia principalmente con los conceptos de resistencia y conductividad, los cuales varían de material a material dependiendo de su estructura atómica.

La corriente puede fluir por una red metálica debido a la presencia de un gran número de electrones cuasi-libres que se encuentren bajo influencia de un campo eléctrico aplicado [18].

1.3. Ley de Ohm: Resistencia y conductividad

La ley de Ohm es la observación experimental de que a temperatura constante, la relación entre la densidad de corriente (J) en un conductor metálico y el campo eléctrico (E) es una constante, lo cual puede ser expresado mediante la ecuación 1.9, donde ρ y σ son conocidas como resistividad y conductividad eléctrica respectivamente.

$$\frac{J}{E} = \frac{1}{\rho} \quad \text{o} \quad \frac{J}{E} = \sigma \quad (1.9)$$

Al aplicar una corriente (I) a un conductor cuya sección transversal (A) se considera uniforme y siendo su longitud l , se produce una diferencia de potencial (ddp) o voltaje (V), teniendo las siguientes relaciones:

$$E = \frac{V}{l} \quad \text{y} \quad J = \frac{I}{A} \quad (1.10)$$

¹El Ampere se definió como la unidad de medida de corriente en honor al matemático y físico francés André-Marie Ampère, 1775-1836.

Sustituyendo 1.9 en la ecuación 1.10 se tiene:

$$\frac{V}{I} = \frac{\rho l}{A} \quad (1.11)$$

En la expresión 1.11, el término $\rho l/A$ es llamado resistencia eléctrica del conductor (R) obteniendo una expresión alternativa a la ley de Ohm (ecuación 1.12) [18].

$$V = IR \quad (1.12)$$

Si se tiene un conductor al cual se le aplica un voltaje, existirá por lo tanto una corriente y éste opondrá cierta resistencia de acuerdo a la ley de Ohm, ya que por definición general, la resistencia eléctrica es la oposición que presenta un conductor al paso de la corriente y representa el coeficiente de proporcionalidad entre la diferencia de potencial aplicada y la intensidad obtenida [17].

La resistencia eléctrica se encuentra relacionada con el camino libre medio del electrón al atravesar un material y hacer circular una corriente. Al pasar un flujo de electrones a través de un material, éstos chocan con la estructura atómica del mismo [19]; debido a las colisiones (ver figura 2.15), el electrón no puede seguir una trayectoria recta, lo que produce una dispersión que se refleja en un aumento del tiempo que tarda en atravesar el material y a su vez, la dispersión se traduce en una oposición de la trayectoria libre del electrón. Éste proceso da lugar a la existencia de resistencia eléctrica, si se tienen pocas dispersiones, la resistencia eléctrica disminuye debido a que existen menos oposiciones en la trayectoria del electrón.

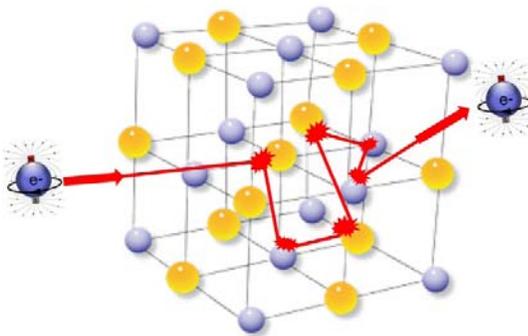


Figura 1.2: Dispersión del electrón por choques en una estructura.

Si las dimensiones del conductor son conocidas, se puede calcular una propiedad adicional llamada resistividad eléctrica (ρ), la cual es dependiente de la presión y la temperatura, en caso de tratarse de una aleación. El valor de ρ adicionalmente dependerá de la composición química de acuerdo a las proporciones de impurezas que contenga el material. Sus unidades son Ωm y es una propiedad específica para cada

material cuyo valor depende del volumen de este. Su valor puede ser determinado mediante la expresión 1.13, donde R es la resistencia eléctrica del material y el término S/l es una relación geométrica entre el área que tiene el conductor y su longitud, por las cuales se asegura que exista un flujo de corriente.

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (1.13)$$

En el caso de películas delgadas, utilizadas en este trabajo de tesis, en 1938 K. Fuchs¹ predijo que la resistividad eléctrica se incrementa al decrementar su espesor [20], más tarde se hizo obvio que las dispersiones que existen en la frontera de grano de los materiales así como la rigidez de la superficie y la interfaz determinan la respuesta eléctrica de las películas [21], [22].

Por otro lado se tiene el concepto de conductividad eléctrica, magnitud inversa a la resistividad, y se refiere a la propiedad de los materiales de permitir el paso de corriente eléctrica a través de estos, su valor depende de la estructura atómica del material ya que mientras más electrones de valencia existan, mayor conductividad se presenta, un ejemplo de ello son los metales, cuya movilidad electrónica es alta debido a los enlaces débiles que tienen los electrones que se encuentran en la última capa. Las unidades de la conductividad eléctrica son los Siemens por metro, expresados como S/m o bien $\Omega^{-1}m^{-1}$.

Análogo a la resistividad y conductividad (magnitudes inversas), se tiene una magnitud inversa a la resistencia, la cual es denominada conductancia eléctrica (G), su unidad de medida de acuerdo al SI es el Siemens. Frenkel² supuso que bajo la influencia de vibraciones térmicas, los iones reciben suficiente energía para dejar sus posiciones en la red, cambiando de lugar y dejando sitios vacíos, los cuales posteriormente se ocupan por otros electrones. Al hacer fluir una corriente por el material, el proceso anterior de cambio de lugar de los iones promueve una dispersión electrónica que a su vez modifica la conducción, debido al desorden que existe en la red [23].

1.4. Materiales aislantes, semiconductores y conductores

En los materiales, los electrones de los átomos se distribuyen en diferentes capas electrónicas y orbitales, los cuales son atraídos por la carga positiva existente en el núcleo, muchas de las propiedades físicas de los materiales se basan en el conocimiento de las fuerzas interatómicas de enlace en los átomos.

El modelo más utilizado para explicar la interacción atómica es considerar dos átomos aislados con separación infinita que se van aproximando, la interacción a esta

¹Emil Julius Klaus Fuchs, 1911-1988, físico teórico alemán, destacado entre otras cosas por participar en el proyecto Manhattan.

²Yakov Ilich Frenkel, 1894-1952, físico soviético reconocido por sus aportaciones en física de la materia condensada.

distancia es despreciable, sin embargo al acercarse se presenta una energía de intercambio entre átomos, esta contribución puede deberse a fuerzas de atracción (F_A) y repulsión (F_R). La magnitud de la fuerza se modifica en función de la distancia interatómica (ver figura 1.3 (a)).

El origen de la fuerza de atracción (F_A) tiene que ver con el tipo de enlace existente, mientras que la repulsión (F_R) se debe al traslape que existe entre los niveles más externos de los átomos, por lo que la fuerza total está dada por la expresión 1.14. La fuerza es cero, si y sólo si, F_A y F_R son iguales en magnitud, en este caso existirá un equilibrio a una distancia determinada (r_0), para un gran número de átomos, esta distancia suele estar en el orden de los 0.3 nm.

$$F_N = F_A + F_R \quad (1.14)$$

Para relacionar las fuerzas de atracción y repulsión con la energía potencial del sistema, se pueden utilizar las expresiones de 1.15 a 1.19.

$$E = \int F dr \quad (1.15)$$

$$E_N = \int_i n f_r F dr \quad (1.16)$$

$$E_N = \int_{\infty}^r F_N dr \quad (1.17)$$

$$E_N = \int \infty^r F_A dr + \int \infty^r F_A dr \quad (1.18)$$

$$E_N = E_A + E_R \quad (1.19)$$

En la figura 1.3 (b) se pueden observar la energía de repulsión (E_R), la separación interatómica (r), la energía resultante (E_N), la energía de atracción (E_A) y energía de enlace entre los átomos (E_0), donde ésta última corresponde a la energía necesaria para separar dos átomos a una distancia infinita, también se puede ver que la energía es mínima cuando la fuerza entre los átomos es nula.

En la naturaleza, las sustancias se forman por átomos de diferentes elementos enlazados entre sí eléctricamente, los enlaces primarios pueden ser de distintos tipos como iónicos, covalentes o metálicos, en la figura 1.4 se muestran las principales características de los enlaces atómicos primarios. De acuerdo al enlace se derivan propiedades específicas en los materiales, las cuales permiten dividir a los materiales en conductores, semiconductores y aislantes [24].

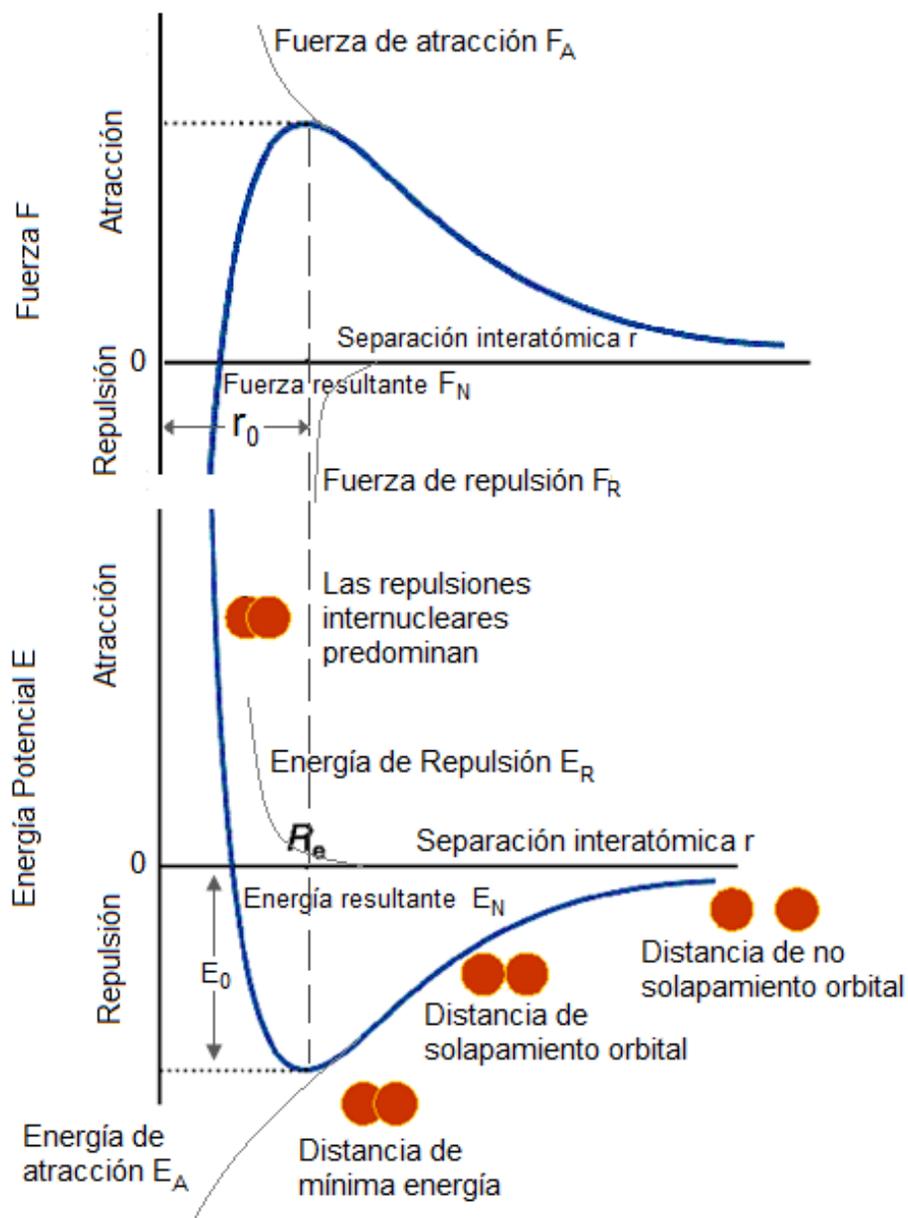


Figura 1.3: Curvas de distribución de fuerza y energía interatómica.

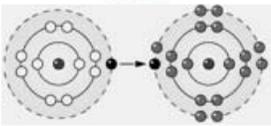
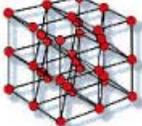
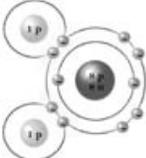
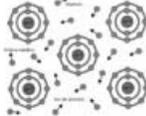
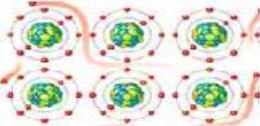
TIPO DE ENLACE	TIPO DE ESTRUCTURA	PROPIEDADES
<p>Iónico</p> 	<p>Red iónica</p> 	<p>Sólidos cristalinos Puntos de fusión y ebullición elevados Solubles en agua Conductores de electricidad en disoluciones No conductores de electricidad en edo. Sólido</p>
<p>Covalente</p> 	<p>Moléculas simples</p> 	<p>Principalmente líquidos y gaseosos Puntos de fusión y ebullición bajos Insolubles en agua No conductores de electricidad</p>
	<p>Moléculas compuestas</p> 	<p>Sólidos Puntos de fusión y ebullición elevados Solubilidad y conductividad variable</p>
<p>Metálico</p> 	<p>Red metálica</p> 	<p>Dúctiles y maleables Puntos de fusión y ebullición elevados Insolubles en agua</p>

Figura 1.4: Tipos de enlaces primarios.

1.4.1. Aislantes

El material aislante tiene una banda de valencia llena en su totalidad, la razón por la cual no conducen es porque la separación entre la banda de valencia y la banda de conducción es muy grande, por lo que la movilidad de un electrón a la banda de conducción es imposible.

En este caso, los electrones están confinados a sus órbitas, en circunstancias normales no pueden liberarse incluso si se aplica un campo magnético externo. Si el intervalo de energía de la banda prohibida o *bandgap* es relativamente pequeño, bastan pequeñas cantidades de energía externa para excitar y promover el movimiento de los electrones de la banda de valencia llena a la banda siguiente. En el caso de los aislantes, las cantidades de cargas libres o en movimiento son muy reducidas, por lo que su contribución en la conducción es despreciable [25], [26].

1.4.2. Semiconductores

Los semiconductores tienen propiedades eléctricas intermedias entre los conductores y los aislantes eléctricos. Las características eléctricas de los semiconductores son extremadamente sensibles a la presencia de diminutas concentraciones de átomos que funcionan como impurezas, mismas que deben concentrarse en regiones espaciales muy pequeñas, al proceso de añadir impurezas a un material, se le conoce como dopaje [27].

La conductividad eléctrica de un semiconductor depende de la presión, temperatura, intensidad de luz incidente o bien de la cantidad de átomos del material de dopaje existentes en el material semiconductor. Un ejemplo de materiales semiconductores son los elementos del grupo 4A como el Silicio (Si) y el Germanio (Ge) ampliamente utilizados en la fabricación de semiconductores, los cuales son materiales capaces de conducir pequeñas cantidades de corriente, misma que se puede controlar de acuerdo al porcentaje de material con el que se dope, la conducción existe debido a que los electrones de la banda de valencia migran en un sentido y los huecos positivos de la banda de valencia migran en sentido contrario [28].

1.4.3. Conductores

De acuerdo a la teoría de bandas, los materiales conductores como los metálicos, poseen enlaces deslocalizados, que se forman a partir de orbitales atómicos de todos los átomos del cristal; la banda de valencia se encuentra parcialmente llena, no existen suficientes electrones para llenar todos los orbitales, el nivel más alto que se encuentra lleno a temperatura de 0 K se llama Nivel de Fermi (ver figura 1.5), en caso de incrementar la energía en el sistema (aplicando un diferencial de temperatura), los electrones pueden llegar a desplazarse hacia los niveles vacíos.

En el modelo de a estructura de bandas, un conductor es representado con un traslape entre la banda de valencia con la banda de conducción, por lo que no existe una banda prohibida o *bandgap*. La conductividad eléctrica de los metales se debe al desplazamiento de electrones en estados ocupados por un solo electrón, cercanos al nivel de Fermi en presencia de un campo eléctrico aplicado [29].

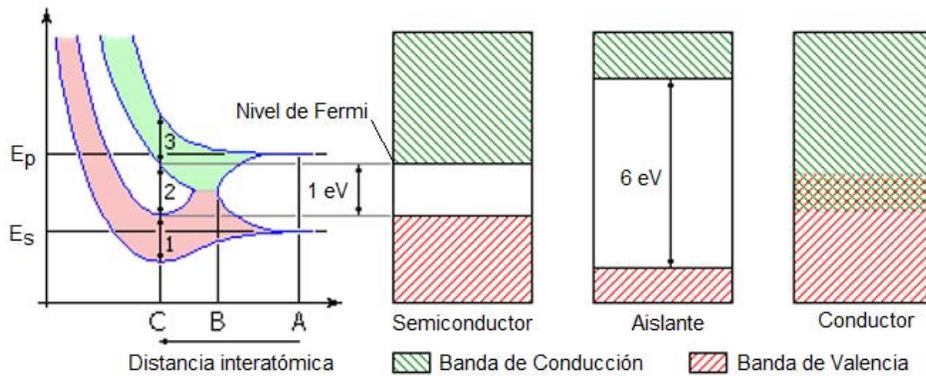


Figura 1.5: Representación de la teoría de bandas para materiales conductores, semiconductores y aislantes.

Materiales Magnéticos

Un imán es un objeto compuesto de un material particular que produce un campo magnético, mismo que puede interactuar con otros materiales magnéticos a través de una fuerza de atracción o repulsión, recordando que polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen. El entendimiento del magnetismo en nuestros días, está relacionado con el concepto de espín, proveniente de la descripción relativista de un electrón inmerso en un campo electromagnético externo [30].

En principio todos los materiales son magnéticos, debido a que existen interacciones y se ven afectados cuando se ven sometidos a un campo magnético externo, los distintos tipos de materiales magnéticos serán explicados durante este capítulo.

2.1. Orden Magnético y Magnetización

2.1.1. Momento magnético

En 1921 Compton¹ propuso que el electrón poseía una rotación intrínseca sobre su eje y un momento magnético propio además del momento angular. Más tarde en 1925 Uhlenbeck y Goudsmit² establecieron definitivamente que el espín del electrón existe y que es igual a la mitad de la constante de Planck [31]. En electromagnetismo clásico, el momento magnético μ se puede explicar partiendo de un lazo de corriente (I), asumiendo que ésta viaja por un diferencial de área (dA) en un lazo infinitesimal,

¹Arthur Holly Compton 1892-1962, físico estadounidense ganador del premio Nobel de Física en 1927, realizó estudios sobre los rayos X mismos que fueron de ayuda para la confirmación de la dualidad onda partícula de la radiación electromagnética. Ganador en 1940 de la medalla Hughes por su descubrimiento del efecto Compton y trabajo sobre los rayos cósmicos.

²George Eugene Uhlenbeck, 1900-1988 y Samuel Abraham Goudsmit, 1902-1978, ambos físicos Holandeses-Estadounidenses, introductores del concepto de espín en 1925, postularon que los electrones giran sobre un eje.

es decir, es una cantidad proporcional al producto de la corriente que se mueve en un circuito por el área encerrada por el mismo. El momento magnético ($d\mu$) puede describirse como se muestra en la ecuación 2.1, donde la dirección del vector de área está dada por la regla de la mano derecha ¹.

$$d\mu = Id\mathbf{A} \quad (2.1)$$

Para obtener el momento magnético en un conductor finito se calcula el como se muestra en la ecuación 2.3, a su vez, la energía de un momento magnético está dada por 2.2.

$$E = -\mu_0\mu \cdot \mathbf{H} = -\mu_0\mu H \cos\theta \quad (2.2)$$

$$\mu = \int d\mu = I \int d\mathbf{A} \quad (2.3)$$

Donde θ es el ángulo entre el momento magnético μ y el campo eléctrico externo \mathbf{H} y μ_0 la permeabilidad del vacío.

El término de orden magnético se refiere a la disposición del momento magnético o espín de la estructura atómica de un material. La interacción interatómica favorece la alineación paralela o antiparalela de los espines adyacentes, dependiendo del signo de la constante de intercambio J , el cual puede ser positivo o negativo.

De acuerdo al término de susceptibilidad (χ), se puede hacer una clasificación de tres grupos principalmente, Diamagnetismo, paramagnetismo y magnetismo colectivo [12].

2.1.2. Materiales Diamagnéticos

El **Diamagnetismo** es una propiedad de todos los materiales y se vuelve relevante sólo en ausencia de paramagnetismo y magnetismo colectivo, ejemplos de ello pueden ser casi todas las sustancias orgánicas, metales como el Hg y superconductores que se encuentren por debajo de la temperatura crítica.

Todos los materiales están constituidos por átomos que contienen cargas positivas y neutras en su núcleo, se rodean de cargas negativas llamadas electrones que se encuentran girando a su alrededor, dicho movimiento de electrones genera un campo magnético que en algunos casos es macroscópicamente despreciable. Por lo anterior se puede considerar que todos los materiales son diamagnéticos, caracterizados por tener

¹Método para determinar la dirección de un vector que es resultado de un producto vectorial como $\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \mathbf{c}$, donde la dirección de \mathbf{c} está definida por el pulgar, cerrando los demás dedos en torno al vector \mathbf{a} y siguiendo con el vector \mathbf{b} , en este caso para determinar la dirección del campo magnético, se toma en cuenta que el dedo pulgar indica la dirección del movimiento, el índice la dirección del campo y finalmente el dedo medio la corriente inducida.

valores negativos muy pequeños de susceptibilidad magnética χ_m . El diamagnetismo es un efecto de inducción donde un campo magnético externo (\mathbf{H}) induce la alineación de los dipolos magnéticos que se encuentran orientados de manera anti-paralela con respecto al campo de excitación de acuerdo a la ley de Lenz ¹, por esta razón se tiene una susceptibilidad diamagnética que es negativa (ver ecuación 2.4).

$$\chi^{dia} = cte. < 0 \quad (2.4)$$

Esta propiedad está asociada con la tendencia de las cargas eléctricas a formar parcialmente una pantalla entre el interior de un cuerpo y el campo magnético aplicado [32], en la figura 2.1 se observa un material diamagnético superconductor que es repelido por el campo magnético.

