



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

IMPLEMENTACIÓN DE HILO FERROMAGNÉTICO COMO SENSOR DE  
MAGNETOIMPEDANCIA PARA CAMPOS MENORES A  $1 \mu\text{T}$ .

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

PRESENTA:  
ING. JUAN MANUEL GÓMEZ CRUZ

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. MARÍA HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ, CCADET-UNAM

MÉXICO, D.F. JUNIO 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. Sandoval Romero Gabriel Eduardo

Secretario: Dr. Guadarrama Santana Asur

Vocal: Dra. Montiel Sánchez María Herlinda

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Ordoñez Romero César Leonardo

2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Álvarez Lucio Guillermo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Laboratorio del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico - UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. MARÍA HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ

---

**FIRMA**

整理  
整頓  
清潔  
清掃  
躰



# Reconocimientos

---

Gracias...

A mis padres Aída Cruz Rodríguez y Juan Manuel Gómez Flores quienes siempre han estado conmigo dándome su amor incondicional, apoyándome a cada momento y enseñándome a ser feliz. Gracias por enseñarme a ser constante y disciplinado, por las bromas risas y los grandes momentos a su lado. Gracias por darme más de lo que quizás merezco, por cuidarme aun cuando no estoy enfermo, por cada abrazo y cada beso, cada palabra de aliento y cada consejo. Muchas gracias por ser parte de este y todos los proyectos que he tenido, ya que somos un equipo. Pero sobre todas las cosas gracias por ser los mejores padres.

A mis hermanitos Osmar y Pepe quienes siempre han estado a mi lado apoyándome, desvelándonos, jugando, riendo y disfrutando de nuestra compañía. Gracias por aguantar mis modos en los buenos y malos momentos, por las bromas, los chistes e incluso los regaños. Osmar gracias por ser tan atento, independiente y servicial y por tener siempre un consejo. Pepillo, gracias por ser tan alegre y cariñoso, aun cuando el día no sea el mejor buscas la manera de sacar una sonoriza.

Jenny gracias por todo tu apoyo, por todo tu cariño, tus consejos, conocimiento, por estar conmigo y por toda la paciencia que me tienes. Gracias por el gran equipo que hacemos, y por ser tan especial. Estoy seguro que seguirán los logros así como este que estamos realizando y sabes que estaré ahí apoyándote. Te adoro.

A la Dra. Ma. Herlinda Montiel quien me ha brindado todo su apoyo, amistad y conocimiento y quien hizo posible este trabajo. Estoy muy orgulloso de formar parte de su equipo ya que me permite realizar lo que me gusta y todos los días puedo aprender cosas nuevas.

Gracias a todo el grupo de Magneto-Óptica o como diríamos los “Los Almas Mater”, Itzel, Jenny, Ramiro, Gus, Benji, Pablo, Luis, Chuchin y Omar, que como diría Gus, de no ser por ustedes hubiera terminado antes jaja. No es cierto amigos, gracias primero que nada por estar en mi camino, por dejarme aprender de ustedes y con ustedes, por

los grandes momentos y risas que vaya han sido muchas, pero sobre todo gracias por su amistad.

A Miguel Bazán, que desde que llegué me brindó su apoyo, amistad y todos sus consejos. Gracias por todas esas platicas, cenas y por toda esa convivencia tanto laboral como de amistad tan sana. Migue Gracias por ser mi amigo.

Al buen Isaac que siempre llega alegre al laboratorio y quien en tan poco tiempo se ha ganado mi confianza y amistad. Tienes un angelote amigo y se que seguiremos en el camino apoyándonos.

A todos mis profesores y amigos que han compartido su conocimiento tiempo y dedicación para llegar a este punto.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que se han cruzado en mi camino y que ha contribuido en mi formación, así como al Instituto Politécnico Nacional y a la Universidad Nacional Autónoma de México mis dos grandes casas.

*Juan Manuel Gómez Cruz.*



# 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.

Juan Manuel Gómez Cruz. México, D.F., 2015



# Resumen

---

El fenómeno de Magnetoimpedancia Gigante (GMI), que se define como el cambio de la impedancia total en un material magnético conductor por el cual fluye una corriente  $I_{AC}$ , bajo la influencia de un campo magnético estático  $H_{DC}$ . Este fenómeno, presente en aleaciones magnéticas amorfas ultra suaves, es de gran interés por la posibilidad de desarrollar sensores de campo magnético que permitan medir campos magnéticos menores a  $1 \mu T$ .

En este trabajo se desarrolló un sensor de campo magnético en el orden de los micro Teslas, utilizando el fenómeno de GMI que ocurre en un hilo conductor ferromagnético amorfo ultra suave de FeCoSiB, el cual se emplea como elemento sensor. Para ello se parte de la instrumentación básica del fenómeno de GMI y se propone un esquema de sensado con equipos comerciales, posteriormente se sustituyen todos los elementos comerciales por un arreglo electrónico que permita la excitación del elemento sensor, así como el acondicionamiento, adquisición y procesamiento de la señal proveniente del hilo amorfo. Se propone además, el diseño de algunos porta muestras que contengan diferentes arreglos del elemento sensor con el propósito de mejorar la sensibilidad del prototipo inicial. Finalmente con el objetivo de calibrar el sensor se obtendrán las curvas de respuesta del sensor para diferentes valores de campos magnético.



# OBJETIVOS

---

## *Objetivo General*

- Instrumentación de un prototipo de sensor de campo magnético , mediante la técnica de magnetoimpedancia (MI), para establecer las limitantes y rangos de detección de campo magnético.

## *Objetivos Particulares*

- Diseñar un oscilador de onda senoidal para la distribución de la magnetización en el hilo amorfo a la frecuencia de mejor respuesta.
- Diseñar un sistema electrónico de adquisición y acondicionamiento de señal para la detección y procesamiento de la diferencia de potencial proveniente del hilo amorfo.
- Diseñar y caracterizar un elemento inductivo para generar campos magnéticos menores a  $1\mu T$ .
- Desarrollar un software que permita la interpretación de la señal proveniente del elemento sensor.
- Diseñar y caracterizar porta muestras con diferentes configuraciones de elementos sensores con la finalidad de mejorar la sensibilidad del sensor de campo magnético.
- Realizar pruebas experimentales para la calibración del sensor.