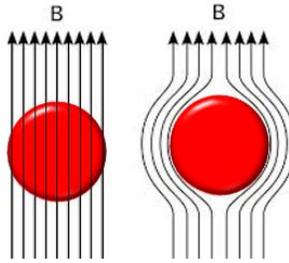


Figura 2.1: Comportamiento de un material diamagnético superconductor.

2.1.3. Materiales Paramagnéticos

El **Paramagnetismo** es una propiedad que poseen diversos materiales en la cual se magnetizan cuando son expuestos a la acción de un campo magnético [33], los momentos magnéticos atómicos de este tipo de materiales tienden a alinearse en la dirección de campo externo, sin embargo existe cierto desorden porque algunos momentos tienden a quedarse en una posición aleatoria debido al movimiento térmico que poseen los materiales. Su permeabilidad magnética (capacidad de un material para atraer y permitir pasar campos magnéticos) es similar a la del vacío, en la figura 2.2 se puede ver el comportamiento de un material paramagnético en presencia de un campo magnético externo, donde se observa la alineación de sus momentos magnéticos.

En términos de susceptibilidad, los paramagnéticos se caracterizan por las expresiones 2.5 y 2.6.

$$\chi^{para} > 0 \quad (2.5)$$

¹Ley llamada así en honor al físico germano-báltico Heinrich Lenz, 1804-1865, quien la formuló en 1834 y enuncia que “la fuerza electromotriz inducida se opone siempre a la causa que la origina”.

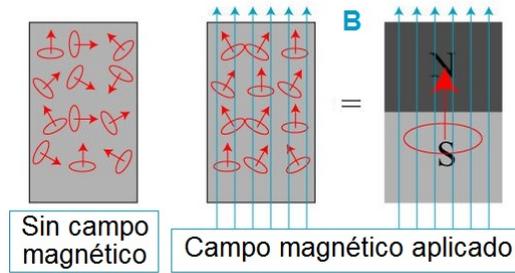


Figura 2.2: Momentos magnéticos atómicos de un material paramagnético.

$$\chi^{para} = \chi^{para}(T) \quad (2.6)$$

2.1.4. Materiales con Magnetismo Colectivo

El llamado **Magnetismo Colectivo** es el resultado de la interacción entre dipolos permanentes, los cuales se pueden explicar a partir de la mecánica cuántica, estos materiales magnéticos poseen una orientación preferencial la cual es espontánea, es decir no depende de un campo externo y los momentos magnéticos se encuentran localizados. Dentro del magnetismo colectivo se tienen materiales como los **ferromagnéticos**, **ferrimagnéticos** y **antiferromagnéticos**.

Un material **ferromagnético**, está constituido por pequeñas regiones conocidas como dominios, donde cada uno de éstos se comporta como un pequeño imán; los ferromagnéticos poseen un momento magnético espontáneo incluso en ausencia de campo magnético. Lo anterior sugiere que los espines electrónicos estén dispuestos en una manera regular [34]. A la interacción ocurrida dentro de éste tipo de materiales se le conoce como campo de intercambio [32], [11]. Ejemplos de estos materiales son cobalto, hierro, níquel así como aleaciones entre ellos. Si se somete un material ferromagnético a un campo magnético externo considerablemente alto, los dominios se alinean en el mismo sentido, haciendo que el material se vuelva monodominio con el paso del tiempo o el cambio en la intensidad del campo magnético (ver figura 2.3).

Existen materiales ferromagnéticos suaves y duros, en los cuales cambia su campo coercitivo H_c , es decir los materiales ferromagnéticos suaves necesitan menos campo magnético externo para alinear sus momentos magnéticos en comparación con los materiales duros.

Un material **ferrimagnético** es aquel en el que todos los momentos están orientados en una misma dirección pero no en el mismo sentido, es decir algunos momentos se encuentran alineados de manera anti-paralela y el efecto magnético puede anularse total o parcialmente pero de forma local, ya que la magnetización espontánea de la

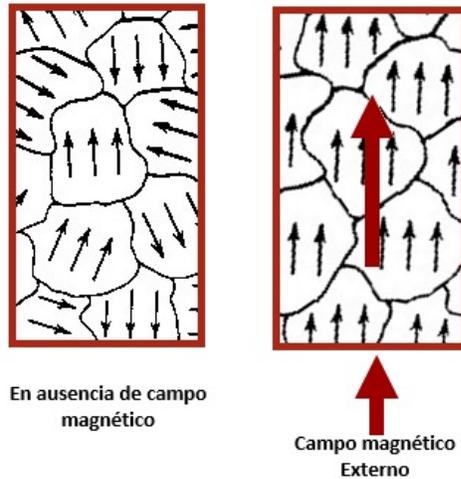


Figura 2.3: Estructura de dominios de un material Ferromagnético.

muestra o material ferrimagnético no desaparece por completo, puesto que existe un ordenamiento predominante. Al igual que un material ferromagnético, al sobrepasar la temperatura de Curie¹[25] se pierde la propiedad y el material pasa a ser paramagnético, en la figura 2.4 se puede observar una representación de una red de tipo ferrimagnético donde se muestra la disposición de los momentos magnéticos.

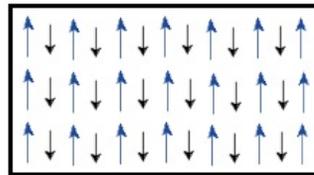


Figura 2.4: Alineación magnética de un material Ferrimagnético.

La red magnética de un material ferrimagnético se compone de dos redes (A y B) cuya magnetización es diferente $M_A \neq M_B$, y se toma a M como la magnetización total como se observa en la ecuación 2.7.

$$M = M_A + M_B \neq 0 \quad \text{para} \quad T < T_C \quad (2.7)$$

En los materiales **antiferromagnéticos**, los momentos de los iones en la estructura

¹Llamada así en honor al físico francés Pierre Curie, 1859-1906, quien descubrió en 1895 que los materiales que poseen la propiedad de magnetismo colectivo pueden perder sus propiedades y quedar desordenados magnéticamente hablando, siempre que se exceda cierta temperatura, misma que es característica de cada material o aleación.

cristalina tienden a alinearse antiparalelamente provocando que se anule el efecto de campo en el exterior del material [32]. Algunos materiales cuentan con una constante de campo de anclaje positiva, en tal caso, si los espines se encuentran alineados, la energía de intercambio toma valores mínimos, dando lugar a una imanación espontánea. Sin embargo, en el caso de los materiales antiferromagnéticos la energía de intercambio es mínima al alinearse antiparalelamente los momentos magnéticos y la constante de campo toma valores negativos.

En la figura 2.5 se puede observar la disposición antiferromagnética de momentos magnéticos donde al igual que en el ferrimagnetismo se pueden considerar dos redes, cada una con espines apuntando en un sentido. Para el caso de estos materiales, la temperatura crítica toma el nombre de Temperatura de Néel¹ (T_N) y se puede representar como se muestra en las expresiones 2.8, 2.9 y 2.10, donde la magnetización total es cero [12].

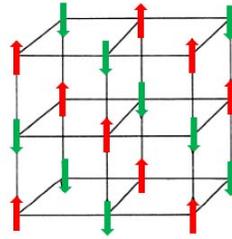


Figura 2.5: Disposición de momentos magnéticos en un material Antiferromagnético.

$$|M_A| = |M_B| \neq 0 \quad \text{para} \quad T < T_C \quad (2.8)$$

$$M_A = -M_B \quad (\uparrow\downarrow\uparrow\downarrow) \quad (2.9)$$

$$M = M_A + M_B \equiv 0 \quad (2.10)$$

De acuerdo a lo anterior, el alineamiento que poseen los momentos magnéticos da lugar al orden magnético, mismo que puede ocurrir en superficies e interfaces, la figura 2.6 muestra algunos ejemplos de ordenes magnéticos.

De acuerdo a Ampère, las sustancias poseen corrientes circulares al tener átomos con momentos magnéticos, en un pequeño volumen de sustancia existen altas densidades de momentos, por lo que puede considerarse una distribución continua de dipolos y a su vez un momento magnético neto por unidad de volumen, (\mathbf{M}) llamado vector de magnetización, por lo que la magnetización de un material se expresa en términos de

¹Denominada así en honor al físico francés Louis Eugène Félix Néel, 1904-2000.

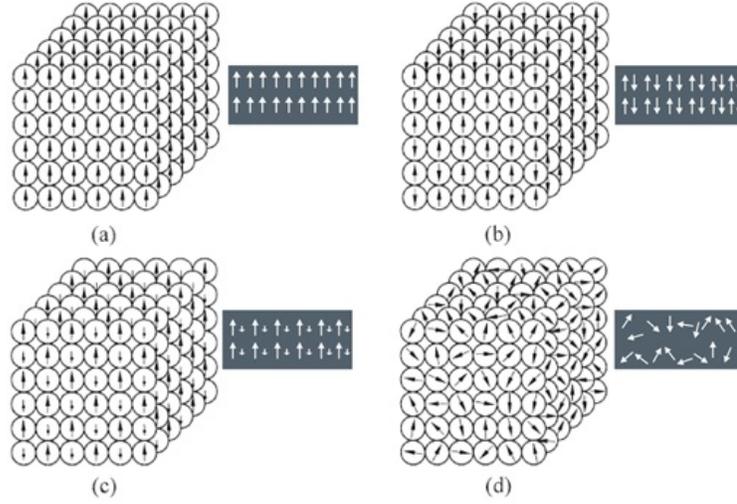


Figura 2.6: Orden Magnético a) Ferromagnético a T=0 K, b) Antiferromagnético a T=0 K, c) Ferrimagnético a T=0 K y d) Paramagnético=Ferromagnético con T_C .

densidad de momentos magnéticos, definiéndola como se muestra en la ecuación 2.11; toda sustancia es capaz de adquirir momento magnético bajo la acción de un campo magnético externo, denominándose a este proceso *magnetización* [35].

$$M = \frac{\mu_{total}}{V} \quad (2.11)$$

Un dipolo elemental de momento dipolar neto se expresa como la ecuación 2.12, donde \mathbf{M} es una magnitud macroscópica que determina la magnetización en un punto definido y para conocer el momento dipolar magnético total de un volumen finito (τ) se puede aplicar la expresión 2.13 [35]

$$d\mathbf{m} = \mathbf{M}d\tau \quad (2.12)$$

$$\mathbf{m} = \int \mathbf{M}d\tau \quad (2.13)$$

Existen dos fuentes de momento magnético atómico (m), corrientes asociadas con el movimiento orbital de los electrones (movimiento orbital l) o bien con el espín del electrón (momento de espín s), el magnetismo de los átomos libres o iones se basa en las reglas de Hund ¹, las cuales describen el momento orbital y de espín como función

¹Regla llamada así en honor al físico alemán Friedrich Hund, 1896-1997, la cual se basa en la forma de llenar los orbitales atómicos con igual energía.

del número de electrones de las capas internas [32].

En la actualidad, los dispositivos implementados en tecnología de punta requieren materiales cuya respuesta magnética, además de ser significativa, se presente a temperatura ambiente, por ello la mayor parte de los materiales aplicados son en realidad aleaciones de Fe, Co, Ni con algunas tierras raras. La respuesta de los materiales magnéticos se determina mediante la curva de magnetización, la cual es la respuesta del material al ser sometido a un campo magnético externo [9].

También es llamada curva de histéresis y se trata de la tendencia de un material a conservar su propiedad magnética en ausencia de campo magnético. Ya que estas curvas se realizan aplicando un barrido en campo magnético y observando el comportamiento después de quitar el estímulo, se puede observar el campo remanente que tiene el material así como su saturación, debido a que al retirar el campo magnético, la magnetización no vuelve a cero inmediatamente, debe ser inducida hacia su punto inicial con un campo magnético en dirección opuesta.

La curva se genera mediante la medición del flujo magnético de un material mientras se aplica un barrido en campo magnético, como se muestra en la figura 2.7, en el punto 1 los momentos magnéticos se encuentran alineados casi en su totalidad en la dirección del campo magnético aplicado, éste punto es llamado *saturación*.

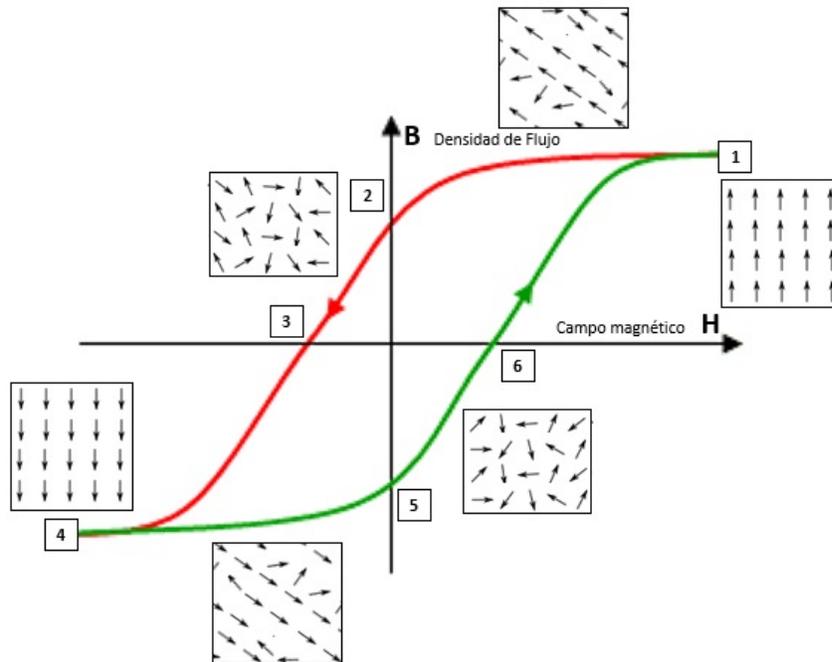


Figura 2.7: Curva de magnetización de un material magnético.

Si en ese instante se deja de aplicar campo magnético, el material responderá realineando sus momentos, intentando llevarlos al estado que se tenía inicialmente, sin embargo llegará al punto 2, llamado magnetización remanente. Invertiendo ahora el sentido del campo externo aplicado, la curva se modifica hasta llegar al punto c, el cual es un punto donde la densidad de flujo es cero y es llamado fuerza de coercitividad (intensidad necesaria para eliminar el magnetismo de un material).

Al seguir incrementando el campo externo, se llega de nuevo al punto de saturación, pero ahora en dirección opuesta (punto 4), si nuevamente se elimina el campo magnético externo, existirá una remanencia negativa, ya que el material no puede volver a una magnetización cero (punto 5). Al excitar al material de nuevo con campo magnético positivo se llega al punto 6 el cual se comporta análogo al punto 3, es decir se trata de la fuerza de coercitividad del material, en caso de llevar de nuevo el material a saturación la curva sigue el camino de 6 a 1, completando el ciclo.

Por otro lado en la figura 2.8 se observa únicamente la curva de respuesta de los procesos que ocurren en un material magnético al ser sometido a un campo magnético externo. En el punto **a** se tiene un proceso reversible llamado abombamiento de paredes, en el cual al retirar el campo magnético aplicado, los dominios vuelven a su posición inicial. En el punto **b** existe un desplazamiento de dichas paredes, convirtiéndose en un proceso no reversible al igual que el punto **c**, donde los puntos de anclaje de la estructura se mueven, es decir, el tamaño de los dominios cambia permanentemente y se llega al estado de saturación.

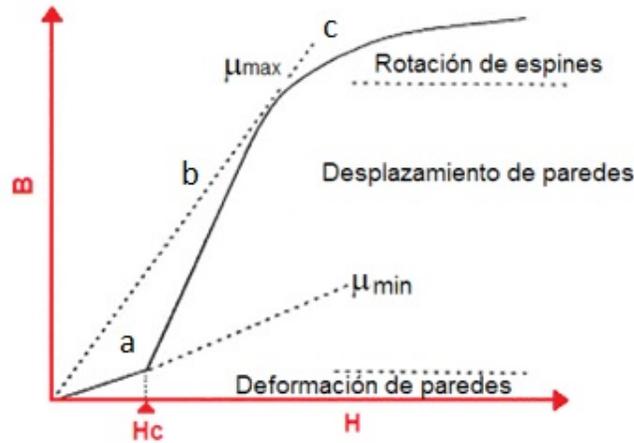


Figura 2.8: Procesos magnéticos ocurridos en un material magnético al ser sometido a campo magnético externo.

2.1.5. Interacción de Intercambio

El momento magnético y la magnetización espontánea permiten un intercambio de energía entre los electrones de un material, se da entre átomos magnéticos vecinos y de acuerdo a su intensidad, da lugar al orden de corto o largo alcance en la red de cada material. En electrostática, el intercambio (J) es un efecto encontrado en muchos cuerpos que responde principalmente a la ley de Coulomb, que hace referencia a las interacciones de atracción y repulsión de las cargas y a su vez al principio de exclusión de Pauli¹, el cual menciona que no pueden existir dos fermiones con todos sus números cuánticos idénticos en el mismo sistema cuántico ligado [36].

Teniendo dos orbitales d de iones metálicos vecinos, la interacción de intercambio J se produce entre dos electrones desapareados del mismo o de diferentes átomos con el mismo número cuántico de espín (M_s) impidiendo que se acerquen demasiado. En la figura 2.9 [37], se muestra una representación del fenómeno de intercambio en una red en la cual se observan los orbitales de los átomos presentes y las posibles interacciones existentes designadas con la letra J [38].

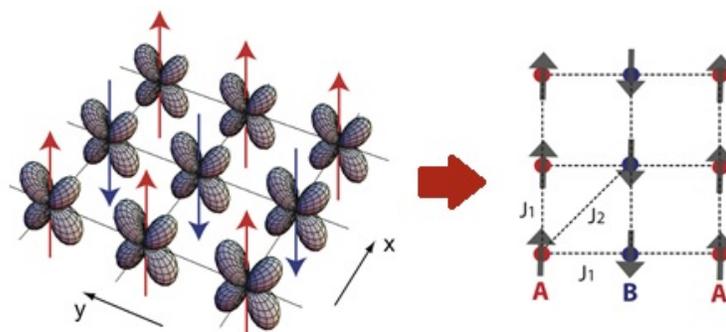


Figura 2.9: Interacción de intercambio en una red magnética.

2.1.6. Anisotropía Magnética

Como anisotropía, se puede entender la no homogeneidad de alguna propiedad; en este caso las propiedades magnéticas de los materiales tienen diferente magnitud o respuesta al medirlas en distintas direcciones del espacio. La energía de un sólido magnético depende de la orientación de la magnetización con respecto al eje del cristal, en el caso de los imanes permanentes, para mantener la magnetización en una dirección preferencial, se requiere una alta anisotropía magnética en contraste a los materiales magnéticos suaves.

¹Nombrado así en honor al físico Wolfgang Ernst Pauli, 1900-1958, físico austriaco nacionalizado suizo y estadounidense, quien enunció el principio de exclusión en 1925.

La anisotropía permite observar en los materiales un eje de fácil magnetización, el cuál es una dirección preferencial sobre la cual se alinean la mayoría de los momentos magnéticos de un imán. El eje de fácil magnetización permite la implementación de ciertos materiales como elementos sensores de dispositivos de almacenamiento, por ejemplo las cabezas lectoras en los discos duros. La interacción de intercambio anisótropa se da debido a que las contribuciones de los momentos magnéticos no son reproducibles en todas las direcciones. Para entender el origen físico de la anisotropía es necesario distinguir entre efectos magnetostáticos y anisotropía magnetocristalina, en la figura 2.10 [10] se muestra que las interacciones magnetostáticas dan lugar a la anisotropía de forma.

Desde el punto de vista de la interacción magnetostática, el caso (a) de la figura 2.10 es más favorable que el (b), donde se observa que la dirección de fácil magnetización de una pequeña partícula alargada, es paralela al eje mayor [10]. En el caso (c) se muestra un imán macroscópico donde se forman dominios e interfieren en la libre anisotropía magnética.

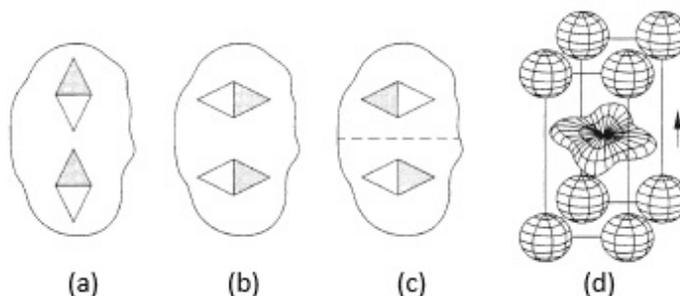


Figura 2.10: Anisotropía Magnética: a-c) representación de la anisotropía de forma con momentos magnéticos d) anisotropía magnetocristalina.

Algunas propiedades derivadas de los lazos de histéresis son propiedades extrínsecas de los materiales magnéticos, ya que describen la estructura real del imán. Los lazos de histéresis son obtenidos midiendo la magnetización en función de un campo magnético externo aplicado, mientras que los lazos de B vs H muestran la densidad de flujo (B) en función del campo magnético H . Existen dos propiedades heredadas de los lazos de histéresis de M vs H , los cuales son la fuerza coercitiva y la magnetización remanente.

2.1.7. Dominios Magnéticos

Se le llama dominio magnético a la agrupación de dipolos magnéticos dentro de un material cuyo sentido es el mismo, es decir, tienen un ordenamiento magnético de medio alcance. El término de dominio magnético surgió aproximadamente en 1907 por Pierre Weiss¹ quien observó que los materiales magnéticos se dividían en pequeñas

¹Pierre-Ernest Weiss, 1865-1940, físico francés quien desarrolló gran parte de la teoría del paramagnetismo y ferromagnetismo en 1907, formulando la teoría del magnetón o momento magnético

regiones cuya magnetización estaba completamente definida. En algunos casos, como en los materiales diamagnéticos, las magnetizaciones de cada región están dispuestas de manera tal, que se cancela la contribución de los momentos magnéticos dando como resultado una magnetización total igual a cero ($M_T=0$).

Dentro de un dominio magnético, M toma su valor máximo posible ($M_T = M_S$) llamada magnetización de saturación, sin embargo debido a la agitación térmica que está presente en cualquier material, cada dominio se orienta en una dirección al azar. Si se desea orientar todos los dominios en una dirección es necesario someter a la muestra a un campo magnético, para que las fronteras entre los dominios, llamadas *paredes de dominio* se desplacen de sus posiciones de equilibrio. En dichas paredes existen transiciones de momento (orientaciones de los dipolos de cada dominio) y son conocidas también como Paredes de Bloch (ver figura 2.11), las cuales por encima de la temperatura de Curie se pierden y dan lugar a un sistema paramagnético.

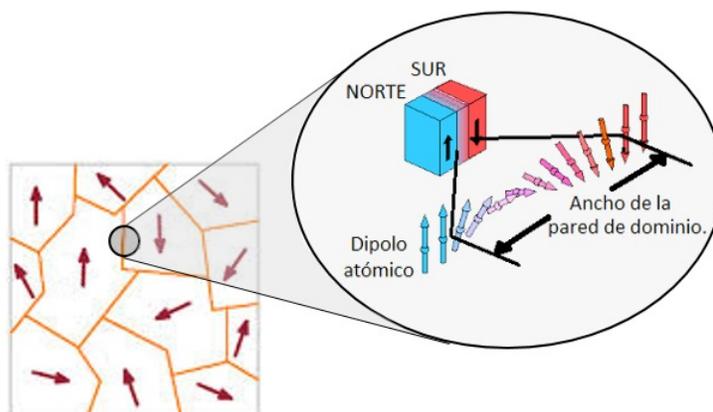


Figura 2.11: Representación gráfica de la pared de dominio de un material ferromagnético.

De acuerdo a la teoría de Stoner-Wohlfarth¹[39], se asume que la magnetización es coherente en todo imán, lo cual se puede aseverar en partículas pequeñas. En partículas grandes interviene la interacción magnetostática que lleva a tener inhomogeneidades en la magnetización, ya que se promueve la aparición de dominios magnéticos de magnetización opuesta [10].

Existen distintas configuraciones de dominios magnéticos dentro de los materiales, en la figura 2.12 [10] se observa una estructura monodominio (a) la cual por lo general tiene lugar en partículas muy pequeñas, en el inciso (b) se muestran estructuras de dos dominios encontradas en partículas con anisotropía uniaxial, en (c) se observan de flujo cerrado en imanes cúbicos, en el inciso (d) se tienen dominios aleatorios observados en elemental.

¹Modelo desarrollado por Edmund Clifton Stoner (1899-1968) y Erich Peter Wohlfart (1924-1988) en 1948, el cual aproxima un cálculo numérico de la respuesta de los momentos magnéticos orientados al azar en un material.

imanes policristalinos, también se pueden encontrar materiales con paredes de Bloch como lo son las películas delgadas con anisotropía perpendicular mostradas en el inciso (e), mientras que en el inciso (f) se muestran paredes de Néel en películas delgadas con anisotropía planar.

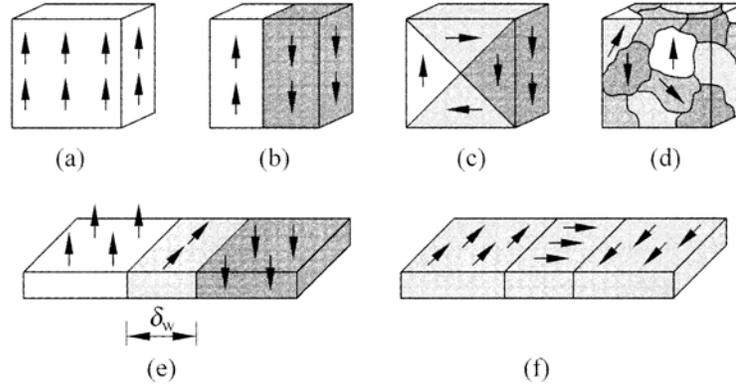


Figura 2.12: Estructura de dominios en distintos tipos de materiales.

2.1.8. Coercitividad

Anteriormente se dijo que en un lazo de histéresis se puede observar una propiedad de los materiales magnéticos llamada fuerza de coercitividad o campo coercitivo (H_C), el cual es una magnitud que se debe aplicar a un material para llevar su magnetización a cero. La coercitividad es relevante en los materiales para designar si se trata de un ferromagnético suave o duro, mismos que difieren en su curva de histéresis como se muestra en la figura 2.13 [10]. Los materiales que poseen alta coercitividad se denominan duros y son empleados en la fabricación de imanes permanentes, mientras que los imanes suaves se implementan en transformadores, cabezas lectoras de discos duros y en el blindaje magnético de circuitos o sistemas.

Materiales que poseen valores de H_C por debajo de 5 Oe (400 Am^{-1}) son considerados suaves, mientras que los que tienen valores de H_C mayores a 100 Oe (8000 Am^{-1}) se denominan duros, la coercitividad más baja encontrada en un material es del orden de 0.005 Oe (0.4 Am^{-1}), se trata del material Mu, compuesto por Ni, Fe, Cu, y Cr o Mo comúnmente utilizado como aislante magnético.

Existen dos mecanismos principales derivados de la coercitividad, la *nucleación* y el *anclaje*. En el primer caso, la nucleación significa que el estado de magnetización original (estado remanente), se vuelve inestable al aplicar un campo magnético de signo contrario, así mismo el campo de nucleación se puede estimar con la coercitividad. El mecanismo de anclaje da lugar a la magnetización inversa en materiales magnéticos inhomogeneos, ésto significa que la coercitividad depende de la interacción de dicha estructura inhomogénea con las paredes de dominio. En la figura 2.14 se pueden observar

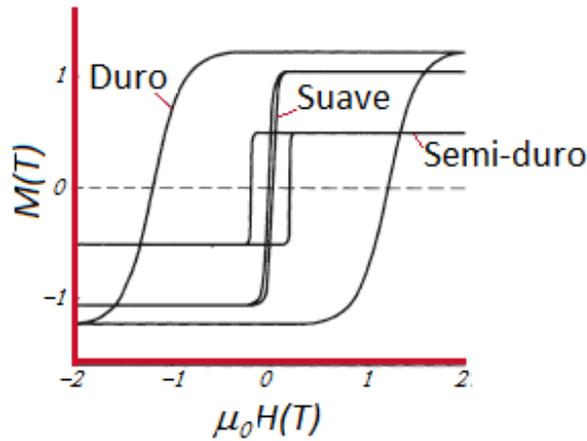


Figura 2.13: Ciclos de histéresis para distintos materiales magnéticos.

los mecanismos antes mencionados: (1) *nucleación* y (2) *anclaje*.

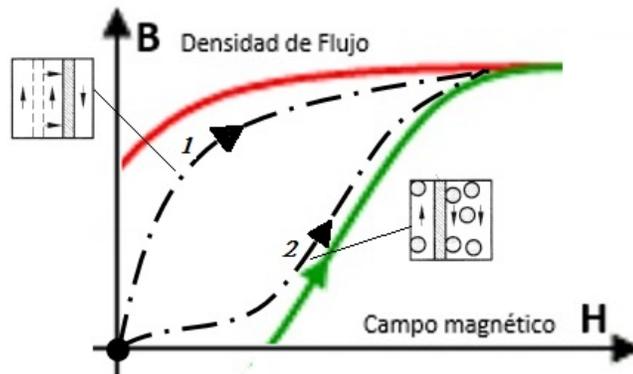


Figura 2.14: Lazo de histéresis donde se observan los fenómenos de nucleación y anclaje.

2.2. Magnetorresistencia

En un campo magnético, un portador de carga en movimiento sufre una desviación de su trayectoria recta, dicha desviación modifica la distancia media recorrida ya que existen colisiones sucesivas, a su vez, éstas producen un cambio en la resistencia eléctrica de un material. Al cambio en resistencia debido a un campo magnético se le conoce como Magnetorresistencia (MR) (ver ecuación 2.14) [40]. La distancia media es también llamada camino libre medio de una partícula (*Mean Free Path*), la cual es la

distancia que puede viajar antes de dispersarse con otra partícula o con la estructura misma del material o medio por el que se propaga (ver figura 2.15).

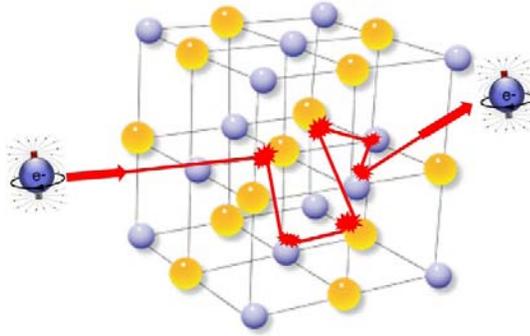


Figura 2.15: Dispersión electrónica debida a colisiones con la estructura.

El efecto de MR fue descubierto en 1856 por el físico, matemático e ingeniero William Thomson¹ [41], quien registró cambios de resistencia en un porcentaje de aproximadamente 5 %, a dicho fenómeno, posteriormente se le dio el nombre de magnetorresistencia ordinaria (OMR por sus siglas en inglés *Ordinary Magnetoresistance*). William Thomson realizó experimentos con piezas de hierro (Fe), descubriendo que la resistencia incrementaba cuando la corriente se inducía en el mismo sentido que el campo magnético, y decrementaba cuando la corriente formaba un ángulo de 90° con el campo.

Posteriormente hizo pruebas con níquel (Ni), observando el mismo fenómeno pero magnificado, al cual posteriormente se le llamó MR Anisótropa [42] sin embargo, a la fecha se han descubierto más tipos de MR, como lo son MR Gigante (GMR del inglés *Giant Magnetoresistance*), MR Túnel (TMR del inglés *Tunneling Magnetoresistance*), MR colosal (CMR del inglés *Colossal Magnetoresistance*) y MR Extraordinaria (EMR Extraordinary Magnetoresistance) [43], los rangos típicos de sensores magnetorresistivos se muestran en la figura 2.16 [44], donde se observan desde el sensor de magnetorresistencia anisótropa, los sensores de válvula de espín, de semiconductor tipo InSb, de magnetorresistencia gigante, incluidos los multicapa hasta los de magnetorresistencia colosal.

$$MR = \frac{(R_{max} - R_{min})}{R_{min}} * 100 \quad (2.14)$$

La MR también se puede definir en términos de la resistividad como el cambio de ésta en un metal o semiconductor debido a la aplicación de campo magnético, es

¹William Thomson Kelvin, 1824-1907, físico y matemático británico, realizó aportaciones relevantes en los campos de electricidad y termodinámica, desarrollador de la escala de temperatura Kelvin.

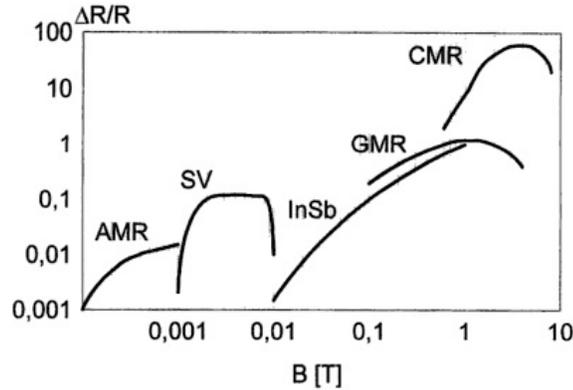


Figura 2.16: Rangos típicos de sensores magnéticos basados en el fenómeno de Magnetorresistencia - AMR: Magnetorresistencia Anisótropa, SV: sensores de válvula de espín, InSb: Semiconductores Magnetorresistivos, GMR: Sensores multicapa de magnetorresistencia gigante, CMR: sensores de magnetorresistencia colosal.

designada mediante la expresión 2.15 donde $\rho(H)$ es la resistividad a campo H y $\rho(0)$ sin campo magnético [40].

$$\Delta R = \frac{(\rho(H) - \rho(0))}{\rho(H)} \quad (2.15)$$

2.3. Magnetorresistencia Anisótropa

Se denomina Magnetorresistencia Anisótropa al cambio de la resistencia eléctrica de un conductor el cual es dependiente de la orientación relativa entre el campo magnético externo y la corriente aplicada, está presente en materiales ferromagnéticos con cambios registrados en la literatura de hasta 20% [9].

En este trabajo se aborda el efecto AMR en Ferromagnéticos suaves, teniendo un máximo valor de resistencia cuando el campo magnético se encuentra a 90° del eje de fácil magnetización de la muestra. Lo anterior se debe a que se requiere mayor energía para re-alinear los momentos magnéticos del material.

Generalmente, la resistencia de un conductor ferromagnético depende de la orientación del flujo de corriente con respecto a la magnetización, la MR sigue la curva de magnetización del material y llega a un punto de saturación cuando éste está completamente polarizado [45].

Como se mencionó anteriormente, el efecto de AMR fue descubierto en 1856 por William Thomson también conocido como Lord Kelvin, quien realizó experimentos con un trozo de hierro al cual le hizo incidir una corriente y midió su resistencia,

prueba que realizó también sometiendo el material a un campo magnético, de ésta manera pudo comprobar que existían cambios en el valor de la resistencia eléctrica de aproximadamente 0.2 %, lo cual sucedía cuando el campo magnético se aplicaba a la muestra de manera longitudinal con respecto del flujo de corriente, mientras que al aplicar el campo de manera perpendicular a la corriente, registraba cambios hasta de 0.4 %.

Existen sensores de AMR que en su mayoría consisten en sistemas metálicos como Fe, Ni o aleaciones de Co. Los sensores basados en este efecto son ampliamente utilizados en la caracterización de materiales y en ingeniería mecánica y automotriz, sin embargo fue hasta el año de 1990 que fueron implementados en las cabezas de discos magnéticos como sensores de dispositivos de almacenamiento. Lo anterior permitió aumentar la densidad de datos guardados en dispositivos más pequeños casi al doble de su capacidad comparados con tecnologías anteriores.

En la literatura se reportan cambios de AMR tomando en cuenta la dirección de campo magnético y la orientación de la corriente, designando a R^{\parallel} para definir un flujo de corriente paralelo a la magnetización ($\mathbf{i} \parallel \mathbf{M}$) y a R^{\perp} para una corriente perpendicular a \mathbf{M} ($\mathbf{i} \perp \mathbf{M}$). En la figura 2.17 [9] se puede observar el comportamiento del efecto AMR en un material ferromagnético, resaltando que la resistencia alcanza su valor máximo cuando la magnetización \mathbf{M} es paralela a la dirección de la corriente (R^{\parallel}), mientras que el valor mínimo se alcanza en la orientación perpendicular de \mathbf{M} vs \mathbf{i} (R^{\perp}).

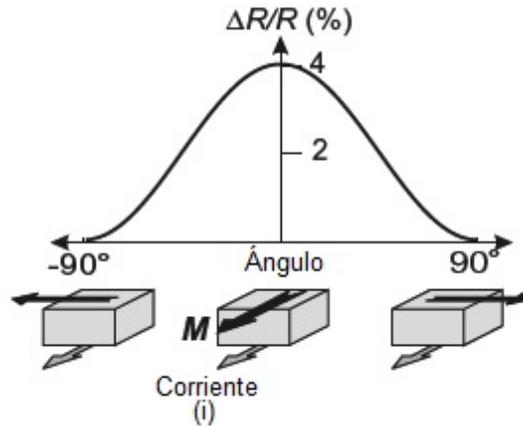


Figura 2.17: Curva de AMR de un material ferromagnético.

Otra manera de reportar cambios de AMR es mediante curvas donde se muestra el cambio en resistencia contra el campo magnético aplicado. En la literatura se encuentran curvas como la mostrada en la figura 2.18 para óxidos sometidos a caracterización de MR [46], sin embargo, en este trabajo los cambios de MR se reportan de acuerdo a los rangos de campo magnético que fueron aplicados para las distintas muestras metálicas y ferromagnéticas.

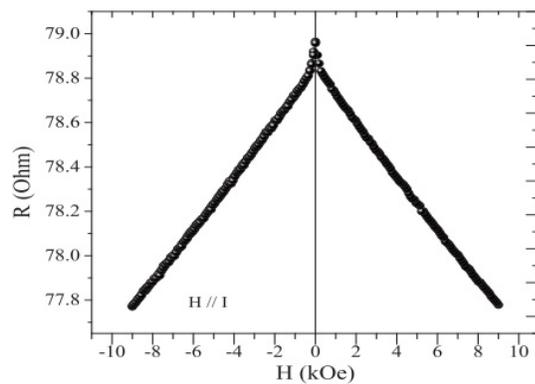


Figura 2.18: Curva de respuesta de MR para el óxido de magnanita.

Procedimiento Experimental

3.1. Implementación Experimental del Fenómeno de Magnetorresistencia

Las mediciones de magnetorresistencia se realizaron con la técnica de cuatro puntas o método Kélvín, el cual es utilizado en la medición de resistencias de bajo orden (valores menores a 100Ω). Si se cuenta con un multímetro o voltímetro para la medición convencional a dos terminales de una resistencia eléctrica (R), se puede registrar un valor aproximado al nominal, siempre y cuando la resistencia eléctrica sea mayor a 100Ω , sin embargo al tener valores más pequeños de R , la contribución de los cables y la resistencia interna del aparato se ven reflejadas en mayor proporción, por lo que se registra una medición incorrecta. Con el objetivo de reducir las contribuciones por contacto óhmico y errores instrumentales, se emplea el método de 4 puntas, el cual utiliza una fuente adicional de corriente para alimentar la muestra medida.

En la figura ?? se observa la implementación de dicho método, donde se numeran del 1 al 4 las terminales involucradas en la medición. Por las terminales externas (1 y 4) se hace circular una corriente, mientras que por las terminales internas (2 y 3) se mide la diferencia de potencial generada debido a dicha corriente. Finalmente por ley de Ohm (ecuación 1.12), se obtiene la resistencia de la muestra reduciendo así los factores de ruido que se involucran al medir resistencias pequeñas. Al incluir la fuente de corriente, se compensan las resistencias generadas por contacto óhmico que existen en el circuito, quedando sólo la contribución de la resistencia de la muestra. Cabe destacar que las terminales que se utilizan en este método deben estar dispuestas de manera lineal y equidistante, asegurando así la uniformidad del flujo de corriente y por lo tanto una medición más precisa.

Para el caso de la medición de MR, se requiere de un campo magnético externo donde se orienta la muestra con respecto al flujo de corriente, esto con el objetivo de

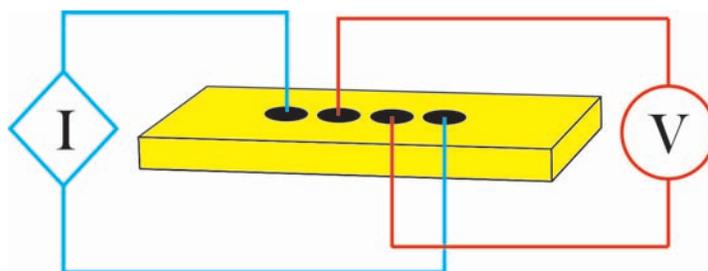


Figura 3.1: Implementación del método Kélvín o de 4 puntas para la medición de resistencia.

promover dispersiones en el material y como consecuencia modificar la resistencia.

Existen experimentos registrados en la bibliografía [47] donde la muestra permanece fija en una base, posteriormente son colocados los electrodos que suministran corriente y miden la diferencia de potencial o voltaje asociado a cada muestra. Una vez sujeta la muestra con los 4 electrodos en su lugar, se somete a un campo magnético comúnmente generado con electroimanes o bobinas de Helmholtz, los cuales son dispuestos en dos configuraciones principales, tomando como referencia la dirección de las líneas de campo, se registran cambios cuando la corriente es paralela y perpendicular a las ya mencionadas líneas de campo (ver figura 3.2).



Figura 3.2: Mediciones de MR a baja temperatura en la universidad de Ohio, departamento de Investigación Física (izquierda) y laboratorio del instituto de la facultad de Ciencias de la UNI de Perú, grupo de materiales nanoestructurados (derecha).

En cuanto a las 4 terminales, no se tiene registro de dispositivos comerciales que implementen el método Kelvin para materiales ferromagnéticos, generalmente en las universidades y centros de investigaciones donde se realizan mediciones de MR entre otras técnicas que requieren 4 terminales, se implementan prototipos de portamuestras adecuados a los materiales que se caracterizan y a la instrumentación con la que cuentan. Para óxidos se registra el diseño de diversas disposiciones de terminales [47], sin embargo las dimensiones de los dispositivos y características de implementación no se realizan de la misma forma que en ferromagnéticos.

En algunos casos, las muestras se someten a temperaturas críticas para observar un porcentaje de cambio mayor al obtenido a temperatura ambiente, procedimiento que vuelve costosa la instrumentación.

Para la realización de éste trabajo se cuenta con un equipo medidor de conductancias marca Keithley® modelo 4200 (ver figura 3.3), con el cual se proporciona corriente a la muestra ferromagnética y se mide la diferencia de potencial. Los materiales caracterizados se comportan de acuerdo con ley de Ohm de donde se obtiene la resistencia de la muestra. Conociendo la resistencia se puede conocer su resistividad y conductividad, estableciendo las propiedades eléctricas del material en el intervalo de corriente de 1 fA hasta 100 mA.

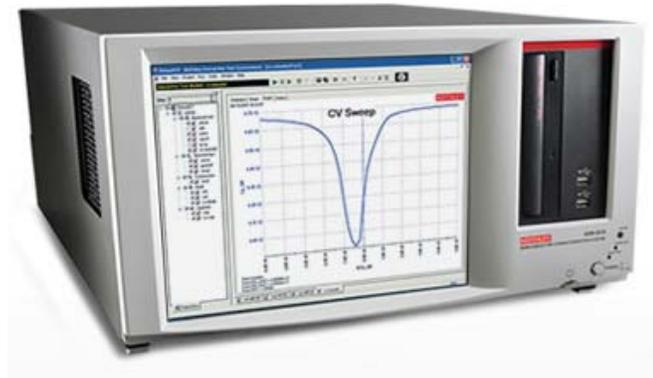


Figura 3.3: Medidor de conductancias marca Keithley®.

El equipo Keithley® es un analizador modular de parámetros para semiconductores y materiales metálicos, permite obtener curvas de diodos, transistores y dispositivos de cuatro terminales, por lo que se decidió utilizar en la medición de resistencia a cuatro puntas. Cuenta con una unidad de tierra de bajo ruido y puertos USB, serial, paralelo y GPIB que permite controlar dispositivos o ser controlado desde una PC.

El equipo puede proporcionar corriente o voltaje y medir ambos parámetros, además de introducir ecuaciones en la hoja de datos cuando se ejecuta una medición, esto último con el fin de calcular alguna variable dependiente del voltaje o la corriente al instante en que son medidas. La transferencia y medición de energía se realizan mediante adaptadores llamados SMU (*Source Measure Unit*) que permiten aplicar una corriente y amplificar la lectura proveniente de la muestra con una resolución de 0.1 fA. El equipo cuenta con una unidad SMU de conexiones triaxiales cuyo cable es de doble blindaje para minimizar el ruido (con posibilidad de conexión de 4 unidades).