# Índice general

---

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVI
<b>1. Antecedentes</b>	<b>1</b>
1.1. Breve Historia del Magnetismo . . . . .	1
1.2. Principales conceptos del Magnetismo . . . . .	4
1.2.1. Momento Magnético Atómico . . . . .	4
1.2.2. Influencia de Campo magnético constante en Dirección de la magnetización . . . . .	8
1.3. Materiales Magnéticos . . . . .	8
1.3.1. Comportamiento magnético a escala macroscópica . . . . .	8
1.3.2. Procesos de Magnetización en materiales Ferromagnéticos (Histéresis magnética) . . . . .	9
1.3.3. Ferromagnéticos Suaves y Duros . . . . .	11
1.4. Sensores Magnéticos . . . . .	12
1.4.1. Clasificación de sensores magnéticos . . . . .	13
1.5. Magnetoimpedancia Gigante . . . . .	18
<b>2. Desarrollo del Sensor de Magnetoimpedancia</b>	<b>24</b>
2.1. Hilo ferromagnético amorfo . . . . .	24
2.1.1. Estructura amorfa . . . . .	24
2.2. Parámetros del hilo amorfo y respuesta en frecuencia para arreglos de uno y dos hilos . . . . .	26
2.2.1. Metodología . . . . .	30
2.2.1.1. Etapa de excitación. . . . .	30
2.2.1.2. Etapa de Acondicionamiento. . . . .	30
2.2.1.3. Etapa de Adquisición. . . . .	32
2.2.1.4. Etapa de Procesamiento. . . . .	32
2.3. Diseño Electrónico . . . . .	33
2.4. Desarrollo de Software . . . . .	35

<b>3. Análisis de Resultados</b>	<b>39</b>
3.1. Respuesta de Magnetoimpedancia de un Hilo amorfo . . . . .	39
3.2. Respuesta de Magnetoimpedancia de dos Hilos amorfos paralelos . . . . .	42
3.3. Respuesta del arreglo propuesto para el prototipo se sensor de campo magnético . . . . .	46
<b>4. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>50</b>
<b>A. Diseño del Oscilador Colpitts</b>	<b>53</b>
<b>B. Análisis de circuitos de acondicionamiento</b>	<b>55</b>
B.1. Amplificador Operacional no inversor . . . . .	55
B.2. Amplificador Operacional inversor . . . . .	56
B.3. Amplificador Operacional diferencial . . . . .	58
B.4. Amplificador Operacional integrador . . . . .	59
B.5. Características del equipo Agilent 4395A en modo Analizador de Impedancias (1) . . . . .	60
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>

# Índice de figuras

---

1.1. Patrón en una placa de óxido de hierro (a) ubicada a pie de una torre de línea transmisión (b), provocado por una corriente de rayo (2) . . . . .	2
1.2. Dispositivo magnético primitivo usado con fines espirituales (Geomancia y Feng Shui) en la antigua China (3). . . . .	2
1.3. Arreglo básico de efecto magneto-optico: (a) Faraday y (b) Kerr . . . . .	3
1.4. Estructura atómica del sodio, numero atómico 11, con sus respectivas capas cuánticas K, L y M. . . . .	5
1.5. Representación de los números cuánticos azimutales . . . . .	5
1.6. Momento magnético debido a una espira de corriente . . . . .	6
1.7. Momento magnético debido a un carga $q = -e$ que gira con respecto al centro a una distancia $e$ con una velocidad tangencial $v$ y una velocidad angular $\omega$ . $\mathbf{l}$ es la representación del momento angular clásico del electron on masa $m_e$ . (2) . . . . .	7
1.8. Precesión del momento magnético $\vec{m}$ debido a un campo $\vec{H}$ (2) . . . . .	9
1.9. Curva de histéresis ferromagnética . . . . .	10
1.10. lazos (4). . . . .	12
1.11. Rango de medición de diferentes tecnologías de sensores magnéticos (5) . . . . .	13
1.12. Sensor de densidad de flujo basado en un embobinado mas básico (6) . . . . .	15
1.13. Principio de operación del magnetómetro Fluxgate . . . . .	16
1.14. Efecto Hall (7) . . . . .	17
1.15. Circuito experimental para el efecto de Magneto-Impedancia . . . . .	19
1.16. Dependencia de la permeabilidad reversible ( $\mu_r$ ) y profundidad de penetración ( $\delta_m$ ) con respecto a un campo magnético aplicado ( $H_{dc}$ ) (8). . . . .	20
1.17. Circuito equivalente del hilo magnético conductor (9). . . . .	21
2.1. Estructura del $SiO_2$ como a) sólido cristalino o b) como solido amorfo, dependiendo se su enfriamiento. . . . .	25
2.2. Técnica de enfriamiento por rotación de agua (10). . . . .	26
2.3. (a) Gráfica de la permeabilidad en función de la frecuencia. (b) Gráfica de la curva de histéresis del hilo amorfo. . . . .	27
2.4. instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia. . . . .	27
2.5. Caracterización de las bobinas de Helmholtz para el campo externo $H_{DC}$ . . . . .	28

2.6. a) Línea de transmisión Microcinta. b) Transformación de cable coaxial a Microcinta. . . . .	28
2.7. Arreglo experimental para obtener la respuesta en magnetoimpedancia del hilo ferromagnético amorfo. a) Equipo analizador de redes Agilent modelo 4395A. b) Kit de calibración y análisis de impedancias 43961A. c) Bobinas de Helmholtz. d) control de todo el proceso mediante la computadora. . . . .	29
2.8. Diagrama a bloques general de la metodología del sensor. . . . .	31
2.9. Configuración de los módulos del microcontrolador <i>Freescale</i> MC9S08MM128. . . . .	32
2.10. a) Oscilador Colpitts. b) Señal del oscilador Colpitts. . . . .	33
2.11. Señal del oscilador amplificada que excita al hilo amorfo. . . . .	34
2.12. Señal del oscilador amplificada que excita al hilo amorfo. . . . .	34
2.13. acoplamiento y amplificación de la señal proveniente de los hilos ferromagnéticos. . . . .	35
2.14. Circuito rectificador de onda completa. . . . .	35
2.15. instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia. . . . .	36
2.16. instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia. . . . .	36
2.17. instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia. . . . .	37
2.18. Diseño de un solenoide. . . . .	37
2.19. Caracterización de la bobina de calibración. . . . .	38
3.1. Porta muestra para caracterización de un hilo amorfo. . . . .	39
3.2. Respuesta de en impedancia de un hilo. . . . .	40
3.3. Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia de un hilo. . . . .	41
3.4. Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia. . . . .	41
3.5. Porta muestra para caracterización de dos hilos amorfos. . . . .	42
3.6. Respuesta de la impedancia de dos hilos paralelos a diferentes frecuencias. . . . .	42
3.7. Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia del arreglo de dos hilos paralelos. . . . .	43
3.8. Curva de Magnetoimpedancia del arreglo de hilos paralelos a 16 MHz. . . . .	44
3.9. Ajuste lineal en la parte central de la curva de Magnetoimpedancia para una frecuencia de 16 MHz. . . . .	45
3.10. Arreglo experimental del prototipo de sensor de campo magnético. . . . .	46
3.11. Prueba con campo magnético mediante el solenoide del prototipo de sensor. . . . .	47
3.12. Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia. . . . .	47
3.13. Ajuste lineal de la medida 2. . . . .	48
3.14. Disposición de las muestras con respecto al arreglo de hilos ferromagnéticos de manera: a) transversal, b) longitudinal. . . . .	48
4.1. Muestra: a) Oro, b) Cobre, c) Níquel, d) vitrovac 6030, e) vitrovac 6025, f) vitrovac 6025 (197 nm), g) aleación CoSiBFeNbCu. . . . .	51
A.1. a) Etapa de amplificación. b) Circuito resonante (Tanque). . . . .	53
A.2. Esquema general de un circuito oscilador colpitts con transistor JFET. . . . .	54

B.1. Amplificador operacional en configuración no inversor. . . . .	55
B.2. Amplificador operacional en configuración inversor (11). . . . .	56
B.3. Amplificador operacional en configuración diferencial (11). . . . .	58
B.4. Amplificador operacional en configuración integrador (11). . . . .	59

## Índice de tablas

---

1.1. Clasificación de materiales magnéticos suaves . . . . .	11
1.2. Clasificación de materiales magnéticos Duros . . . . .	11
1.3. Línea de tiempo de efectos magnéticos (12) . . . . .	14
3.1. Respuesta de prototipo de sensor ante diferentes muestras magnéticas .	49

# Antecedentes

---

## 1.1. Breve Historia del Magnetismo

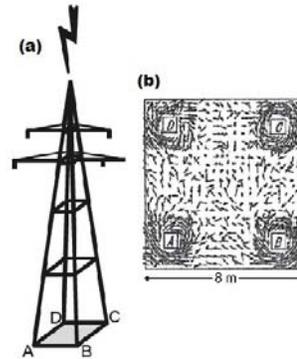
Desde el origen de los tiempos el magnetismo y los materiales magnéticos han sido un misterio, sin duda alguna los primeros fenómenos eléctricos y magnéticos se observaron antes de que la historia fuera escrita. De acuerdo con Plinio, “el viejo”, en su enciclopedia titulada *Historia Naturalis* (77-79 D.C.) el nombre “Imán” o “Magnet” en ingles viene de un pastor llamado Magnes quien encontró su bastón con punta de hierro pegada al suelo, sin embargo, parece mas probable que el nombre provenga de Magnetes, los habitantes de una ciudad llamada Magnesia ubicada en Asia menor (parte del imperio Griego) quienes tenían conocimiento del material en la zona, el cuál era naturalmente magnético. Actualmente se sabe que es la piedra imán (o lodestone <sup>1</sup> como se conoció a partir de 1500, nombre usado por su uso en la navegación). Hoy en día se sabe que aquella roca magnética es magnetita (Oxido de Hierro,  $Fe_3O_4$ ) la cual fue magnetizada en la naturaleza, ya sea por un proceso de enfriamiento de lava volcánica, Figura 1.1 (2, 3).

La primera declaración sobre el magnetismo *per se*, es atribuida a Tales de Mileto (alrededor de 654 a 546 A.C.), quien dijo que la piedra imán tenía la capacidad de atraer el hierro. Se cree que el primer prototipo de sensor magnético se desarrolló en china durante la dinastía Qin, el cual era básicamente una brújula que consistía en una magnetita tallada en forma de cuchara colocada en un plato de bronce, la cual por si sola, su parte mas delgada (mango de la cuchara), apuntaba al sur, Figura 1.2.

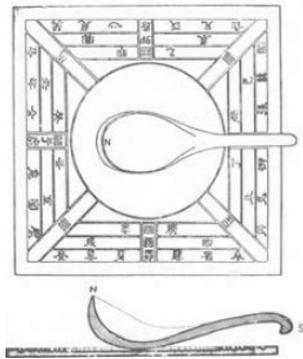
Posteriormente en 1064 Zheng Gongliang descubrió que el hierro podía adquirir una magnetización termoremanente cuando se enfriaba después de estar al rojo vivo. De esta manera se empezaron a utilizar las agujas metálicas como elemento sensor de campo magnético debido a su magnetización con el campo de la tierra, llevando a Shen Kua (1088) a la invención de la brújula para la navegación (3). Aun cuando China llevaba varios años utilizando las brújulas no fue hasta finales del siglo XII cuando llo

---

<sup>1</sup>Del antiguo ingles “load” ahora “lead”, que significa conducir



**Figura 1.1:** Patrón en una placa de óxido de hierro (a) ubicada a pie de una torre de línea transmisión (b), provocado por una corriente de rayo (2).



**Figura 1.2:** Dispositivo magnético primitivo usado con fines espirituales (Geomancia y Feng Shui) en la antigua China (3).

a Europa, lo que permitió grandes exploraciones y por lo tanto la expansión de este continente en todo el mundo.