El campo magnético aplicado a la muestra se genera mediante un electroimán marca GMW Associates® modelo 3470, que proporciona un campo magnético de -0.8 a 0.8

T, con una distancia entre sus polos de 10 mm, éstos son móviles desde 0 hasta 75 mm, sin embargo la intensidad de campo magnético se ve comprometida al aumentar la distancia entre dichos polos (ver figura 3.4).

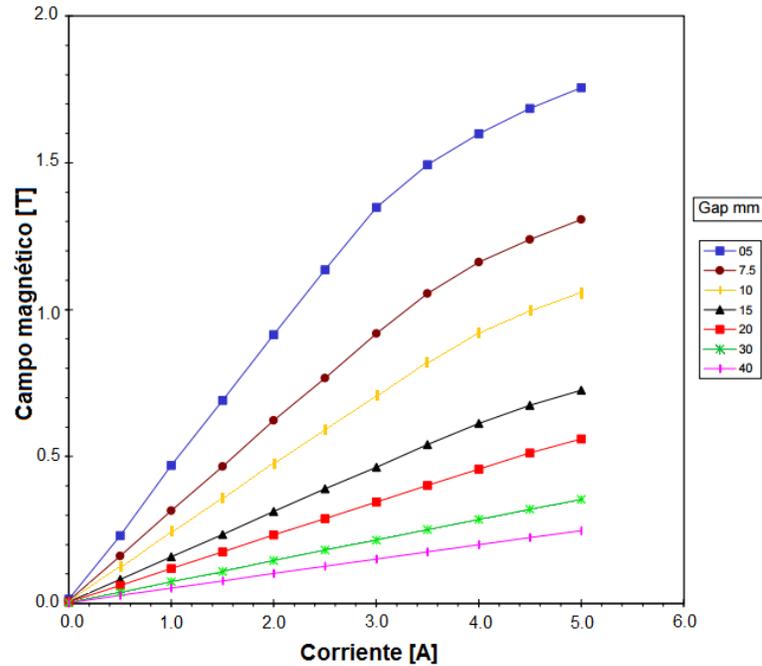


Figura 3.4: Curva de calibración del electroimán GMW para diferentes distancias entre los polos magnéticos.

El campo magnético producido por el electroimán se mide con una punta Hall cuya resolución es de 0.5 Gauss ($50 \mu\text{T}$) de funcionamiento transversal, es decir, el campo magnético debe incidir en la punta con un ángulo de 90° . También se cuenta con una fuente de alimentación marca KEPCO®, modelo BOP 50-8 la cual suministra la corriente al electroimán para la generación de campo magnético en la caracterización de las muestras. La fuente es capaz de proporcionar 50 Volts con corriente de 8 A, además de contar con puerto GPIB para su control por medio de una PC.

Para introducir las muestras al campo magnético se construyó un sistema simple que cuenta con dos motores a pasos, uno de los cuales desplaza una cremallera en la dirección “x” permitiendo posicionar la muestra en el centro de los polos magnéticos del electroimán, el otro motor tiene la función de hacer rotar la muestra para hacer incidir el campo magnético a 0° y a 90° . El control de los motores se lleva a cabo con un microcontrolador Texas Instruments (TM4C123G)®, al cual se le añadió un *driver* de micropasos (Easy Driver ROB-10267®) para asegurar mayor control en las mediciones.

3.2. Desarrollo del Software en LabVIEW®

El software de control se realizó con ayuda del programa LabVIEW® en donde se controla la fuente de alimentación con un panel o interfaz de usuario que permite realizar un barrido en corriente, voltaje o campo magnético. En el panel de usuario se puede visualizar la gráfica de los parámetros antes mencionados así como una curva del comportamiento de la corriente y el campo magnético, esto fue útil debido a que el electroimán debe calibrarse de acuerdo al voltaje de la fuente con el que se alimente para conocer el rango de campo magnético que puede producir para cada punto de voltaje y corriente. En la figura 3.5 se puede observar el panel frontal que utiliza el usuario para comunicarse con el instrumento, existen indicadores numéricos de voltaje, corriente y campo además de un indicador gráfico donde se observa en tiempo real el comportamiento de los tres parámetros.

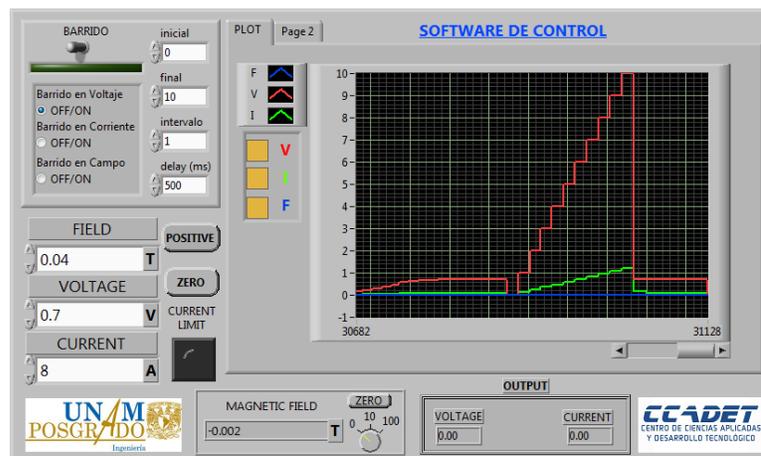


Figura 3.5: Panel de control de la fuente de alimentación.

3.3. Diseño y Construcción del Portamuestras

El Test-Fixture (TF) es un dispositivo incluido en el equipo Keithley® que provee la comunicación entre el portamuestras y el SMU, dicho dispositivo fue sustituido debido a que existían muchos puntos de soldadura, los cuales proporcionaban un contacto óhmico extra, lo cual contribuye a tener más errores en la medición (ver figura 3.6a). Debido a lo anterior, se realizó un circuito impreso en una tablilla fenólica para conectar las 4 puntas que van al equipo medidor de conductancias y al porta muestras, la figura 3.6b muestra la disposición de la tablilla, donde se tiene un plano único de tierra el cual abarca la mayor parte de la placa para la disminución de ruido, además de contar con conectores triaxiales que son compatibles con los cables incluidos en el equipo

Keithley®.

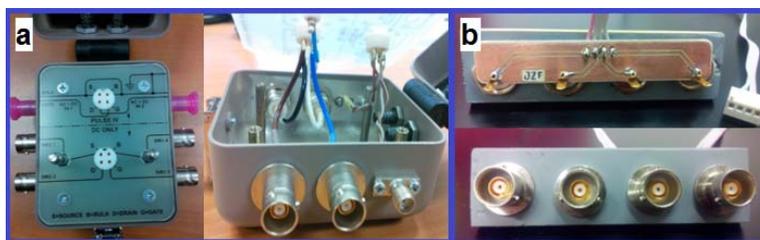


Figura 3.6: Sustitución del Test-Fixture: a) Test-Fixture comercial, b) Desarrollado en el CCADET.

En cuanto al portamuestras, se realizaron dos diseños, el primero en una tablilla de cobre (placa fenólica) con 4 pistas equidistantes, en un extremo de éstas, se soldaron 4 pines *header* macho con el objetivo de conectar el cable plano proveniente del TF. Al final de las líneas de cobre se colocó soldadura de estaño/plomo-60/40 para realzar 4 puntos y mejorar el contacto con la muestra (ver figura 3.7).



Figura 3.7: Prototipo No.1 del porta muestras.

Una de las condiciones de diseño del portamuestras se centra en el tamaño, ya que se requiere que éste gire en un volumen de 10 mm^2 , la desventaja de éste diseño es que al contar con pines *header*, no es posible reducir el tamaño puesto que es una medida estándar.

Otra condición de diseño, se centra en que los puntos colineales deben encontrarse a nivel para tener un contacto óptimo con el material, sin embargo al colocar los puntos de soldadura no se podía asegurar que quedaran a la misma altura debido a que se realizaba como proceso manual. Lo anterior afecta la medición de las cintas amorfas debido a que se deforman, provocando un cambio en la resistencia y registrado valores incorrectos, por lo que no se adquiere una medida real. En el caso de los depósitos a caracterizar (regularmente crecidos sobre sustratos de vidrio *pyrex*), al no tener los *pads* a la misma altura, no existe el contacto de las 4 puntas, por lo que la medición no se puede realizar.

Posteriormente se diseñó otro porta muestras, obteniendo mejor respuesta en éste debido a que los puntos de contacto son flexibles, éste portamuestras fue diseñado con 4 laminillas colineales de cobre las cuales fueron dispuestas en una base acrílica

para facilitar su manejo y contacto contra la muestra. En la figura 3.8 se observa la disposición física del porta muestras, donde las 4 laminillas se encuentran soldadas a un cable plano que a su vez va conectado al TF.



Figura 3.8: Prototipo No. 2 del porta muestras.

Las puntas se encuentran distribuidas de manera equidistante debido a que cuentan con una base plástica que a su vez sirve de aislante. La forma de sujeción es una pequeña placa de acrílico en la que uno de los lados tiene dos muescas, mismas en las que se enrolla un elástico para sujetar la muestra, a su vez ésta se pega con cinta doble cara al otro extremo del portamuestras para evitar que al contacto con los 4 puntos se flexione y las mediciones sean incorrectas.

Cabe destacar que se requiere el diseño de un porta muestras debido a que no existen dispositivos comerciales para implementarlos en ferromagnéticos. Se pueden encontrar diseños para aplicaciones de medición de MR en óxidos, sin embargo se trata de dispositivos de gran tamaño. En este caso se cuenta con un área de manipulación de 10 mm designada por la separación de los polos del electroimán entre los que se debe introducir la muestra.

3.4. Metodología de la Medición

Como se mencionó anteriormente, la medición de MR se realizó con el equipo medidor de conductancias iniciando con una calibración para validar el funcionamiento correcto del sistema. Para dicha validación, se tomaron dos materiales conductores típicos que se usaron como patrón, los cuales fueron Au y Cu. Se realizó un barrido en corriente iniciando desde el orden más bajo que permite el equipo, es decir (*femto* Amperes) fA. Con ello se generaron curvas de respuesta a partir de la resistencia del material debida a la corriente aplicada (ver gráficas en el capítulo de Resultados).

Una vez completadas las mediciones para distintos rangos de corriente, se toman los datos y se genera una curva completa de su respuesta, se grafica voltaje contra corriente (V vs. I) para obtener por ley de Ohm el valor de la Resistencia, debido a que es un material conductor estándar, su respuesta está registrada en la bibliografía. El gráfico obtenido muestra un comportamiento lineal, lo cual coincide con el comportamiento

reportado para un material metálico. Por lo tanto se concluyó que la configuración y la respuesta son las adecuadas para proseguir con las mediciones.

Habiendo realizado la calibración del sistema, se coloca el material ferromagnético ultra suave sobre el porta-muestras para proceder a su medición, se debe asegurar un buen contacto con cada una de las cuatro puntas y el material, esto se logra colocando firmemente el material contra el porta muestras. En cuanto a los instrumentos de medición, al electroimán (figura 3.9 a) se fija la punta Hall (figura 3.9 b) para la medición del campo magnético (medición mostrada en el teslámetro (figura 3.9 c)), mismo que se conecta a la fuente de alimentación (figura 3.9 d) y ésta a su vez al medidor de conductancias (figura 3.9 e) por puerto GPIB, esto con el fin de controlar el sistema integral mediante el software realizado en LabVIEW®), finalmente la comunicación entre el portamuestras y el equipo se realiza por medio del Test-Fixture mostrado en la figura 3.9 f).

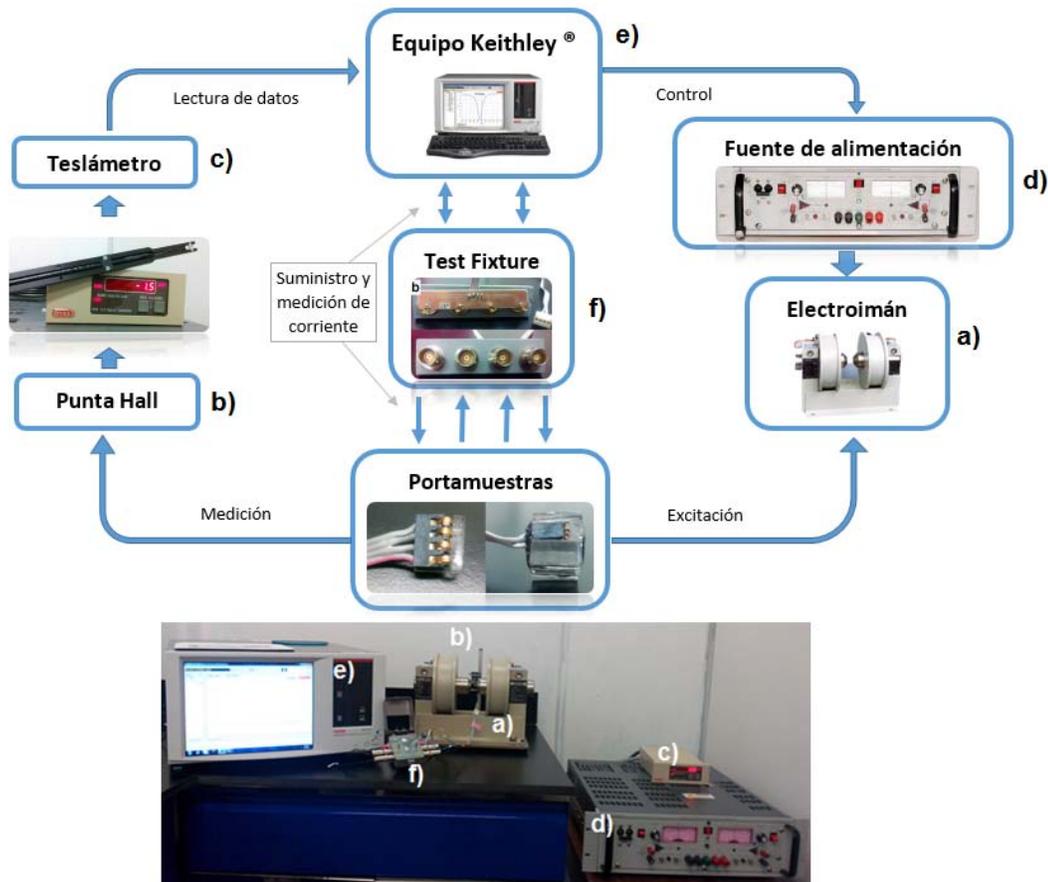


Figura 3.9: Sistema de caracterización implementado.

Las mediciones de MR se realizan principalmente en dos arreglos, para nombrarlos se toma en cuenta la orientación de la corriente y del campo magnético, llamando

arreglo 1 al mostrado en la figura 3.10 a), donde se observa que el flujo de corriente es perpendicular al campo magnético, mientras que en el arreglo 2 mostrado en la figura 3.10 b), el campo magnético y la corriente son paralelos entre sí. De esta manera se puede hacer una comparación entre los cambios de resistencia y determinar que un material presenta AMR. Después de realizar la implementación de la técnica de MR y validar el sistema, se realizó la caracterización de los sistemas ferromagnéticos Vitrovac 6030 y Vitrovac 6025 con el protocolo de medición utilizado para los materiales Au y Cu.

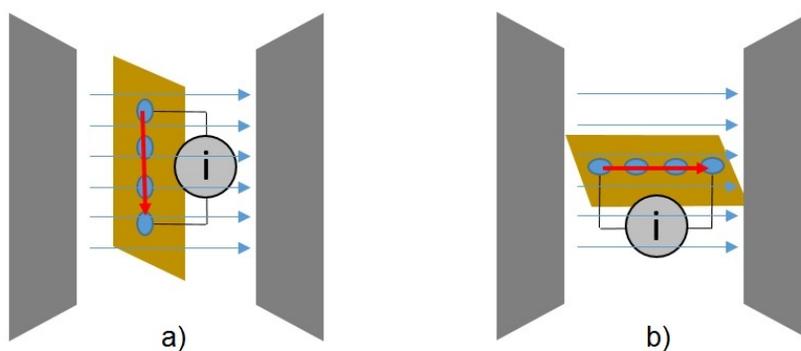


Figura 3.10: Arreglos para mediciones de AMR, a) Arreglo 1: corriente perpendicular al flujo de campo magnético, b) Arreglo 2: corriente paralela al flujo de campo magnético.

Resultados y Discusión

4.1. Calibración del Sistema

Para la calibración del sistema se emplearon materiales metálicos conocidos como Au y Cu. Se pretende principalmente validar la respuesta del sistema integral implementado para las mediciones de MR, para posteriormente introducir las muestras ferromagnéticas al sistema.

Al tratarse de materiales diamagnéticos, en el caso del Au y Cu, se debe considerar la magnetización diamagnética negativa y paramagnética de los electrones libres, además del efecto Hall, en el cual ocurre una reorganización de carga sobre el conductor, fenómeno que deriva en un voltaje extra que da lugar a un cambio en el valor de la resistencia eléctrica.

Se debe tener en cuenta que el equipo de medición es muy sensitivo, por lo que posibles contribuciones dependientes del campo magnético que normalmente no son detectadas, pueden ser distinguibles.

Las mediciones de corriente contra voltaje (I vs V) se realizaron en presencia y en ausencia de campo magnético, con una incertidumbre de $\pm 0.5 \times 10^{-15}$ unidades (incertidumbre para Voltaje, Corriente y Resistencia), en el caso de las mediciones con campo se proponen dos arreglos, los cuales son distinguibles de acuerdo a la orientación entre el campo magnético y la corriente aplicada a las muestras, mismos que se mostraron en el capítulo anterior (ver figura 3.10).

El campo magnético se aplicó desde -900 mT hasta 900 mT, sin embargo para cuestiones de visualización de los fenómenos que intervienen en los materiales caracterizados, se dividió en tres regiones, nombradas campo bajo ($\pm 180 \mu\text{T}$), medio ($\pm 2 \text{ mT}$) y alto ($\pm 900 \text{ mT}$). La determinación de dividir el campo magnético en tres regiones, se tomó con el objetivo de detectar la existencia de un comportamiento característico del

campo porcentual de resistencia (ΔR) asociada a dichas regiones de campo.

El barrido en campo se realizó para 4 intensidades de corriente (10 mA, 15 mA, 20 mA y 25 mA), con el objetivo de determinar dónde era posible detectar el mayor cambio de ΔR . Si bien se despreció la contribución térmica (efecto Joule), se trató de determinar un rango en el cual la resistencia permaneciera lo más constante posible.

Cabe mencionar que las respuestas de I vs V fueron lineales para todos los materiales, tal como se observa en la figura 4.1 para el caso del Au; dicha figura se toma como referencia donde se observa que la pendiente es constante en todo el rango de corriente, es decir la resistencia no varía, sin embargo la ordenada al origen es diferente para cada recta generada.

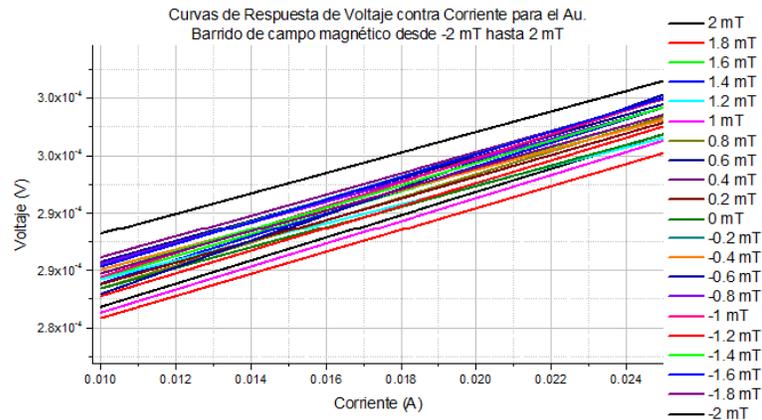


Figura 4.1: Respuesta eléctrica lineal de Au para campo magnético de ± 2 mT.

Dicho valor de la ordenada al origen, se atribuye a capacitancias, inductancias y ruido instrumental, en el caso de los resultados mostrados para el valor de la resistencia, se puede despreciar dicho valor bajo la siguiente consideración:

Tomando la ecuación de la recta (4.1), se tiene una gráfica de I vs V (x,y), en la cual la pendiente (m) es igual al valor de la Resistencia (de acuerdo a la ya citada ley de Ohm), mas una ordenada al origen llamada b , cuyas contribuciones se consideran de naturaleza diferente a la resistiva, como puede ser capacitiva, inductiva o de resistencia instrumental.

Los resultados para todos los materiales (metálicos y ferromagnéticos-metálicos) mostrados a continuación, contienen el valor de b , mismo que se ve reflejado en R y que se tomó en cuenta de acuerdo a la siguiente ecuación 4.1.

$$y = mx + b \quad (4.1)$$

$$\Rightarrow V = RI + b \quad (4.2)$$

De esta manera, al calcular el valor de R , se obtiene una dependencia de V e I , a la cual se le adiciona la contribución de b , misma que varía en función de la corriente para cada material. Como trabajo futuro, se propone realizar un análisis detallado para determinar el comportamiento de b en función del campo magnético (H). En las respuestas reportadas se analiza sólo la variación de R con respecto de H , ya que el valor agregado de la ordenada al origen no modifica el comportamiento de ΔR .

De acuerdo al material se puede asociar a b un comportamiento más capacitivo o inductivo (ver ecuaciones 4.3 y 4.4, donde b se representa como una función de ϵ y μ). Al tratarse de materiales puramente metálicos se toma en cuenta que el comportamiento de la permitividad (ϵ) es más significativo, debido a los contactos y a la diferencia de materiales entre el portamuestras y la muestra, así como puntos de soldadura del test-fixture y conexiones externas del equipo.

$$V = RI + f(\epsilon) \quad (4.3)$$

Por otro lado para materiales ferromagnéticos-metálicos, se observa que el valor de μ es más significativo y que indirectamente al tener permeabilidad se asocia una inductancia al comportamiento (ecuación 4.4).

$$V = RI + f(\mu) \quad (4.4)$$

Debido a lo anterior, se considera que los valores de R mostrados, son de la resistencia total, es decir, se suma la R del material más R del instrumento, lo cual se puede representar mediante la ecuación 4.5.

$$R = \frac{V - b}{I} \quad (4.5)$$

4.1.1. Caracterización del Au

Los resultados de las mediciones de resistencia versus campo magnético (R vs. H) y de ΔR se presentan para los rangos de campo magnético bajo ($\pm 180 \mu\text{T}$), medio (± 2 mT) y alto (± 900 mT). En la figura 4.2 incisos a y b se presenta el cambio de R con respecto al campo magnético bajo, para diferentes intensidades de corriente, observando un comportamiento similar en ambos arreglos.