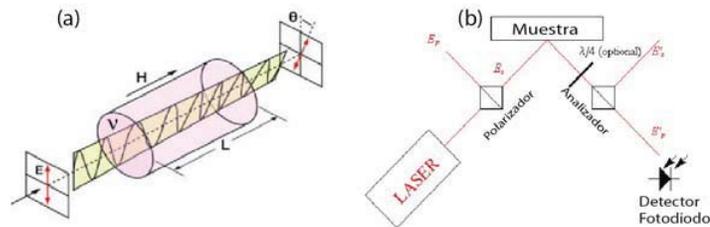
El primer tratamiento de manera académica se atribuye al Frances Peter Peregrinus en 1269 quien en una de sus cartas escribió todo lo que ya se sabía sobre la magnetita y además discutía cómo desarrollar instrumentos con ella, sin embargo tres siglos después William Gilbert (1540-1603) realizó un estudio formal y sistemático del magnetismo descrito en su tratado *De Magnete*, donde documentó la similitud entre las líneas de campo que rodean a una magnetita en forma de esfera y las líneas de campo que rodean a la tierra, concluyendo así que la tierra es un imán gigante. Además sugirió que los polos magnéticos no coinciden con los polos geográficos. Posteriormente en 1835 Carl Fredrich Gauss fue quien modeló a detalle las líneas de campo magnético de la tierra.

<sup>1</sup>(2, 13)

Antes de 1819 el único tipo de magnetismo y fuente de campo magnético conocido y estudiado era el producido por la magnetita o el observado en el hierro magnetizado como elemento sensor en las brújulas.

En 1819 Hans Christian Oersted (1777-1851) observó que un alambre por el cual circula una corriente eléctrica es capaz de producir un campo circunferencial capaz de deflectar la aguja de una brújula. Un año después Jean-Baptiste Biot (1774-1862) y Felix Savart (1791-1841) dedujeron que se generaba campo magnético alrededor de un hilo con una corriente circulando por este. Al mismo tiempo (1820-1825) Andre Marie Ampère (1775 1836) estudió la interacción magnética y eléctrica entre dos hilos con corriente circulando a través de ellos.

El electromagnetismo clásico alcanzó su punto más alto de estudio en el siglo XIX con el trabajo de los físicos Michael Faraday (1791-1867) y James Clerk Maxwell (1831-1879). En 1831 Faraday descubrió la inducción electromagnética y en 1845 descubrió que existía una conexión directa entre el magnetismo y la luz, llamado efecto magneto-optico Faraday, Figura 1.3 (a), el cual consiste en un cambio de polarización de la luz, cuando ésta atraviesa un campo magnético. Este mismo efecto fue descubierto en 1876 por el físico escocés John Kerr (1824-1907) a diferencia que el cambio de polarización se observa cuando la luz es reflejada en un material magnético, a lo que se le llamó efecto magneto-optico Kerr, Figura 1.3 (b) (2, 14).



**Figura 1.3:** Arreglo básico de efecto magneto-optico: (a) Faraday y (b) Kerr

Todos estos experimentos inspiraron a James Clerk Maxwell en 1864 para desarrollar una teoría, la cual fue verificada experimentalmente por Heinrich Hertz (1857-1894), que unifica todos los conocimientos hasta esa fecha sobre la luz, electricidad y magnetismo, que se redujo en lo que ahora conocemos como las cuatro ecuaciones de Maxwell (3). El siglo XIX concluye con los trabajos y experimentos de Pieter Zeeman (1865-1943) el cual descubrió que al aplicar un campo magnético a un gas, éste sufría un desdoblamiento de sus niveles energéticos.

<sup>1</sup>Hecho que explicó las observaciones previas de navegantes como Cristobal Colon quien notó discrepancias entre su ubicación debido a la posición de las estrellas y lo que la aguja de la brújula mostraba

Sin embargo el magnetismo intrínseco a los materiales se comenzó a estudiar en el siglo XX. En 1907 Pierre Weiss (1865-1940) introdujo la teoría de ferromagnetismo basada en un concepto de campo molecular. Su teoría combinada con la de Paul Langevin (1872-1946), explicó la transición ferromagnética-paramagnética y su dependencia con la temperatura, observada por Pierre Curie (1859-1906) con lo que se conoce como temperatura de Curie. Weiss también postuló la existencia de dominios magnéticos para explicar cómo un material podía ser magnetizado y sin embargo poseer una magnetización neta cero, las propiedades de paredes de dominios magnéticos fueron estudiados a detalle por André Bloch (1893-1948), Lev Landau (1908-1968) y Louis Néel (1904-2000). En 1913 Niels Bohr (1885-1962) publicó su primer postulado en el cual dedujo que el momento angular de los electrones debía estar cuantizado y que los momentos magnéticos orbitales están asociados con corrientes generadas por los electrones. Tiempo después Otto Stern (1888-1969) y Walther Gerlach (1889-1979) realizaron un experimento donde observaron que al aplicar un campo magnético a un haz de átomos de plata, éstos sufrían una desviación en su trayectoria dependiente de la intensidad del campo magnético, debido a un cambio en la orientación del espín intrínseco del electrón, introduciendo así la teoría del magnetismo moderno.(2, 15).

## 1.2. Principales conceptos del Magnetismo

### 1.2.1. Momento Magnético Atómico

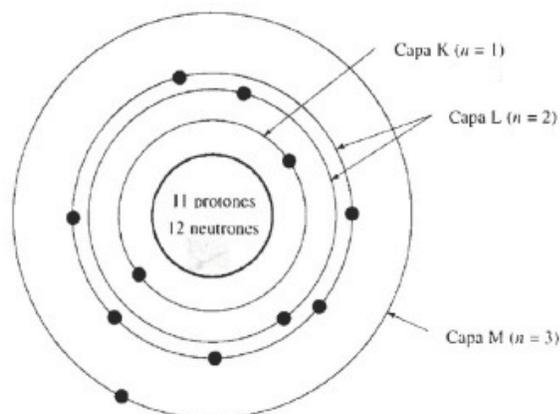
En la teoría cuántica todo sistema físico puede ser representado por un estado cuántico al que se le asocia una función de onda que satisface a la ecuación de *Schrödinger* en la teoría atómica, dicha solución representa la cuantización del momento angular orbital de los electrones. Esta cuantización es importante ya que significa que los momentos dipolares atómicos están restringidos a ciertos valores y ciertas orientaciones con respecto a un campo externo (16, 17).

Cada electrón en un átomo se encuentra caracterizado por cuatro parámetros llamados números cuánticos, en otras palabras, los números cuánticos indican la posición y energía de los electrones en un átomo.

El número cuántico principal  $n$  indica la capa cuántica a la cual pertenece el electrón.  $n$  puede tomar valores enteros del 1 al 7, además a las capas cuánticas también se les asigna una letra, es decir a  $n=1$  se le llama K, a  $n=2$  es L,  $n=3$  es M, y así sucesivamente, Figura 1.4.

El número cuántico secundario o azimutal  $\ell$  describe la forma del orbital, determinando el número de niveles de energía en cada capa cuántica y en donde se encuentra el electrón. los números cuánticos azimutales, Figura 1.5, se simbolizan por letras minúscula de la siguiente manera:

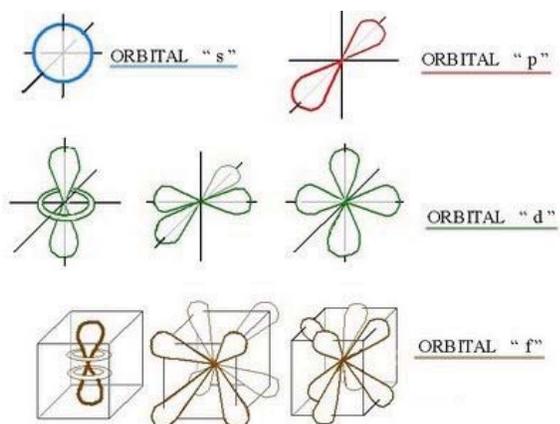
- s para  $\ell=0$



**Figura 1.4:** Estructura atómica del sodio, número atómico 11, con sus respectivas capas cuánticas K, L y M.

- p para  $\ell=1$
- d para  $\ell=2$
- f para  $\ell=3$

El número cuántico magnético  $m_l$ , indica el número de niveles de energía u orbitales para cada número cuántico azimutal. El número total está determinado por la expresión:  $m_l = 2\ell + 1$ .



**Figura 1.5:** Representación de los números cuánticos azimutales .

Los números cuánticos de espín  $m_s$ , describen la orientación del giro del electrón

alrededor de su propio eje a medida que se mueve rodeando al núcleo. Se basa en el principio de exclusión de Paulí, el cual establece que no puede haber mas de dos electrones con giros propios opuestos en cada electrón. Y se le asignan valores de  $+\frac{1}{2}$  y  $-\frac{1}{2}$  (18).

El magnetismo de un material se origina por la presencia de una unidad fundamental que se denomina momento magnético y su descripción esta dada por los números cuánticos  $\ell$  y  $m_s$ . El momento magnético es intrínseco al movimiento que describen los electrones en el átomo (17).

En el electromagnetismo clásico, el momento magnético  $\vec{m}$  puede explicarse simulando una corriente  $I$  que fluye en una espira cerrada con un área  $d\vec{S}$  (la dirección del vector depende de la dirección de la corriente y está regida por la regla de la mano derecha), Figura 1.6, de esta manera el momento magnético esta dado por la ecuación 1.1, donde  $d\vec{m}$  tiene una dirección normal al plano de la espira de corriente y por lo tanto puede ser paralela o anti paralela al vector asociado al momento angular (2, 9, 19).

$$d\vec{m} = I d\vec{S} \quad (1.1)$$

De esta manera el momento magnético total  $\vec{m}$  de un material se puede considerar la suma de todas las espiras de corriente (generadas por el movimiento de cada electrón), ecuación 1.2.

$$\vec{m} = \int d\vec{m} = I \int d\vec{S} \quad (1.2)$$

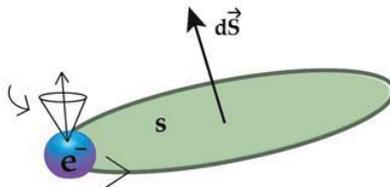


Figura 1.6: Momento magnético debido a una espira de corriente

En términos del electrón se puede partir de la ecuación 1.1, sabiendo que la magnitud de la corriente está dada por:  $I = q(\omega/2\pi)$ , donde  $\omega$  es la frecuencia angular con la cual la carga  $q$  se mueve alrededor de la espira de corriente, además el área de la espira esta descrita por:  $S = r^2\pi$ , la magnetización resultante es:(2)

$$\vec{m} = \frac{qr^2\vec{\omega}}{2} \quad (1.3)$$

Definiendo  $v = (\vec{\omega} \times \vec{r})$ , el momento magnético resulta:

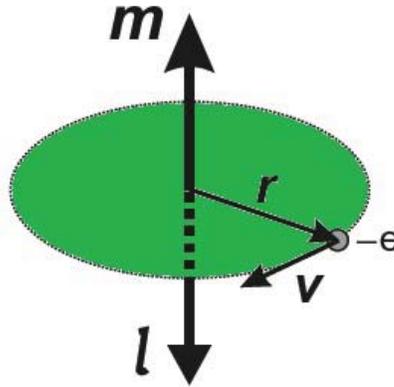
$$\vec{m} = -\frac{e}{2}(\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (1.4)$$

Se observa que el momento magnético, ecuación, 1.4 es similar al momento angular  $l$  de un electron que orbita con una masa  $m_e$ <sup>1</sup>:

$$\vec{l} = m_e(\vec{\omega} \times \vec{r}) = m_e r^2 \vec{\omega} \quad (1.5)$$