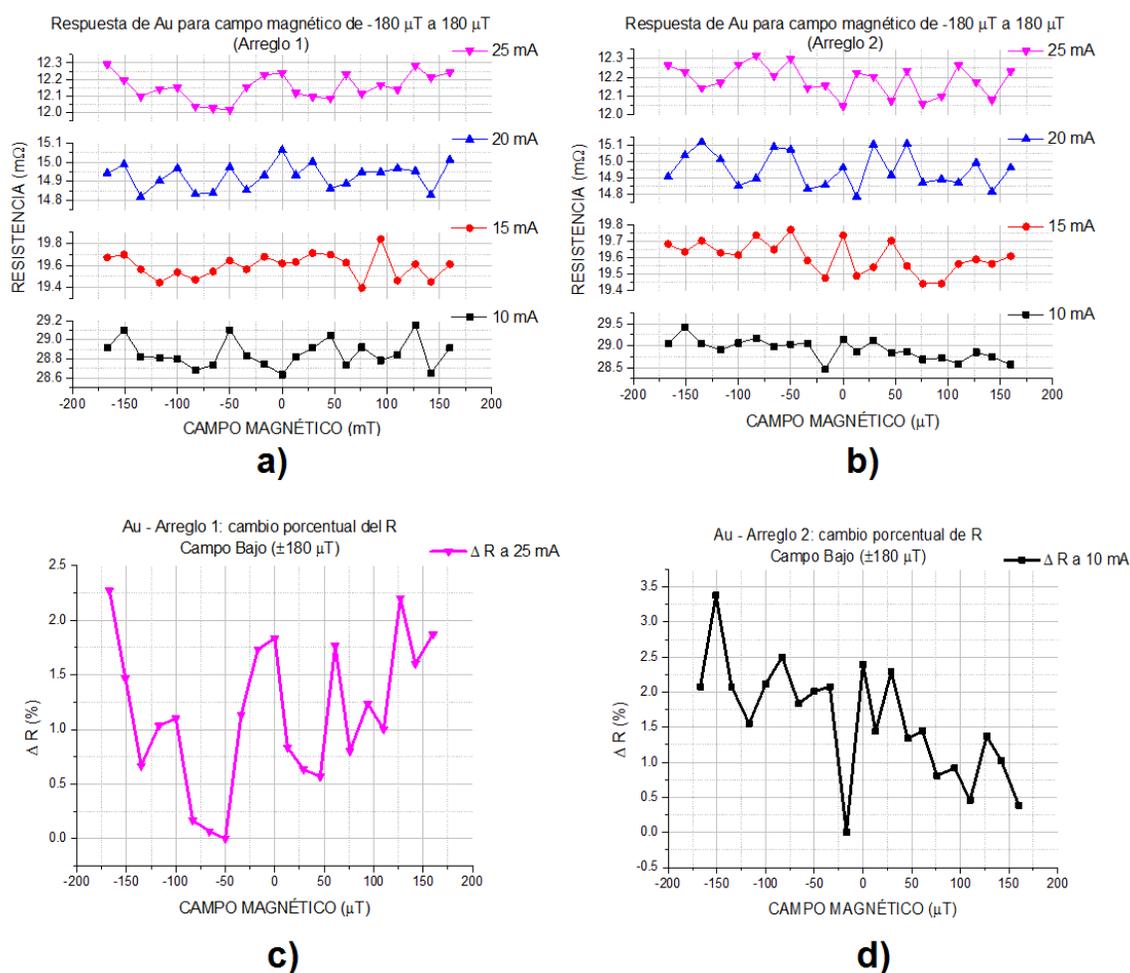


Figura 4.2: Respuesta de MR del Au en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En la figura 4.2c se observa que para el arreglo 1 existe un porcentaje máximo de cambio en R obtenido a 25 mA, el cual corresponde al 2.25 %, mientras que para el arreglo dos (figura 4.2d) se obtiene un cambio máximo de 3.4 % a una corriente de 10 mA. Se puede destacar que el cambio en resistencia es debido al efecto Hall, ya que se cuenta

con un gran número de electrones libres en el material debidos a su naturaleza metálica.

Al aplicar un campo magnético, dichos electrones son desviados de la trayectoria determinada por la corriente suministrada a la muestra, dicha desviación produce un efecto similar al de polarización en la laminilla de oro, lo que da lugar a un voltaje Hall en los extremos de esta. En la figura 4.2 incisos c y d se muestra sólo una intensidad de corriente para cada arreglo, ya que en dichas intensidades es donde se encontró el cambio máximo de ΔR en cada caso.

En la figura 4.3 a) y b) se muestra la respuesta del Au para campo medio, y se observa un comportamiento similar para los distintos valores de corriente propuestos.

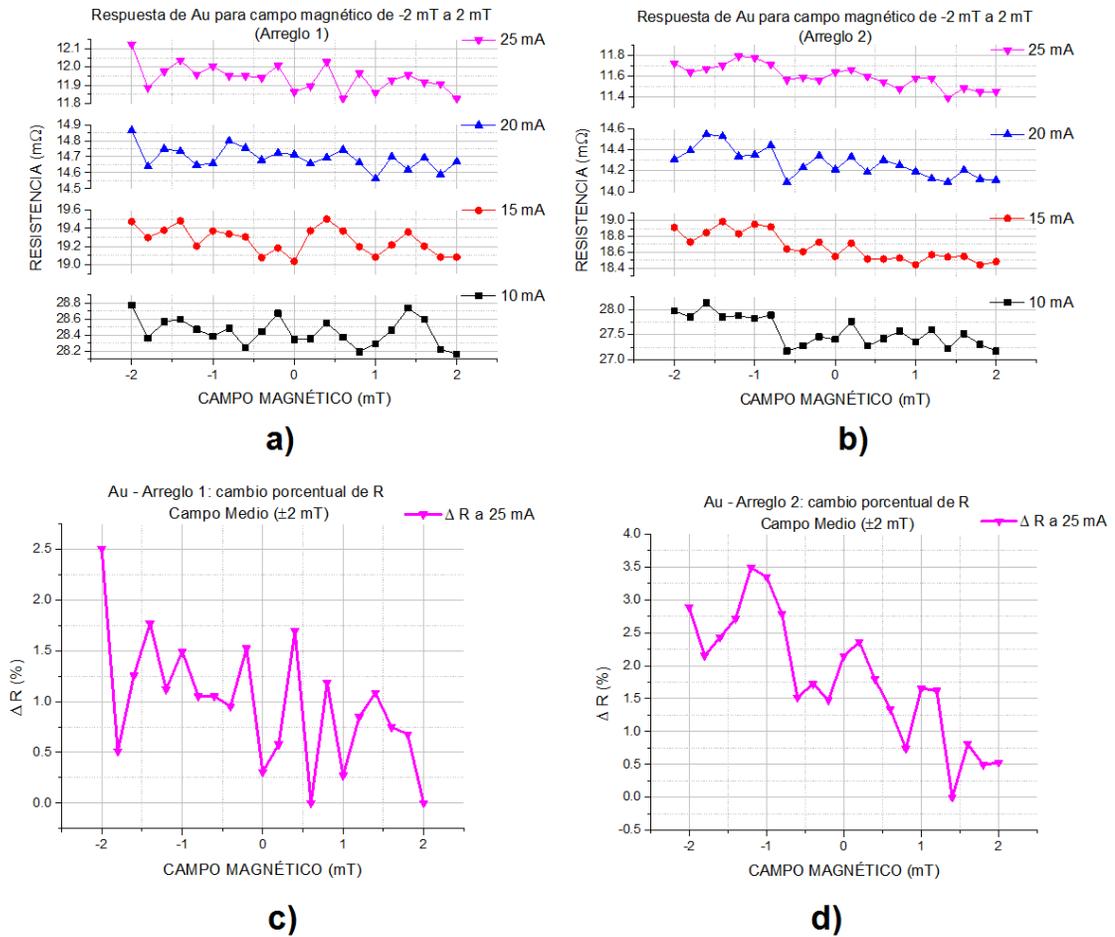


Figura 4.3: Respuesta de MR del Au en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En el arreglo 1 (figura 4.3c) se observa que el valor de R se incrementa al aplicar campo magnético negativo y decrece al aplicar campo positivo, el mayor cambio fue de

2.5 % a 25 mA de corriente aplicada para campo negativo (-2 mT).

En el caso del arreglo 2 (figura 4.3d), se tiene un máximo en campo negativo a -1.2 mT, cuyo porcentaje de cambio es de 3.5 % a 25 mA, valor mayor al registrado para el arreglo 1. En ambos arreglos se tiene una respuesta de ΔR que disminuye al incrementar el campo magnético positivo, sin embargo se observa más evidente el cambio en el arreglo 2.

A diferencia del comportamiento observado para el Au en campo bajo, se observa que en ambos arreglos (para este rango de campo magnético medio) se comporta de manera similar, es decir, el cambio no es aleatorio como en el caso del campo bajo, eso se debe a que al aumentar la intensidad de campo magnético, se provoca mayor desviación de los electrones libres y se intensifica el efecto Hall encontrado en los metales como el Au.

La respuesta de la resistencia que presenta el Au en función del campo magnético alto se observa en la figura 4.4 incisos a y b.

Para el arreglo 1 (4.4a) se tiene un comportamiento similar en ± 200 mT, además para los valores de corriente de 15 y 20 mA, se observa un comportamiento constante teniendo un máximo cerca del campo magnético 0. Posteriormente realizando las curvas de ΔR vs. H (figura 4.4c), se registró un cambio porcentual del 3 % a 10 mA.

Para el caso del arreglo 2 (figura 4.4b) se obtuvieron curvas similares a las registradas anteriormente en el arreglo 1, sin embargo el valor de resistencia a -900 mT cambia para el mismo valor de corriente en cada arreglo, esto igualmente se puede definir como una contribución directa del efecto Hall en el Au, el máximo cambio porcentual fue detectado a una corriente de 25 mA registrando, al igual que en el arreglo 1, un ΔR de 3 % (figura 4.4d).

Por otra parte se presentan diferencias en el valor de cambio porcentual de ΔR , encontrando que se obtiene un cambio mayor para el caso del arreglo 2 en todos los rangos de campo magnético, donde dicho valor de ΔR es de 3 %.

Cabe mencionar que el arreglo que presenta mayor cambio no coincide con la geometría de efecto Hall, lo cual sugiere que las contribuciones de la magnetización por la respuesta magnética y paramagnética no pueden ser ignoradas y contribuyen a los procesos dispersivos que modifican la resistencia del Au.

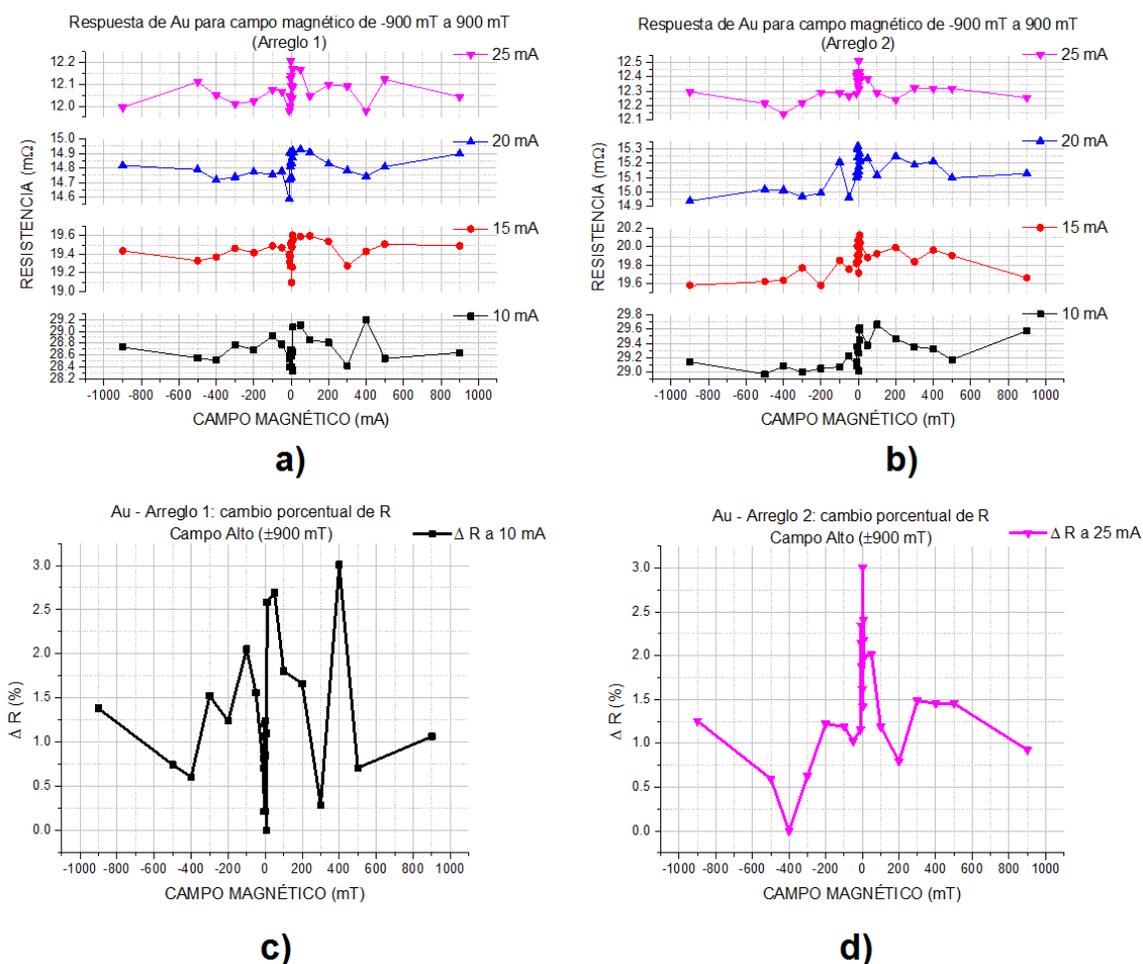


Figura 4.4: Respuesta de MR del Au en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

4.1.2. Caracterización del Cu

En la figura 4.5 incisos a y b se observa el comportamiento de la resistencia del Cu en función del campo magnético aplicado en rango bajo, tanto para el arreglo 1 como para el 2 respectivamente, dichas curvas se muestran para las 4 principales intensidades de corriente.

En campo bajo para el Cu se registró un comportamiento con una pendiente positiva en el caso del arreglo 1, es decir, se observa en la figura 4.5a, que para cada valor de corriente, la respuesta de R tiende a incrementar para campos positivos, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 5.5 % a 25 mA (ver figura 4.5c).

En el caso del arreglo 2 (figura 4.5b) se observa un comportamiento de pendiente negativa, contrario al comportamiento registrado en el arreglo 1, el valor de la resistencia aumenta para campos negativos, el valor de ΔR máximo se registró a 15 mA teniendo un porcentaje de cambio de 4% (ver figura 4.5d).

Los cambios en R dependientes de H en el caso del Cu, se atribuyen también al efecto Hall, ya que al igual que en el Au, se tiene una muestra metálica con electrones libres, mismos que al ser sometidos a un H externo, se desvían de su trayectoria original, por fuerzas de Lorentz, mismas que modifican el proceso de conducción.

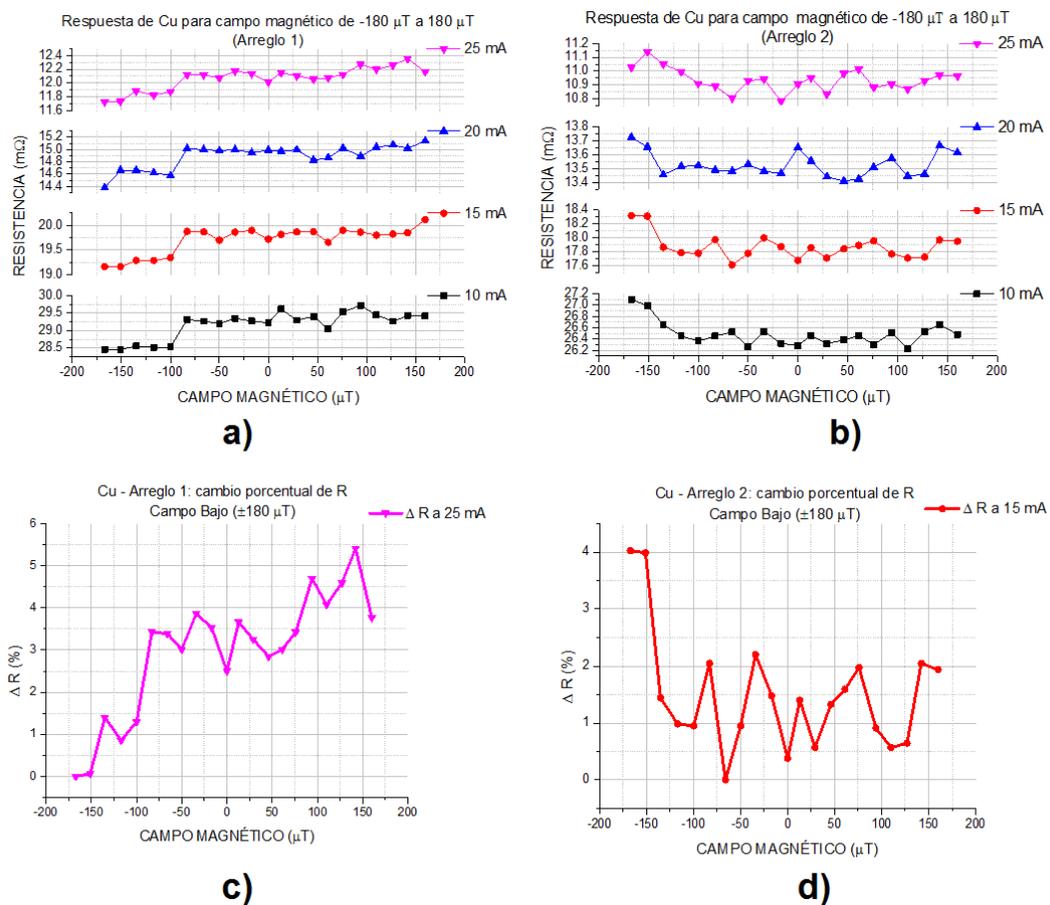


Figura 4.5: Respuesta de MR del Cu en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En la figura 4.6 se observa el comportamiento del Cu sometido a campo magnético medio, es decir en un rango de $\pm 2 \text{ mT}$, en los incisos a y b se encuentra la respuesta de la R en función de campo magnético para los 2 arreglos propuestos.

En el arreglo 1 (figura 4.6c) se tiene una respuesta que se puede aproximar a una recta con pendiente positiva, observando que incrementa el valor de la resistencia al incrementar el campo magnético positivo, el cambio máximo observado fue de 4.1 % a 25 mA de corriente.

Para el arreglo 2 (figura 4.6d) se obtuvo una respuesta con pendiente negativa, es decir, a campo negativo se obtuvieron máximos de cambio en resistencia, al igual que en el arreglo 1, el ΔR más alto registrado fue de 3.5 % a 25 mA, observándose a 1.2 mT.

Se puede observar que la respuesta del Cu al aplicar campo magnético en los rangos bajo y medio se repite, es decir las pendientes presentan un comportamiento similar entre los arreglos a los que fue sometida la muestra.

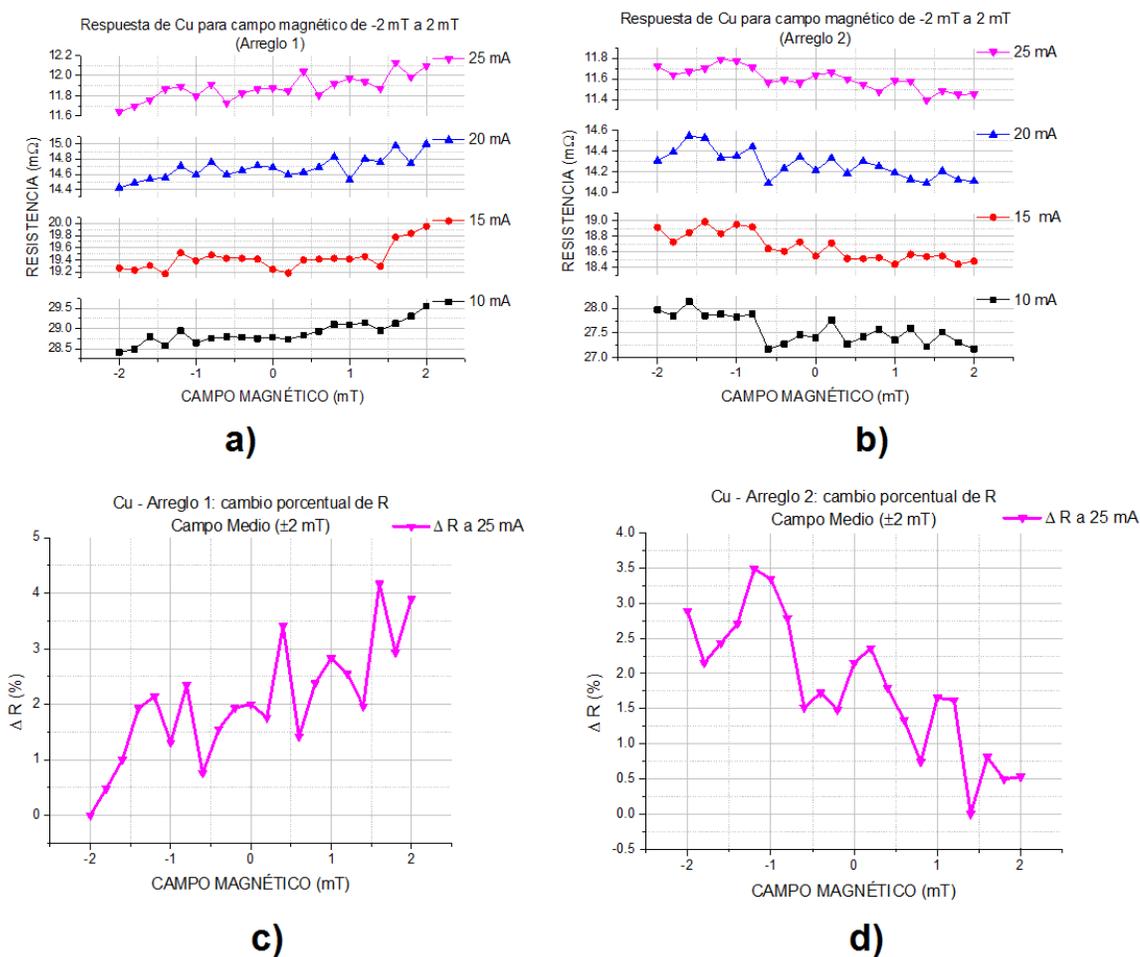


Figura 4.6: Respuesta de MR del Cu en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En la figura 4.7 incisos a y b se observa la respuesta de la R para el Cu en función del campo magnético en rango alto. En el arreglo 1 (figura 4.7a) se observa que al incrementar el campo magnético negativo el valor de la resistencia incrementa, además de tener un máximo en el rango de -100 mT a -200 mT, y al incrementar el campo magnético positivo, el valor de la resistencia disminuye; el máximo cambio registrado para este arreglo fue de 2.6 % a 15 mA.