Combinando 1.4 y 1.5, se obtiene una expresión para el momento magnético  $\vec{m}$  del electrón en términos del momento angular  $\vec{l}$

$$\vec{m} = -\frac{e}{2m_e} \vec{l} \quad (1.6)$$



**Figura 1.7:** Momento magnético debido a un carga  $q = -e$  que gira con respecto al centro a una distancia  $e$  con una velocidad tangencial  $v$  y una velocidad angular  $\omega$ .  $l$  es la representación del momento angular clásico del electron on masa  $m_e$ . (2)

Por otro lado, desde un punto de vista cuántico, cada electrón dentro de un átomo posee un momento angular que se debe a la superposición del momento angular orbital  $(\vec{L})^2$  y el momento angular intrínseco del electrón o momento angular de espín  $(\vec{S})^3$ , por lo tanto el momento magnético se expresa de la siguiente manera: (2, 9, 17, 20)

$$\vec{m}_L = -\beta \vec{L}, \quad \vec{m}_S = -2\beta \vec{S}, \quad (1.7)$$

El momento magnético total es entonces:

$$\vec{m} = -\beta \vec{L} + 2\beta \vec{S} \quad (1.8)$$

Donde  $\beta$  corresponde al Magneton Bohr<sup>4</sup> (17, 21):

<sup>1</sup> $m_e = 9.109 \times 10^{-31} kg$

<sup>2</sup>La magnitud del momento angular orbital es  $|\vec{L}| = \sqrt{l(l+1)}\hbar$

<sup>3</sup>La magnitud del momento angular espín es  $|\vec{S}| = \sqrt{s(s+1)}\hbar$

<sup>4</sup> $\beta = 0.9273 \times 10^{-20} \frac{erg}{oersted}$

$$\beta = \frac{e\mu_0\hbar}{2m_e} \quad (1.9)$$

### 1.2.2. Influencia de Campo magnético constante en Dirección de la magnetización

El momento magnético tiende a alinearse en la dirección del campo magnético externo  $\vec{H}$  aplicado con el fin de lograr un estado de mínima energía, esta fuerza (Torque o par de torsión) que experimenta el momento magnético para rotar se expresa mediante la siguiente ecuación (2, 9):

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{H} \quad (1.10)$$

De la física clásica a partir del momento angular  $\vec{L}$  se puede llegar al par de torsión mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{H} \quad (1.11)$$

La relación entre el momento magnético  $\vec{m}$  y el momento angular  $\vec{L}$  se escribe en términos de la razón giromagnética ( $\gamma$ ), de manera que si sustituimos  $\vec{m} = \gamma\vec{L}$  en 1.11 se obtiene la ecuación de movimiento del momento magnético  $\vec{m}$  en un campo magnético  $\vec{H}$  (2):

$$\frac{d\vec{m}}{dt} = \vec{\tau}[\vec{m} \times \vec{H}] = \gamma\vec{\tau} \quad (1.12)$$

Donde:  $\gamma = \frac{gg\mu_0}{2m_e}$ , siendo  $g$  el factor giromagnético.

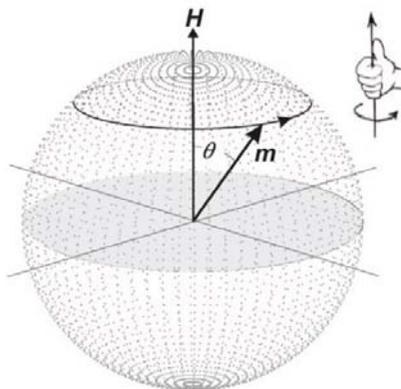
En otras palabras, el momento magnético  $\vec{m}$  *precesa* alrededor del campo  $\vec{H}$  a una frecuencia angular que se conoce como frecuencia de precesión o *Frecuencia de Larmor*

$$\omega = \gamma\vec{H} \quad (1.13)$$

## 1.3. Materiales Magnéticos

### 1.3.1. Comportamiento magnético a escala macroscópica

Anteriormente se estudio el fenómeno magnético desde un punto de vista microscópico, sin embargo un sólido magnético cuenta con un gran número de átomos con momentos magnéticos individuales. Cuando un campo magnético  $\vec{H}$  se aplica al material la respuesta del material se conoce como inducción magnética  $\vec{B}$ . La relación entre B y H es una propiedad de los materiales y su ecuación (en SI) está dada por:



**Figura 1.8:** Precesión del momento magnético  $\vec{m}$  debido a un campo  $\vec{H}$  (2)

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1.14)$$

Donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$  es la permeabilidad en el vacío.  $M^1$  es la magnetización del medio y se define como el momento magnético por unidad de volumen:

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V} \left[ \frac{\text{emu}}{\text{cm}^3} \right] \quad (1.15)$$

$\vec{M}$  puede también relacionarse con  $\vec{H}$  mediante la susceptibilidad magnética  $\chi$ ,  $\vec{M} = \chi \vec{H}$ , sustituyendo en 1.14:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H} \quad (1.16)$$

Donde  $\mu_r = 1 + \chi$  se conoce como la permeabilidad relativa del material.

### 1.3.2. Procesos de Magnetización en materiales Ferromagnéticos (Histéresis magnética)

Por definición, histéresis significa inercia o retraso, en el caso de los materiales magnéticos, la histéresis se relaciona con la falta de trazabilidad de la curva de magnetización y se utiliza como técnica de caracterización para estos materiales. Las curvas de histéresis magnética se determinan mediante la aplicación de un campo magnético a un material para observar la dinámica de magnetización de los dominios magnéticos, donde se observan interacciones distintas a bajo campo, medio y alto.

El comportamiento de un material magnético se determina por la curva de histéresis, figura 1.9, al aplicar un campo  $H_{DC}$ , algunos dominios magnéticos se reorientan y

<sup>1</sup>  $\vec{M}$  es una propiedad del material que depende tanto de momentos magnéticos individuales como de la interacción con otros

presentan el abombamiento de pared, el cual es un proceso reversible (ya que al quitar el estímulo de campo magnético el material regresa a su estado inicial). En la figura 1.9(a) se observa dicho proceso, cuando se incrementa la magnitud del campo magnético un número mayor de dominios se alinea al campo, y existe un crecimiento de éstos haciendo que las paredes de domino se desplacen de su posición original, proceso que deja de ser reversible (1.9(b)); sin embargo al incrementar aún más el campo magnético externo, el material termina por reorientar todos los momentos magnéticos para finalmente tener solo una rotación de espín. El punto en el cual la magnetización alcanza el valor máximo se conoce como saturación (1.9 (c)).