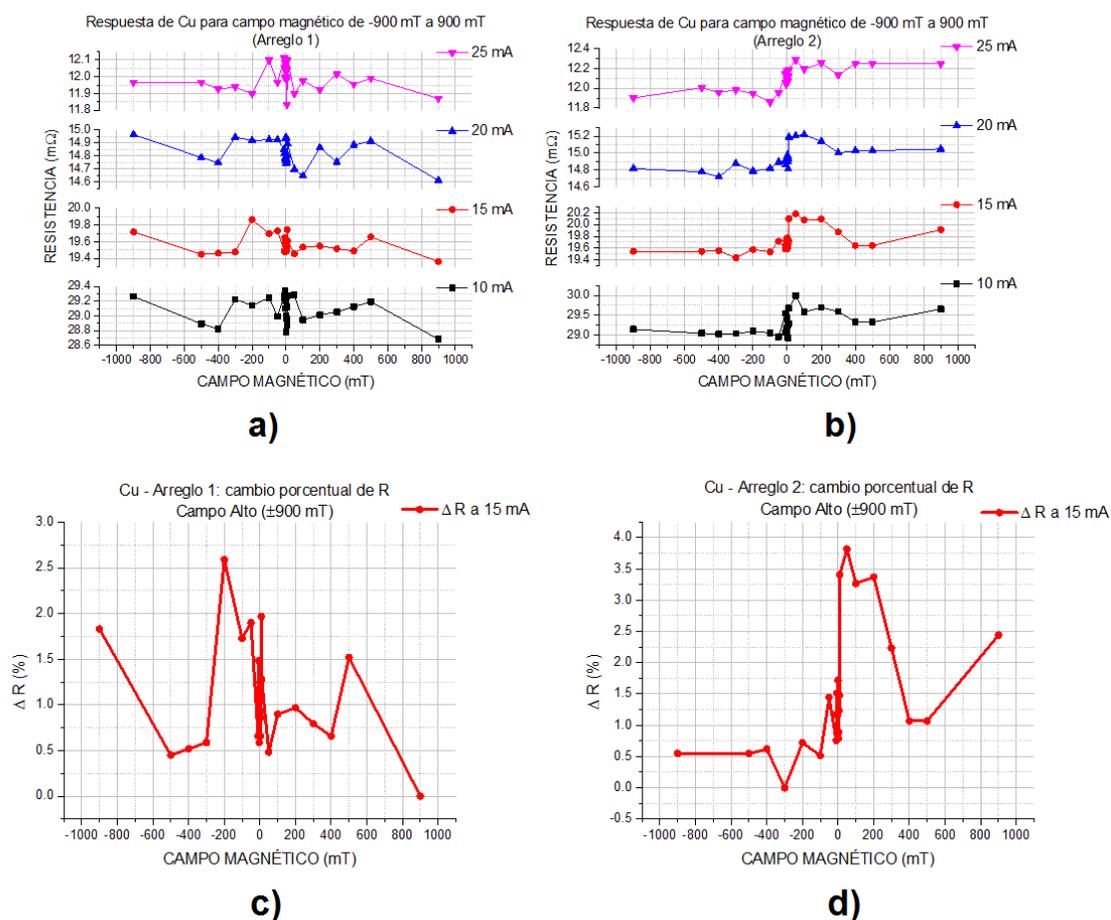


Figura 4.7: Respuesta de MR del Cu en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En el arreglo 2 (figura 4.7b), se observa un comportamiento contrario al arreglo 1, ya que al incrementar el campo magnético negativo la resistencia disminuye, ésta a su vez aumenta al someter la muestra a campo magnético positivo. Al comparar ambas gráficas de comportamiento (arreglo 1 vs. arreglo 2) se puede observar que la forma de la señal se invierte al modificar el arreglo al que se somete la muestra, dicho comportamiento no se había presentado en el Au e incluso el Cu para los rangos anteriores.

El cambio máximo porcentual en el arreglo 2 (figura 4.7d) es de 3.6% a 15 mA de corriente aplicada, cabe mencionar que el porcentaje máximo de ΔR para ambos arreglos se encontró a la misma corriente, sin embargo en las gráficas que se muestran, no se puede determinar un comportamiento constante o simétrico como en el caso del Cu sometido a campo medio.

Se concluye que el equipo está calibrado ya que reproduce los valores de R para metales conocidos, además de ser lo suficientemente sensitivo para detectar los cambios de R en función de campo magnético y de la orientación.

En este caso los cambios de ΔR se asocian a efecto Hall, en particular para el Cu, se logra detectar el cambio en la dirección de desviación de los electrones por el cambio en la dirección de campo magnético, esto debido a que el Cu presenta una resistividad menor al Au. Debido a lo anterior, la dispersión electrónica es menor y el cambio de ΔR debido al efecto Hall se detecta mejor ($\rho_{Au} = 2.35 \times 10^{-8}$ $\rho_{Cu} = 1.71 \times 10^{-8}$)

4.2. Mediciones en Materiales Ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos a caracterizar son Ni, en forma de lámina con espesor de (0.25 mm), Vitrovac 6030 la cual es una aleación en forma de cinta, cuyo espesor es de (0.025 mm), y Vitrovac 6025 en depósito, con espesor de 197 nm.

Para caracterizar los materiales ferromagnéticos, se realiza el mismo procedimiento seguido para los metálicos (Au y Cu), se obtienen curvas de I vs. V para un campo magnético desde -900 mT hasta 900 mT, misma que se divide en tres regiones, campo bajo ($\pm 180 \mu T$), medio (± 2 mT) y alto (± 900 mT), lo anterior se realiza, como se mencionó anteriormente, para observar la existencia de algún comportamiento similar en rangos de campo magnético bajos.

Aún cuando los materiales caracterizados son ferromagnéticos, presentan diferentes propiedades magnéticas, en cuanto a su estructura, existe una diferencia entre el Ni y las dos aleaciones de Vitrovac, ya que el Ni posee una estructura cristalina, mientras que las aleaciones son amorfas.

Como consecuencia de lo anterior, el eje de fácil magnetización cambia, debido a que su anisotropía magnética depende de la estructura cristalina. Cabe mencionar que además todos los materiales tienen espesores diferentes, por lo que la respuesta de R se ve directamente modificada en magnitud para cada uno de ellos.

4.2.1. Niquel

En la figura 4.8 incisos a y b se muestra el cambio de la R para el Ni en función de campo magnético aplicado.

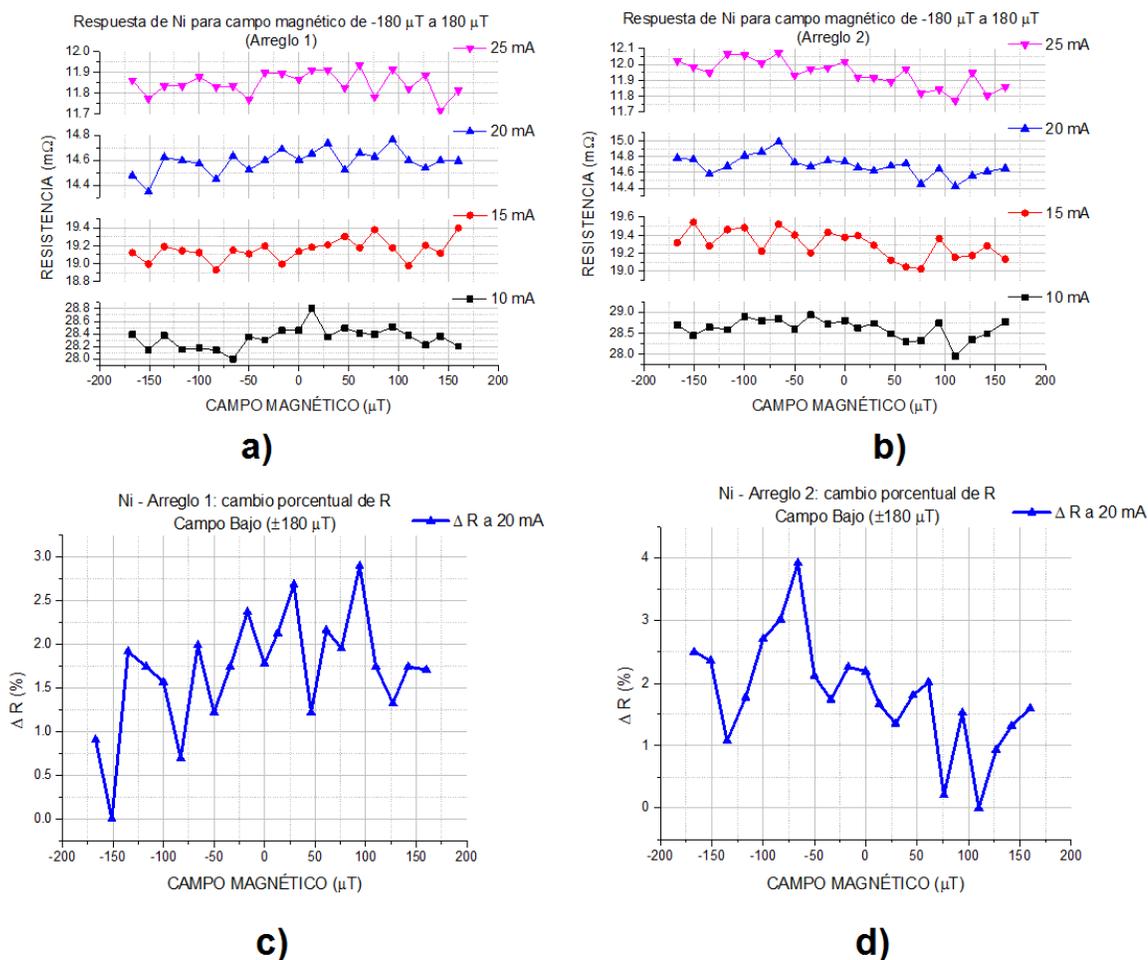


Figura 4.8: Respuesta de MR del Ni en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

Para el arreglo 1 (ver figura 4.8c) se obtuvo un cambio máximo en R de aproximadamente 2.7% a 20 mA, observando dicho máximo para campos positivos, mientras que en el caso del arreglo 2 (figura 4.8d), se obtuvo un ΔR de 3.9% a 20 mA en campo magnético negativo, notando que los comportamientos son contrarios dependiendo del tipo de arreglo. Lo anterior se atribuye al hecho de tener un eje de fácil magnetización, con el cual se puede obtener un mayor o menor cambio en el porcentaje de ΔR .

Sin embargo se destaca que no son simétricas las respuestas, ya que el máximo

registrado en campo positivo no coincide con el negativo, esto se puede deber a una remanencia en el material, tal como ocurre con los electroimanes, ya que al magnetizar un material éste se queda con cierto campo magnético por un tiempo.

En este caso la remanencia proviene del campo magnético con el que fue magnetizada la muestra, ya que el barrido se realiza desde -900 mT hasta 900 mT. Al aplicar campo magnético alto, se produce una magnetización extra que afecta la estructura, es por ello que se atribuye un desfaseamiento de las respuestas máximas que a su vez modifica el valor de la resistencia eléctrica.

En la figura 4.9 incisos a y b se muestra la respuesta de la R en función del campo magnético aplicado al Ni en rango medio, se puede observar que no existe un comportamiento definido de la respuesta.

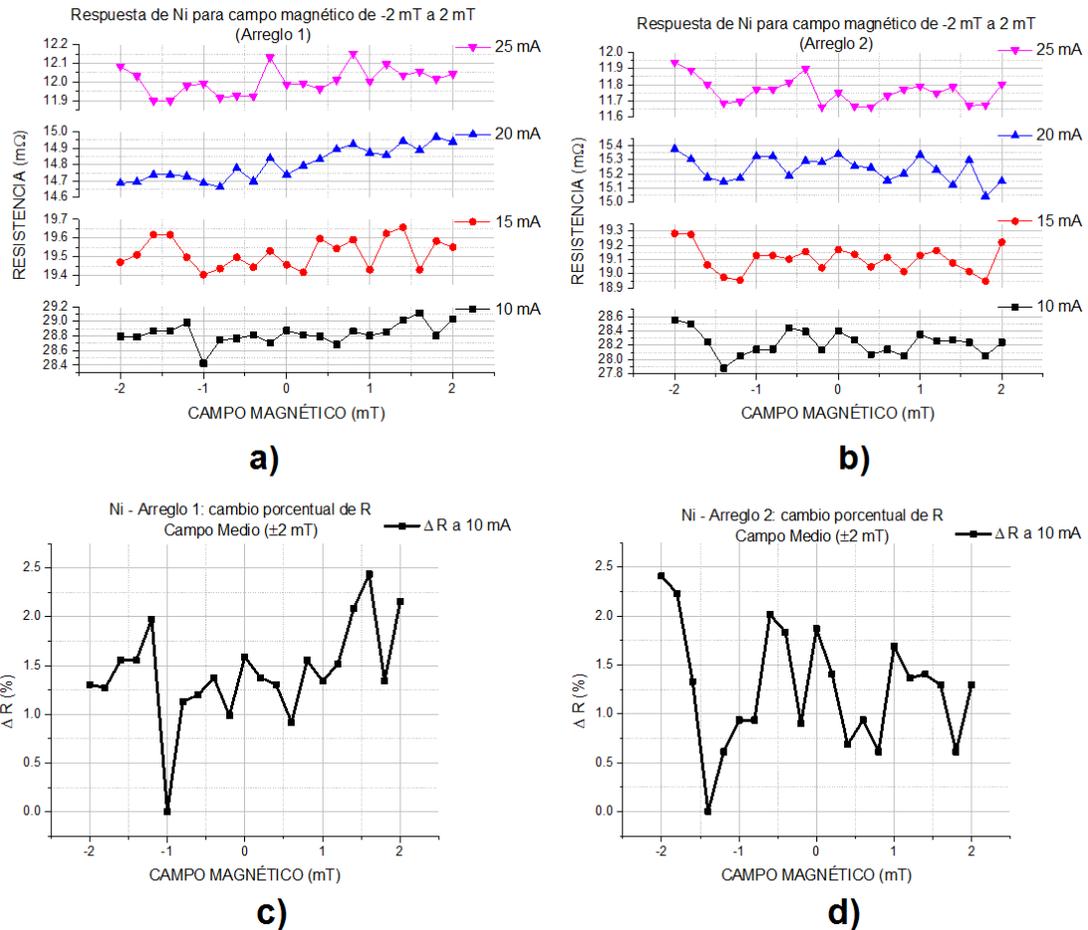


Figura 4.9: Respuesta de MR del Ni en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En el arreglo 1 (figura 4.9a) no se registra un comportamiento constante en cada una de las curvas a diferentes valores de corriente, el cambio fue aleatorio en cuanto a la forma de la señal, sin embargo se obtuvo un porcentaje de cambio máximo de 2.3% a 10 mA (figura 4.9c).

Se obtuvo un cambio porcentual similar en el caso del arreglo 2 (figura 4.9d), observando a 10 mA un 2.4% de ΔR , se registra un cambio constante a diversos valores de corriente en un rango de -1 mT a -2 mT, sin embargo tampoco se registra una constante en la forma de la señal.

Tal como se observó para el campo bajo, los valores de resistencia del Ni, no se comportan de manera similar, sin embargo sigue respondiendo a la ley de Ohm de acuerdo a la variación de la resistencia registrada en función de la corriente. Para cada arreglo se registraron valores iniciales de resistencia similares, variando aproximadamente por 0.2 m Ω .

En este rango y para los arreglos presentados, no se puede hacer una aproximación de la tendencia que siguen las curvas de ΔR vs. H, debido a que no existen cambios constantes registrados.

En la figura 4.10 incisos a y b se observa la respuesta de R en función del campo magnético aplicado en rango alto.

Se observa un comportamiento simétrico entre los arreglos 1 y 2, en el caso del primero (figura 4.10a), incrementa la resistencia al subir el campo positivo, mientras que en el arreglo 2 al subir dicho campo la resistencia disminuye, aunque la forma de las curvas de respuesta es muy similar a las del cobre en campo alto, se puede observar que el comportamiento es contrario comparando entre arreglos.

En el caso del arreglo 1 (figura 4.10c), se tiene un máximo cambio porcentual de 3.7% a 10 mA de corriente aplicada, cambio que es mayor al registrado en el arreglo 2 (figura 4.10d), en el cual se tiene un porcentaje de 3.5% a 20 mA.

Si se ajustan las curvas de ΔR vs. H de la figura 4.10 incisos a y b, se puede observar un comportamiento lineal en el cual las pendientes son contrarias, es decir, en el arreglo 1 se tiene un comportamiento con una pendiente positiva mientras que en el arreglo 2 existe una pendiente negativa que coincide con las gráficas de R vs. H.

Cabe mencionar que las corrientes a las cuales se encontró un porcentaje máximo de cambio no coinciden entre los arreglos, y que el cambio de resistencia para este material ferromagnético-metálico, interviene no solo el efecto de MR sino también existe una contribución del efecto Hall.

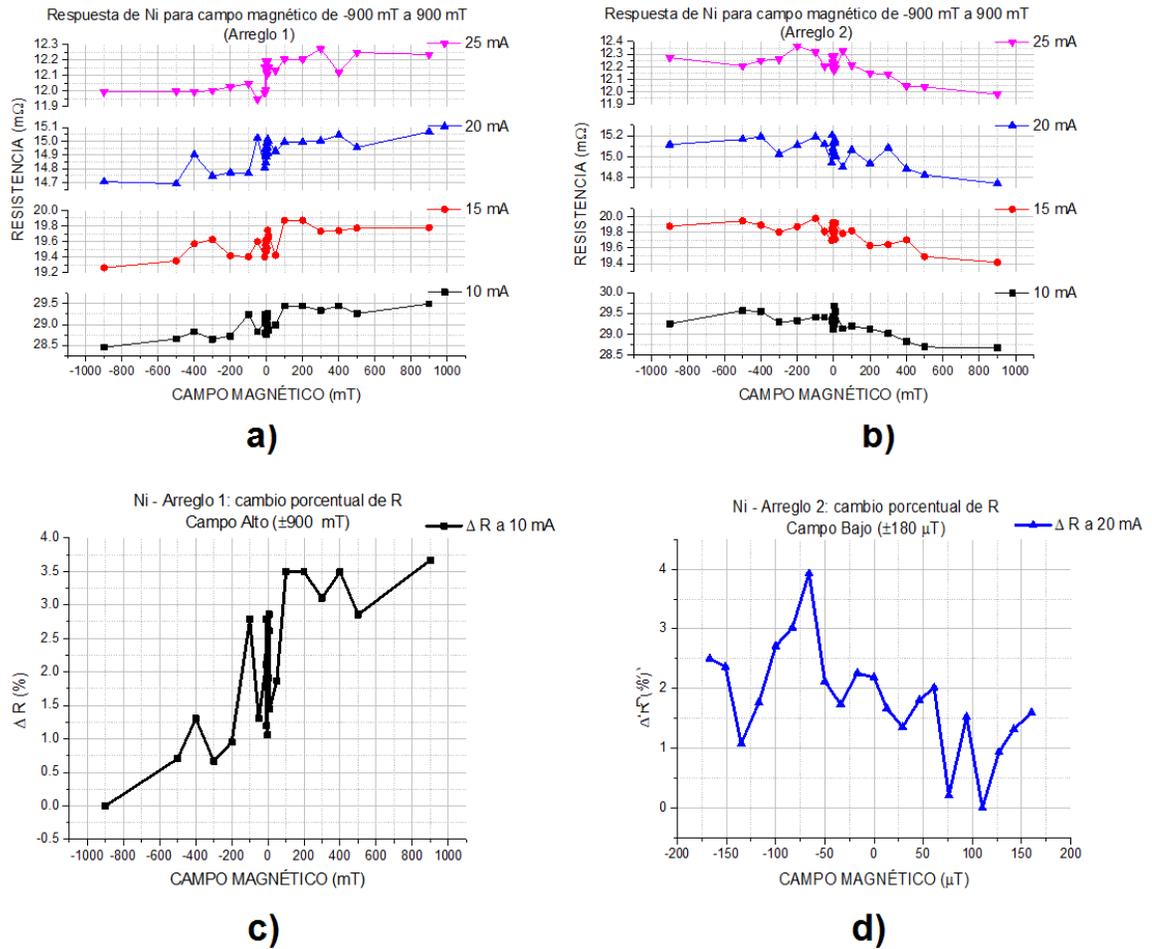


Figura 4.10: Respuesta de MR del Ni en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

4.2.2. Vitrovac 6030

Para el Vitrovac 6030 sometido a campo bajo, (figura 4.11 incisos a y b) se muestran las curvas de comportamiento de R en función del campo magnético aplicado.

En el arreglo 1 (figura 4.11c) la resistencia incrementa al incrementar el campo negativo, observando el mayor cambio porcentual de R de aproximadamente 1.3% a 15 mA de corriente continua, si bien se cuenta con un sistema ferromagnético, se observa que el cambio en ΔR es menor que en los materiales puramente metálicos.

Los cambios típicos de ΔR en materiales ferromagnéticos son del orden del 5%, tal como se observó para el Ni. Sin embargo el Vitrovac 6030 es un material considerado ferromagnético suave, por lo que el campo de anisotropía es cercano a cero.

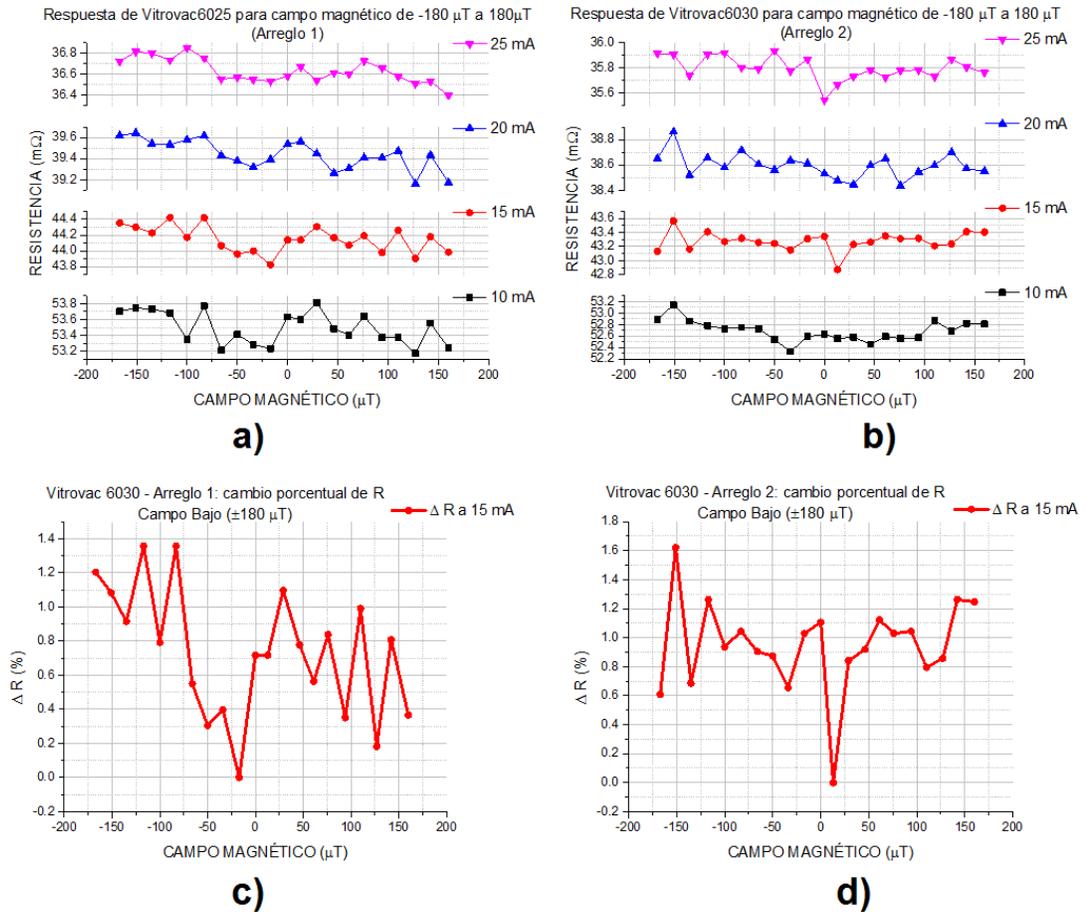


Figura 4.11: Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

El hecho de detectar un cambio de R a pesar de que el campo de anisotropía es casi cero, permite establecer que existen dispersiones eléctricas originadas por la interacción del espín. A pesar de que el cambio es muy pequeño, se logra detectar con el sistema de caracterización implementado, debido a que se considera que cuando un ferromagnético se encuentra saturado, el valor de R disminuye, ya que decrementan las dispersiones por la interacción de intercambio.

En el caso del arreglo 2 (figura 4.11d), el cambio porcentual observado fue de aproximadamente 1.6% a una corriente de 15 mA, sin embargo en este caso no se muestra una tendencia o comportamiento constante en las curvas de respuesta de H vs R .

En ambos arreglos se observa un mínimo de ΔR cercano a $H=0$, sin embargo el mayor cambio en este rango de campo magnético se dio bajo las condiciones del arreglo 2, en el cual la corriente es paralela al campo magnético aplicado y que corresponde al eje de difícil magnetización del material.

En la figura 4.12 incisos a y b, se observan las curvas de respuesta de R para el Vitrovac 6030 en función de campo magnético en rango medio, en las cuales se registra una tendencia de pendiente positiva para ambos arreglos, notándose aún mas una respuesta con tendencia lineal en el arreglo 2 (figura 4.12b).

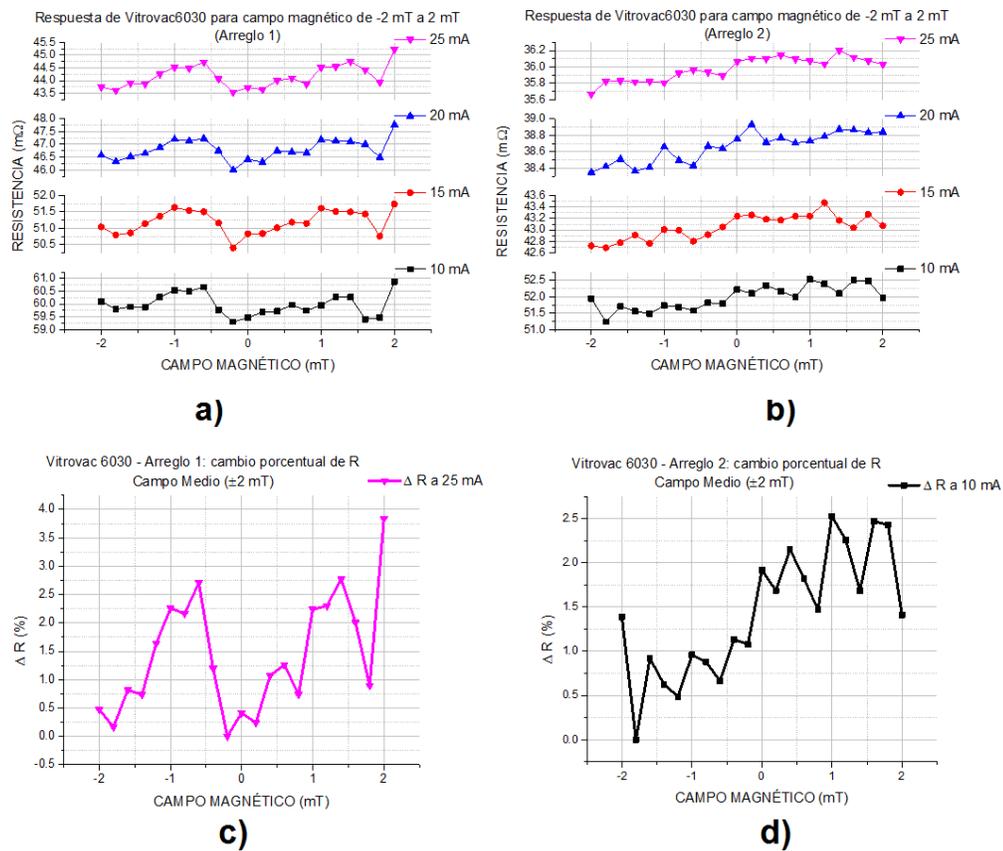


Figura 4.12: Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En el arreglo 1 (figura 4.12a) se observa un mínimo constante a -0.2 mT y un máximo a 2 mT para los 4 distintos valores de corriente aplicada, mismos que se observan en la curva de ΔR vs. H (figura 4.12c), encontrando un cambio porcentual máximo de 3.6% a 25 mA de corriente.

En el arreglo 2 (figura 4.12b) se observan respuestas con pendiente positiva, las cuales tienen un cambio porcentual de 2.5 % y cuyo cambio máximo se registró a una intensidad de corriente de 10 mA (figura 4.12d), en este caso el comportamiento se puede aproximar a una recta con pendiente negativa, contrario al comportamiento del Vitrovac 6030 a campo bajo, se puede tener un comportamiento constante en los 4 rangos de corriente para ambos arreglos.

En la figura 4.13 incisos a y b, se muestra la respuesta de la R en función del campo magnético en rango alto.

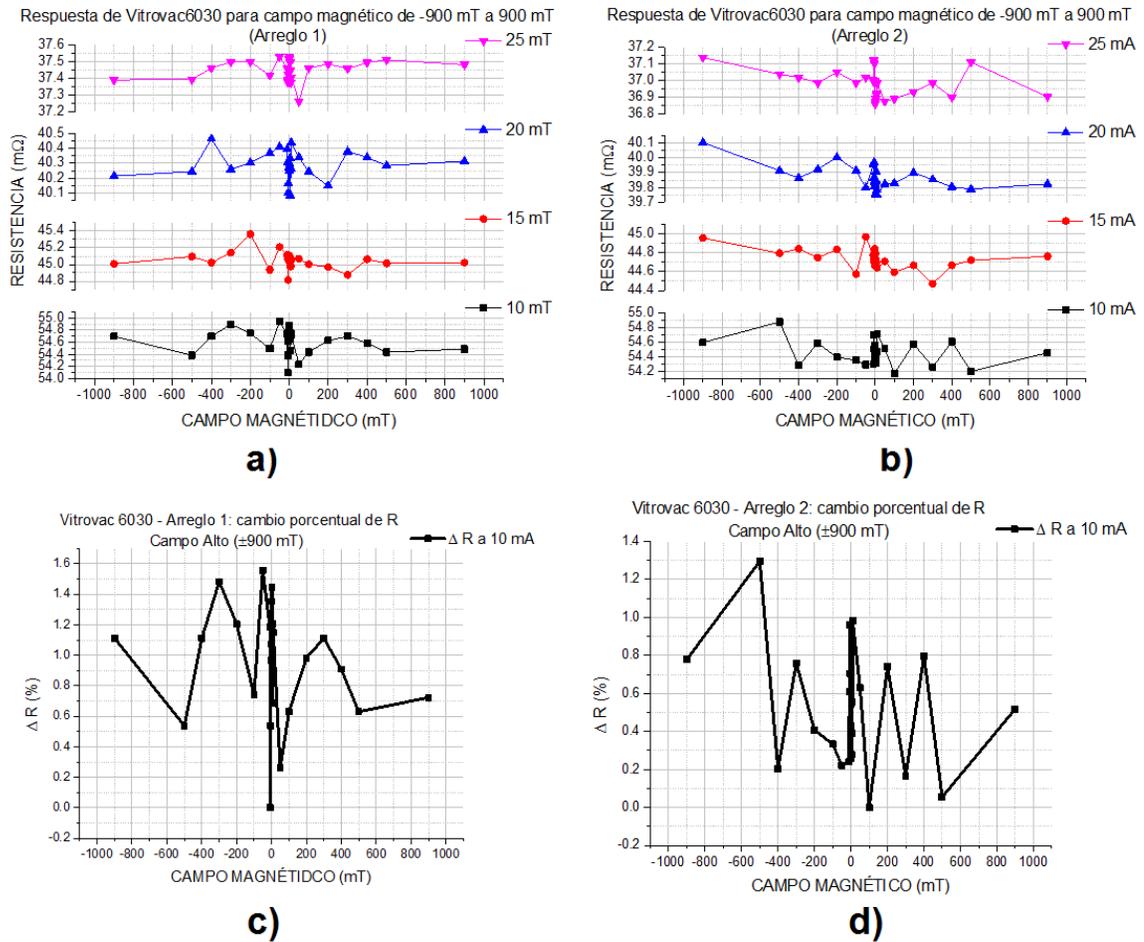


Figura 4.13: Respuesta de MR del Vitrovac 6030 en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

Se puede observar que se tiene un comportamiento aleatorio al aplicar campo magnético, ya que en el arreglo 1 (ver figura 4.13a) el comportamiento se vuelve consta-

te para campos magnéticos positivos, sin embargo para campos negativos no se cuenta con una tendencia definida, aunque el máximo cambio obtenido se pudo observar a 10 mA con un cambio porcentual de 1.5 % (4.13c).

En la respuesta del arreglo 2 (figura 4.13b) se registró un cambio porcentual de 1.3 % igualmente a 10 mA, a diferencia de la respuesta obtenida a campo medio, no se puede determinar una forma de señal en las curvas de ΔR vs. H (figura 4.13d).

Como se mencionó anteriormente, el Vitrovac 6030 es un material ferromagnético que posee también propiedades como un metálico, por lo que los fenómenos que intervienen en la conducción se combinan entre efecto Hall y MR, sin embargo no se puede aproximar un porcentaje de contribución de cada uno en los procesos eléctricos que se describen con las gráficas mostradas, para ello se propone realizar más mediciones en un rango mayor de campo magnético y en función de la temperatura.

Para estas mediciones, el efecto Joule se desprecia ya que la corriente se aplica a la muestra en intervalos de tiempo muy pequeños (aproximadamente 45 segundos) dejando reposar la muestra al menos 2 minutos, por lo que se desprecia el efecto de pérdidas por calentamiento en el material.

4.2.3. Vitrovac 6025

En la figura 4.14 incisos a y b se muestra el comportamiento de R en función del campo magnético en rango bajo.

Se puede observar un cambio constante para cada rango de corriente medido en ambos arreglos. En el arreglo 1 (figura 4.14a) se encuentra un mínimo a $-80 \mu\text{T}$ y un máximo a $125 \mu\text{T}$.

Sin embargo el porcentaje de cambio en el Vitrovac 6025 fue el menor registrado, teniendo 0.13 % a 15 mA (figura 4.14c), se puede observar que a campo negativo, el valor para R disminuye mientras que para campo magnético positivo incrementa hasta llegar al máximo obtenido a los 15 mA. Esto se explica debido a que es el material con menor campo de anisotropía magnética y a esta intensidad de campo magnético se encuentra saturada.

En el arreglo 2 (figura 4.14b) cambia la forma de la respuesta con respecto al arreglo 1, sin embargo se sigue conservando un comportamiento constante que permite determinar que a campo negativo incrementa el valor de R , mientras que al llevar al campo magnético al rango positivo, el valor de R decrementa, contrario al arreglo 1, dicho cambio es mayor a 10 mA registrando un 0.14 % de ΔR (figura 4.14d). Aún cuando las respuestas de los dos arreglos son asimétricas, se registra un valor constante de R a $-50 \mu\text{T}$ para ambos casos.

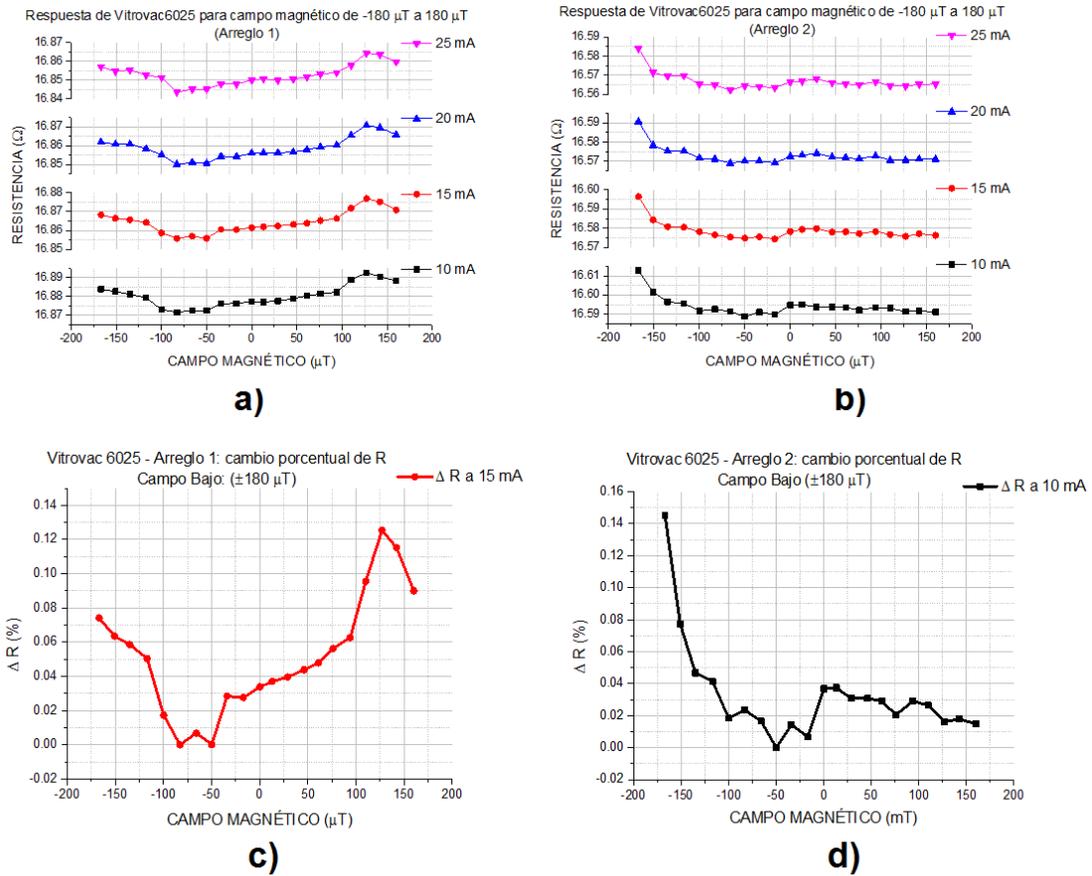


Figura 4.14: Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético bajo, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

En la figura 4.15 incisos a y b se muestra el comportamiento de la R del Vitrovac 6025 en función del campo magnético a rango medio, mostrando las respuestas correspondientes a las 4 intensidades de corriente propuestas.

En el caso del arreglo 1 (figura 4.15a), se observa un comportamiento donde existe un máximo a campo negativo (-0.8 mT) y un mínimo a campo positivo (1 mT) seguido de un pico que cae siempre en la región de 1.4 mT.

Este comportamiento se observa para todos los rangos de corriente medidos, al realizar la gráfica de ΔR vs H (figura 4.15c) se puede observar que al incrementar el campo magnético positivo, existe un menor cambio en la resistencia, mientras que al incrementar el campo negativo aumenta el porcentaje de cambio de R, el mayor porcentaje de cambio registrado fue de 0.11 % a 20 mA de corriente, siendo este el menor cambio

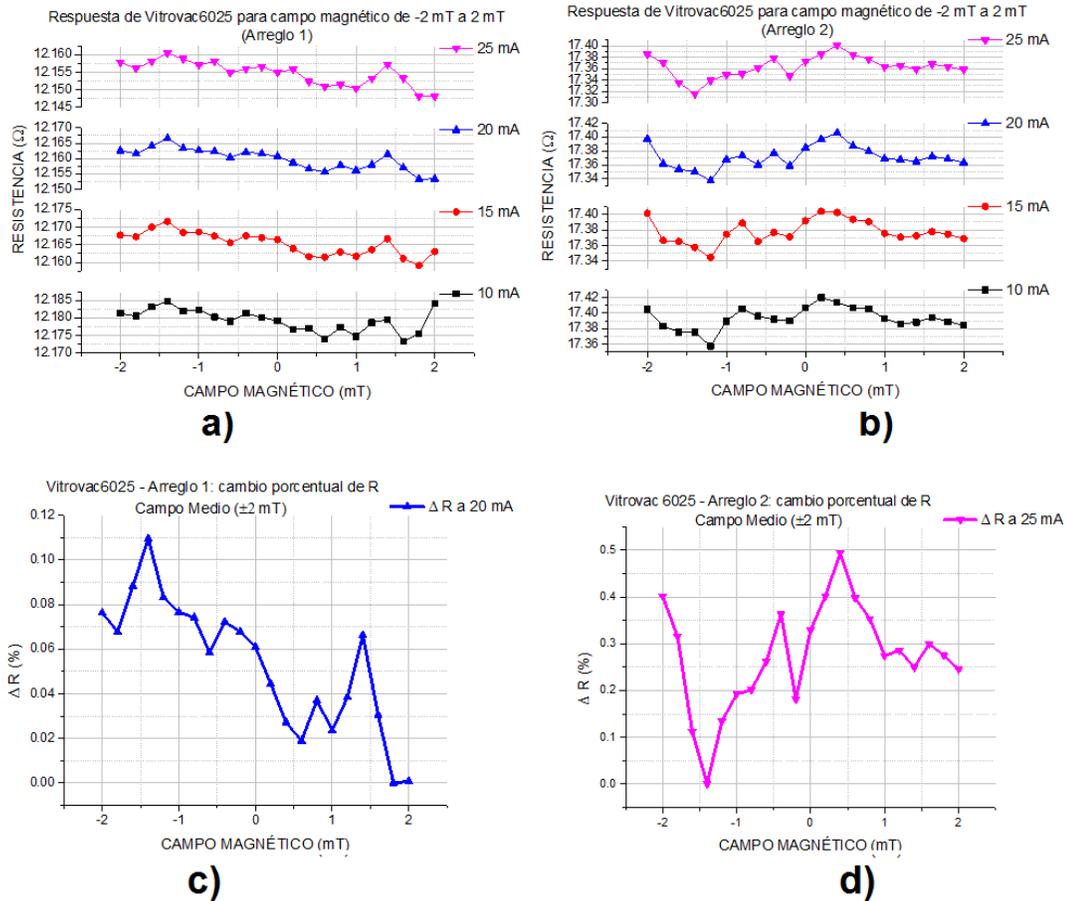


Figura 4.15: Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético medio, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

detectado para todos los materiales y arreglos.

Para el arreglo 2 (figura 4.15b) se observa que contrariamente al arreglo 1, el mínimo valor de R se encuentra a campo negativo (-1.2 mT) mientras que existe un máximo a campo positivo en 0.4 mT. En este caso el comportamiento de la gráfica ΔR vs. H no se observa con tendencia lineal. El cambio máximo encontrado en este arreglo fue de 0.5 % a 25 mA (figura 4.15d).

En la figura 4.16 incisos a y b, se muestra el comportamiento de los valores de R del Vitrovac 6025 en función del campo magnético en rango alto (± 900 mT).

Se puede observar para el arreglo 1 (figura 4.16a) que existe un incremento en la resistencia al incrementar el campo magnético positivo mientras que para el campo magnético negativo, se puede decir que se vuelve constante el comportamiento.