Al alcanzar la saturación, se retira el campo magnético de la muestra, la curva de respuesta del material comienza a formar una trayectoria del punto (c) al (d), donde se tiene una magnetización remanente ( $M_r$ ), en cuyo caso al querer llevar la magnetización a cero, se debe aplicar un campo magnético de magnitud opuesta al aplicado inicialmente, y la trayectoria cambia del punto (d) al (e), El campo necesario para lograr una magnetización igual a cero ( $M = 0$ ) se conoce como campo coercitivo ( $H_c$ )

llegar a cero la magnetización se denomina campo remanente ( $H_c$ ). En este punto, al incrementar el campo magnético se llega de nuevo al campo de saturación (trayectoria (e) a (f)).

De igual forma, se vuelve a retirar el campo magnético de la muestra y se forma una trayectoria que lleva al campo de remanencia ((f) a (g)), con la misma magnitud que la remanencia alcanzada anteriormente sin embargo, con signo contrario ya que se aplicó un campo magnético externo en sentido opuesto al original, el punto (h) de la figura 1.9, se alcanza aplicando de nuevo un campo magnético externo igual al originalmente aplicado (22).

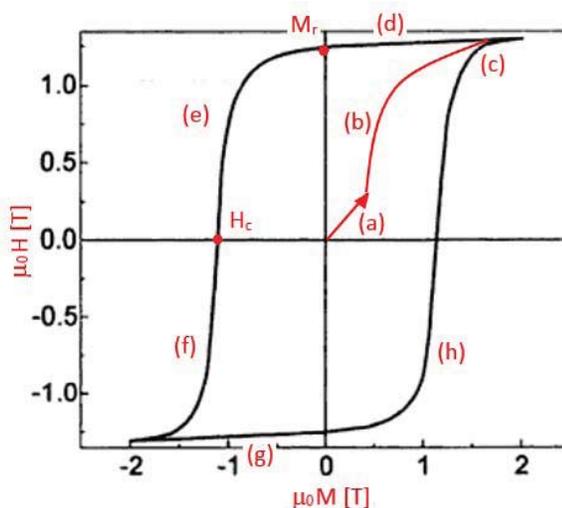


Figura 1.9: Curva de histéresis ferromagnética

### 1.3.3. Ferromagnéticos Suaves y Duros

Casi todos los sensores de campo magnético requieren de materiales magnéticos como elemento sensor activo o pasivo, los cuales determinan la construcción del arreglo experimental, fenómeno de sensado, sensibilidad, entre otros. Estos materiales se clasifican de acuerdo al sistema de la **IEC** en materiales suaves y duros como se muestra en las tablas 1.1 y 1.2 (12).

**Tabla 1.1:** Clasificación de materiales magnéticos suaves

GRUPO	CÓDIGO	MATERIAL
METALES CRISTALINOS	A	Hierro
	B	Acero suave bajo en carbon
	C	Acero al silicio (3 % Si)
	D	Otros aceros
	E	Aleaciones Niquel-Hierro
	F	Aleaciones Hierro-Cobalto
	G	Otras aleaciones (ej. AlSiFe)
ÓXIDOS	H	Ferritas suaves (ej. NiZn o MnZn)
METALES AMORFOS	I	Aleaciones amorfas (aleaciones ricas en Cobalto (Co) o Hierro (Fe))
COMPÓSITO DE POLVO DE METAL	-	Basadas en Fe

**Tabla 1.2:** Clasificación de materiales magnéticos Duros

GRUPO	CÓDIGO	MATERIAL
METALES CRISTALINOS	R1	Aleaciones de AlNiCo
	R2	Aleaciones Platino-Cobalto
	R3	Aleaciones Hierro-Cobalto-Vanadio (Cromo)
	R6	Aleaciones Cromo-Hierro Cobalto
	R5	Aleaciones tierras raras-Cobalto
	R7	Otros materiales magnéticos duros
	ÓXIDOS	S1
METALES AMORFOS	-	Aleaciones tierras raras-Hierro
	T	Otros materiales magnéticos duros

Los ciclos de histéresis varían en cada material, por ejemplo, en un material ferromagnético duro el campo coercitivo es mayor que en un ferromagnético semi-suave o suave, lo cual se refleja en una curva de histéresis más grande, mientras que las curvas que son pequeñas o más alargadas se relacionan con los materiales magnéticos más suaves, figura 1.10.

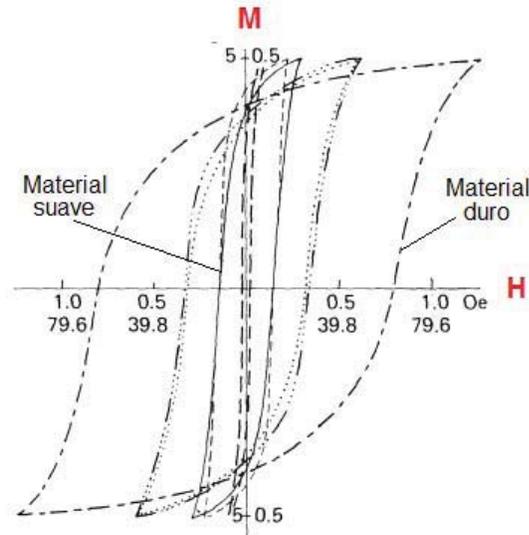


Figura 1.10: lazos (4).

## 1.4. Sensores Magnéticos

Existe una gran cantidad de sensores, los cuales se encuentran en la mayoría de los equipos que utilizamos día a día y que además nos hacen la vida mucho más fácil y cómoda. Por lo tanto al menos una vez hemos escuchado los términos: transductor, sensor y actuador, sin embargo es común confundirlos ya que la diferencia entre ellos es muy pequeña.