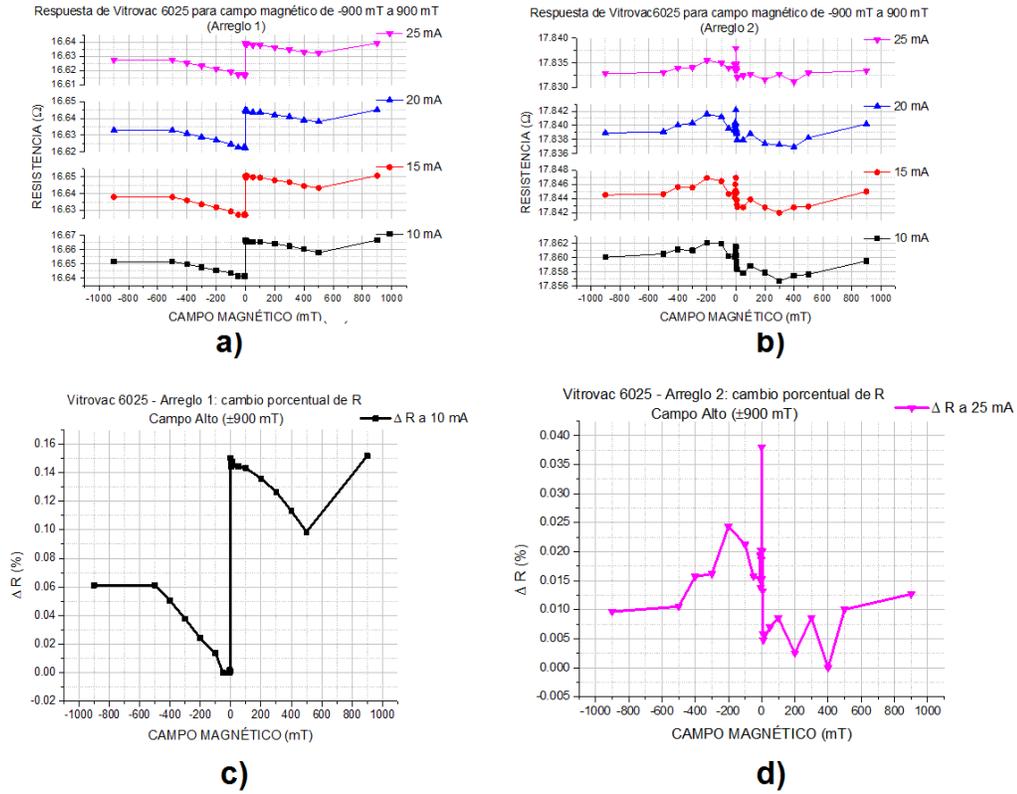


Figura 4.16: Respuesta de MR del Vitrovac 6025 en campo magnético alto, a) Arreglo 1. b) Arreglo 2.

También se observó que existe un corrimiento del valor a campo magnético cercano a 0, mismo que se observa para los 4 valores de corriente medidos, dicho corrimiento se puede explicar debido a que los dominios del material se ven modificados al cambiar el sentido del campo magnético.

En la respuesta de ΔR vs. H (figura 4.16c), se puede observar que el porcentaje de cambio es de 0.15 % siendo éste uno de los cambios porcentuales más pequeños obtenidos, sin embargo la forma de la señal permite concluir que existe cambio de MR, mismo que para observar mejor, se sugiere aplicar posteriormente un campo magnético más grande, de tal forma que se maximice el efecto observado y la respuesta incremente en magnitud.

Para el arreglo 2 (figura 4.16b), se observa un comportamiento constante donde incrementa la resistencia al incrementar el campo magnético positivo, sin embargo al encontrarse en la zona de cambio de sentido del campo magnético, se observa que las

curvas tienen una transición más lenta que en el caso del arreglo 1.

Lo anterior se asocia con el eje de fácil magnetización del material, ya que al someterlo a campo magnético, se modifican los dominios, mismos que tomarán mayor cantidad de energía y por lo tanto tendrán una transición más lenta cuando el campo magnético y dicho eje de fácil magnetización sean perpendiculares entre sí, ya que esto querrá decir que se requiere mayor intensidad de campo para alinear mayor cantidad de momentos y tener un cambio significativo.

Prueba de ello es que al generar las curvas de ΔR vs. H , se obtuvo un porcentaje de cambio menor al registrado en el arreglo 1, siendo de 0.037 % a una intensidad de corriente de 25 mA (figura 4.16d) esto se debe a que es el material más delgado y magnéticamente más suave.

En la figura 4.17, se puede observar una comparación de los valores de ΔR para cada material en el arreglo 1 (inciso a) y arreglo 2 (inciso b), donde se muestran también las intensidades de corriente a las cuales se registró el mayor cambio de R .

Se observa que la intensidad de corriente donde se registró el máximo valor de ΔR , no es el mismo para todas las muestras, esto se debe a que las dispersiones electrónicas no son consideradas como procesos constantes, y al incluir un campo magnético, existe una contribución extra generada debido a que interviene el espín en el proceso de dispersión.

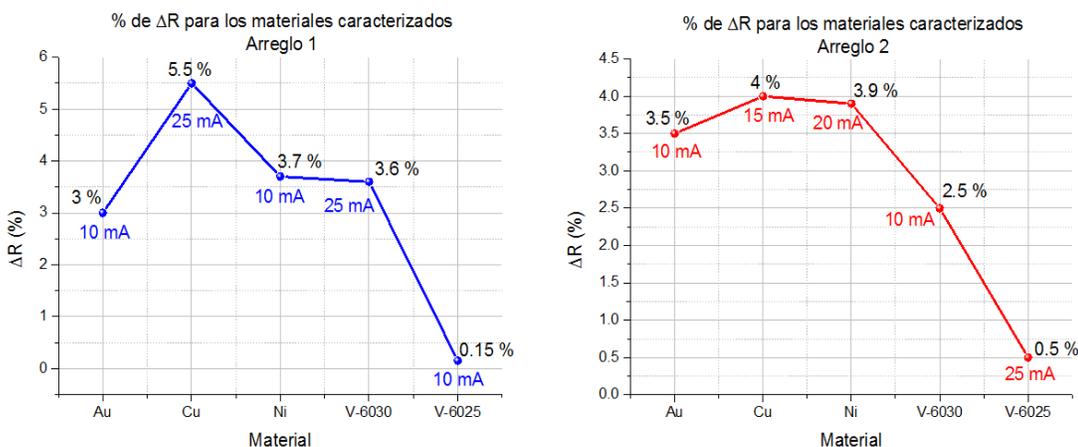


Figura 4.17: Curvas de comparación de la respuesta de ΔR para cada material. a) Arreglo 1, b) Arreglo 2

Sin embargo, se puede apreciar que los cambios son consistentes en cada arreglo, es

decir, el mínimo ΔR se obtuvo en ambos casos para el Vitrovac 6025 que es el material ferromagnético más suave que se midió, mientras que el máximo se observa para el Cu. Si bien el porcentaje de cambio no es el mismo, se observa una tendencia similar en ambas curvas, lo cual permite determinar que el material tiene un comportamiento similar en ambos arreglos.

En la figura 4.18 se observa un resumen de los resultados obtenidos en las mediciones, mismas que se realizaron en dos arreglos, con el campo magnético y la corriente paralelos y perpendiculares.

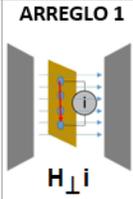
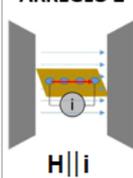
			MATERIAL				
			Metálico		Metálico-Ferromagnético		
			Au espesor: 0.025 mm	Cu espesor: 0.25 mm	Ni espesor: 0.25 mm	Vitrovac 6030 espesor: 0.025 mm	Vitrovac 6025 espesor: 0.197 nm
PORCENTAJE DE CAMBIO (% ΔR)	 <p>ARREGLO 1 $H \perp i$</p>	Campo Bajo ($\pm 180 \mu T$)	2.25 % a 25 mA	5.5 % a 25 mA	2.7 % a 20 mA	1.3 % a 15 mA	0.13 % a 15 mA
		Campo Medio ($\pm 2 \text{ mT}$)	2.5 % a 25 mA	4.1 % a 25 mA	2.3 % a 10 mA	3.6 % a 25 mA	0.11 % a 20 mA
		Campo Alto ($\pm 900 \text{ mT}$)	3 % a 10 mA	2.6 % a 15 mA	3.7 % a 10 mA	1.5 % a 10 mA	0.15 % a 10 mA
	 <p>ARREGLO 2 $H \parallel i$</p>	Campo Bajo ($\pm 180 \mu T$)	3.4 % a 10 mA	4 % a 15 mA	3.9 % a 20 mA	1.6 % a 15 mA	0.14 % a 10 mA
		Campo Medio ($\pm 2 \text{ mT}$)	3.5 % a 10 mA	3.5 % a 25 mA	2.4 % a 10 mA	2.5 % a 10 mA	0.5 % a 25 mA
		Campo Alto ($\pm 900 \text{ mT}$)	3 % a 25 mA	3.6 % a 15 mA	3.5 % a 20 mA	1.3 % a 10 mA	0.037 % a 25 mA

Figura 4.18: Resultados para las mediciones de AMR en ferromagnéticos ultrasuaves.

Se observa que se pudo detectar AMR debido a que el valor de la resistencia varía de acuerdo al arreglo al que se somete la muestra. Las incertidumbres que se manejaron para las mediciones obtenidas fueron de $\pm 0.5 \text{ f}\Omega$, debido al equipo utilizado para la excitación y detección de ΔR , mientras que el error de medición de R obtenido fue de 0.0001 %.

Conclusiones y Trabajo Futuro

Se instrumentó el fenómeno de AMR en ferromagnéticos suaves mediante la implementación de un software de control integral para la caracterización de muestras, para ello fue necesario diseñar un portamuestras que permitiera la correcta sujeción de la muestra al introducirla a campo magnético.

Se realizaron pruebas principalmente con dos tipos de porta muestras, los cuales se validaron de acuerdo a la respuesta de los materiales estándar utilizados, con ello se pudo validar tanto el porta muestras como el sistema completo para su implementación en la caracterización magnética, registrando variaciones en R en el orden de los $m\Omega$ para los materiales propuestos.

El porta muestras elegido para la instrumentación de AMR fue el “prototipo 2” debido a que cuenta con terminales metálicas flexibles, lo cual permitió un mejor contacto con las muestras, sin importar si se trataba de un depósito sobre sustrato de vidrio *pyrex* o una cinta amorfa flexible. En el caso del “prototipo 1” no fue posible controlar la altura de los 4 puntos de contacto, por lo que algunas muestras tendían a flexionarse, mientras que las rígidas no tenían el contacto adecuado para establecer una medición confiable.

El *software* de control fue diseñado en LabVIEW®, se obtuvieron resultados satisfactorios debido a que se logró el control del sistema integral, sin embargo se propone como trabajo futuro implementarlo en lenguaje C, debido a que dicho lenguaje requiere menos recursos de memoria en una PC, además de ser *software* libre.

Debido a lo anterior, se pudiera instalar en cualquier equipo que se desee adecuar al sistema para su control, además se observó que el tiempo de respuesta entre la sincronización del electroimán y el equipo Keithely® varía al rededor de medio segundo, lo que retrasa las mediciones y pudiera causar errores en la lectura, lo cual resultaría en el registro de valores erróneos.

Para el sistema de control, se optó por una cremallera que fuera desplazada en el eje “x” mediante un motor al cual se le adaptó un engrane a la medida, tanto la cremallera como el piñón fueron fabricados mediante impresión 3D, de los cuales se realizaron los planos con ayuda del software AutoCAD®, obteniendo una resolución adecuada en el movimiento de dicha cremallera para el posicionamiento de la muestra dentro del campo magnético.

Como se mencionó anteriormente, el sistema fue calibrado con dos materiales estándar, siendo el Au y el Cu los elegidos debido a sus excelentes propiedades eléctricas. A pesar de que los materiales metálicos tuvieron un comportamiento eléctrico lineal, se registró un cambio de resistencia al aplicar campo magnético externo, lo cual se puede explicar debido al efecto Hall, el cual sugiere dispersiones originadas por la componente magnética debido a la generación de una magnetización negativa por el diamagnetismo y que se evidencia a campos muy altos.

Al referirse a ferromagnéticos metálicos como el Ni y el Vitrovac, existen contribuciones que son debidas al momento magnético, como trabajo futuro, se propone estudiar ésta última componente para observar cambios en la conductividad de materiales ferromagnéticos y tratarlos de correlacionar con procesos de magnetización.

Se consideró despreciar el efecto Joule debido a que los intervalos de tiempo a los que la muestra es sometida al flujo de corriente, son del orden de décimas de segundo (45 segundos aproximadamente), dejando reposar la muestra al rededor de 1 minuto, por lo que no se logra calentar el material lo suficiente para asociar un cambio en la resistencia debido a dicho efecto Joule.

Para materiales ferromagnéticos, se obtuvieron resultados favorables ya que se pudo concluir que la variación registrada en el valor de la resistencia se debe a Magnetorresistencia, si bien el valor del campo es muy pequeño, es la primera vez que se observa variación de R en materiales ferromagnéticos-metálicos ultrasuaves en función de un campo magnético.

La mayoría de los estudios se refieren a materiales magnéticos con alto campo de anisotropía y multicapas metálicas, sin embargo en este trabajo se pudo detectar la dispersión electrónica dependiente de campo magnético y se estableció además que depende del espesor de la muestra así como de la estructura cristalina.

Los materiales ferromagnéticos se sometieron a tres rangos de campo debido a su comportamiento descrito por la curva de magnetización, los tres rangos seleccionados ($H_{bajo} = \pm 160$ uT, $H_{medio} = \pm 2$ mT y $H_{alto} = \pm 900$ mT) fueron implementados con el objetivo de excitar el material desde su región lineal hasta llegar a su saturación magnética.

Como parte del trabajo futuro, también se plantea el diseño de un portamuestras que permita medir MR en óxidos, ya que la resistencia es mayor comparada con la res-

puesta de un ferromagnético; realizando un porta muestras que sea intercambiable con el dispositivo actual diseñado en este trabajo, ya que se tendría un sistema de caracterización más completo que permitiría introducir muestras con variaciones de resistencia desde el orden de los micro Ohms ($\mu\Omega$) hasta los Mega Ohms ($M\Omega$), sustituyendo un sólo elemento; se debe destacar que no existen sistemas comerciales que permitan este tipo de caracterización de amplio rango.

De igual forma se pretende implementar medición de efecto Hall para discriminar su contribución en las mediciones realizadas, además de caracterizar materiales distintos como multicapas, óxidos, depósitos amorfos y materiales cristalinos para determinar el comportamiento magnético de éstos. La implementación de la medición de MR se utilizará para la caracterización de materiales trabajados el Grupo de Materiales y Nanotecnología en el CCADET.

Bibliografía

- [1] J.D. Wilson and A.J. Buffa. *Física*. Pearson Educación, (2003), 650-653.
- [2] P.G. Hewitt. *Conceptual Physics*. Addison Wesley, (2002) 415-417.
- [3] J.M. Thomas. *Michael Faraday and The Royal Institution: The Genius of Man and Place (PBK)*. The Genius of Man and Place. Taylor & Francis, (1991) 13-18.
- [4] E.E. Brooks and A.W. Poyser. *Magnetism and Electricity: A Manual for Students in Advanced Classes*. Longmans, Green and Company, (1912), 16-23.
- [5] S. Chakravorti. *Electric Field Analysis*. CRC Press, (2015), 1-13.
- [6] W.K.H. Panofsky and M. Phillips. *Classical Electricity and Magnetism: Second Edition*. Dover Books on Physics. Dover Publications, (2012), 139-145.
- [7] J.B. Marion and J.V. Coma. *Dinámica clásica de las partículas y sistemas*. Reverté, (1975) 358, 359.
- [8] J.C. Quintana and F.L. Aguilar. *Interacción Electromagnética. Teoría Clásica*. Reverté, (2007), 121-127.
- [9] J. Stöhr and H.C. Siegmann. *Magnetism: From Fundamentals to Nanoscale Dynamics*. Springer Series in Solid-State Sciences. Springer, (2006) 15-20, 47-50, 515-517, 556-558.
- [10] Y. Liu, D. Shindo, and D.J. Sellmyer. *Handbook of Advanced Magnetic Materials*. Developments in Hydrobiology Series. Springer, (2005), 129-133, 159-164.
- [11] M.A. Plonus. *Electromagnetismo aplicado*. Reverté, (1994), 436, 437.
- [12] M. Getzlaff. *Fundamentals of Magnetism*. Springer Berlin Heidelberg, (2007), 1-5, 12, 13.
- [13] T.L. Francavilla, R.A. Hein, and D.H. Liebenberg. *Magnetic Susceptibility of Superconductors and Other Spin Systems*. Springer US, (2013), 49-51.

-
- [14] G.W. Dunnington, J. Gray, and F.E. Dohse. *Carl Friedrich Gauss: Titan of Science*. MAA spectrum. Mathematical Association of America, (2004).
- [15] W.H. Hayt. *Engineering Electromagnetics*. Electrical Engineering Series. McGraw-Hill, (1974), 300-305.
- [16] E.M. Purcell. *Electricidad y magnetismo*. Berkeley physics course. Reverté, (1988), 200-204.
- [17] J.L.G. García. *Sistemas de unidades físicas*. Reverté, (1987), 252-258, 264-266.
- [18] G.T. Meaden. *Electrical resistance of metals*. International Congresses of Quantum Chemistry Series. Plenum Press, (1965), 1, 2, 26-28.
- [19] J.P. Suchet and B.R. Pamplin. *Electrical Conduction in Solid Materials: Physico-chemical Bases and Possible Applications*. Elsevier Science, (2013), 8, 9.
- [20] K. Fuchs. The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34:100–108, 1 (1938).
- [21] P. Wissmann and H.U. Finzel. *Electrical Resistivity of Thin Metal Films*. Number no. 223 in Electrical resistivity of thin metal films. Springer, (2007), 1, 2.
- [22] W.H. Hayt, A.G.F.B. Ghezzi, and F.J.R. Sánchez. *Teoría electromagnética*. McGraw-Hill, (1992).
- [23] O. Madelung, A.B. Lidiard, J.M. Stevels, and E. Darmais. *Electrical Conductivity II*. Encyclopedia of Physics: Electric and Magnetic Behavior of Matter. Springer Berlin Heidelberg, (2013), 250-255.
- [24] W.D. Callister. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Number v. 1 in Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. Reverté, (2002), 17-19.
- [25] D.K. Cheng and E.M. Peake. *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson educación. Alhambra Mexicana, Editorial, S.A. de C.V., (1998), 97-99.
- [26] J.V. Pérez and S.V. Pérez. *Electromagnetismo*. Serie Universitaria Patria. (2014), 1-4.
- [27] J.P. Colinge and C.A. Colinge. *Physics of Semiconductor Devices*. Physics of semiconductor devices. Springer US, (2007), 15-22.
- [28] J.L. Trueba and Universidad Rey Juan Carlos. Servicio de Publicaciones. *Electromagnetismo, circuitos y semiconductores*. Ciencias experimentales y tecnología. Editorial Dykinson, S.L., (2007), 217-221.
-

-
- [29] J. Kotz, P. Treichel, J. Townsend, and D. Treichel. *Chemistry & Chemical Reactivity*. Cengage Learning, (2014), 595, 596.
- [30] B.D. Cullity and C.D. Graham. *Introduction to Magnetic Materials*. Wiley, (2011), 1-10.
- [31] J. Taguena. *De la brújula al espín: el magnetismo*. La ciencia para todos. Fondo De Cultura Economica USA, (2001), 3-15.
- [32] C. Kittel and J.A. Peris. *Introducción a la física del estado sólido*. Reverté, (1995), 474, 475, 505-507.
- [33] A.C. Solé. *Instrumentación industrial*. Marcombo, (2010), 358-360.
- [34] P.A. Tipler and G. Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología*. Number v. 1 in Física para la ciencia y la tecnología. Reverté, (2005), 937, 938.
- [35] M.M.P. Barral and J.M. Ruso. *Introducción al electromagnetismo*. Manuais universitarios. Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, (2008), 188-190.
- [36] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloë. *Quantum mechanics*. Quantum Mechanics. Wiley, (1977).
- [37] Weicheng Lv, Frank Krüger, and Philip Phillips. Orbital ordering and unfrustrated $(\pi, 0)$ magnetism from degenerate double exchange in the iron pnictides. *Phys. Rev. B*, 82:045125, Jul (2010).
- [38] C. Kittel. Model of exchange-inversion magnetization. *Phys. Rev.*, 120:335–342, Oct (1960).
- [39] I.D. Mayergoyz. *Mathematical Models of Hysteresis and their Applications: Second Edition*. Electromagnetism. Elsevier Science, (2003), 149-153.
- [40] L. Sirdeshmukh K.G. Subhadra D.B. Sirdeshmukh and C.S. Sunandana. *Electrical, Electronic and Magnetic Properties of Solids*. Materials Science. Springer International Publishing Switzerland, (1985), 46, 47, 140-142.
- [41] E.Y. Tsymbal and I. Zutic. *Handbook of Spin Transport and Magnetism*. CRC Press, (2011), 69-75.
- [42] W. Thomson and F.R.S. Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron. 8:546–550.
- [43] Jian Sun and Jürgen Kosel. Extraordinary magnetoresistance in semiconductor/-metal hybrids: A review. *Materials*, 6(2):500–516, (2013).
- [44] S. Tumanski. Thin film magnetoresistive sensors. (2001), volume 49.

- [45] M. Holz. *The Extraordinary Magnetoresistance of Semiconductor-metal Hybrid Structures: Modeling and Optimization*. Cuvillier, (2004), 5-8.
- [46] Tesis de Doctorado en Física Juan Carlos Rojas Sánchez. Efectos combinados de carga y espín en semiconductores, instituto balseiro, universidad nacional de cuyo, comisión nacional de energía atómica. argentina. (octubre, 2010).
- [47] Universidad de Perú. Grupo de Materiales Nanoestructurados. Facultad de Ciencias de la UNI. Transporte de espín: estudio de las propiedades magnéticas de los óxidos mixtos tipo perovskita $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ y $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$. Artículo web. consultado en Enero de 2015.