Un transductor es un dispositivo que es capaz de convertir un tipo de energía en otra, cuando un transductor convierte una cantidad física medible en un voltaje o corriente, este se conoce como sensor. Finalmente el dispositivo opuesto al sensor se conoce como actuador el cual convierte una señal eléctrica en otra energía, usualmente mecánica (23). En específico los sensores magnéticos tienen un amplio espectro de usos, desde un detector de presencia para una ventana, pasando por la medición de velocidad en un automóvil o incluso para la detección de campos biológicos. Sin embargo a lo largo de los años la investigación ha proporcionado distintas herramientas para crear

sensores de campo magnético, clasificando dichos sensores por su principio físico (o efecto magnético), que los riga o por su rango de detección .

La tabla 1.3 muestra un breve resumen histórico de la evolución de los sensores gracias a los diferentes descubrimientos y avances tecnológicos de nuevos fenómenos físicos y efectos magnéticos. Algunos de estos efectos aun están siendo estudiados y explotados por lo que es muy pronto para el desarrollo de su sensor.

### 1.4.1. Clasificación de sensores magnéticos

Usualmente la fuerza de inducción magnética  $\mathbf{B}$  que actúa sobre los portadores de carga, son los que determinan la respuesta de los sensores magnéticos. El campo aplicado  $\mathbf{H}$  está relacionado con la inducción magnética ( $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ ), por lo que es preferible el uso de materiales con altos valores de permeabilidad  $\mu$  para obtenerla mejor respuesta posible. Con base en lo anterior, la figura 1.11 despliega algunos de los sensores mas utilizados y su rango de medición (9).

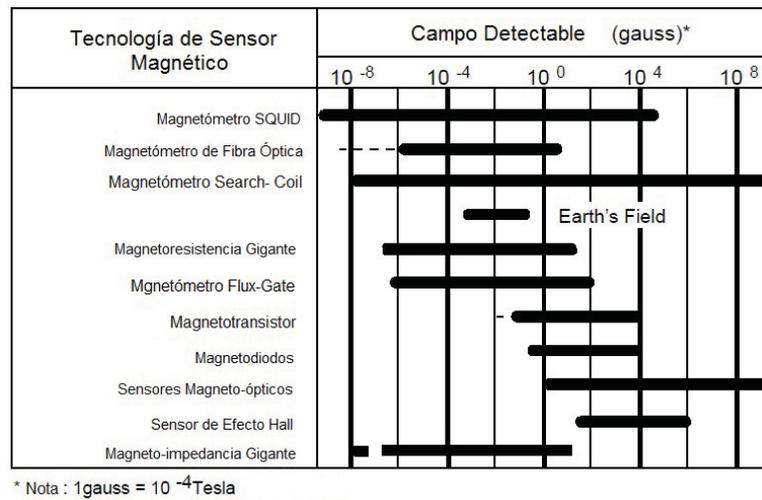


Figura 1.11: Rango de medición de diferentes tecnologías de sensores magnéticos (5)

#### *Magnetómetro Search-Coil*

El principio que riga el magnetómetro search-coil es el principio de inducción de Faraday<sup>1</sup> ( $\xi = -d\Phi_B/dt$ ). Con base en lo anterior se sabe que el flujo en una bobina

<sup>1</sup>La ley de inducción de Faraday establece que la fuerza electromotriz inducida ( $\xi$ ) en un circuito es igual al valor negativo de la rapidez con la que cambia el flujo magnético que atraviesa el circuito

**Tabla 1.3:** Línea de tiempo de efectos magnéticos (12)

<i>Año</i>	<i>Efecto</i>	<i>Explicación</i>	<i>Uso</i>
1842	Efecto Joule	Cambio en la forma del ferromagnético debido a la magnetización (Magnetorstricción).	Magnetómetros y potenciómetros.
1847	Efecto Matteucci	Torsión de una varilla ferromagnética debido a cambios en la magnetización longitudinal.	Sensor magnetoelástico.
1856	Magneto resistencia	Cambio en la resistencia con un campo magnético aplicado	Sensor magnetoresistivo.
1858	Efecto Wiedemann	Se produce una torsión en una varilla ferromagnética con corriente, ante un campo aplicado longitudinalmente.	Medición de toque y fuerza.
1865	Efecto Villari	Efecto sobre la magnetización por la tracción o resistencia a la compresión	Sensor Magnetoelástico.
1879	Efecto Hall	una placa con un flujo de corriente definido modifica su trayectoria cuando de manera normal se aplica un campo magnético	Sensor de efecto hall como medidores de campo o como interruptores.
1903	Efecto Skin	Desplazamiento de la corriente del interior del material a la superficie debido a corriente eddy.	Sensores de distancia o proximidad.
1931	Efecto Sixtus Tonks	Magnetización pulsada por brincos de Barkhausen	Wiegand y sensores mediante hilos pulsados
1962	Efecto Josephson	efecto tunel entre dos materiales superconductores con una distancia de separación extremadamente pequeña (efecto cuántico).	Magnetómetro SQUID
1994	Magneto impedancia gigante	Cambio de la impedancia en un conductor ferromagnético	Sensado de campos de muy baja intensidad
1996	Magneto-electricidad	Compósitos de una fase ferroeléctrica y una ferromagnética que cambia su polarización o magnetización dependiendo de la aplicación de un campo magnético o uno eléctrico.	Optimización de almacenamiento de información
2006	Transferencia de torque de espín	Una corriente con espín polarizado cambia su magnetización dependiendo de las características del medio al que se transfiere	Transporte de información

cambiará si ésta se encuentra en presencia de un campo magnético externo (ya sea un campo magnético directo, alterno). La construcción mas típica consta de una bobina en la cual se introduce en el centro una varilla de material ferromagnético con el fin de aumentar la permeabilidad del elemento sensor y por lo tanto la densidad de flujo que se ve reflejado en un aumento en el voltaje medido en las terminales de la bobina. Por lo tanto la sensibilidad de este tipo de sensores depende principalmente de la permeabilidad del núcleo de la bobina y el numero de vueltas. Estos sensores cubren un amplio rango de medición de campo magnético dependiendo su construcción, son de bajo costo y de fácil manufactura (5, 6, 24).



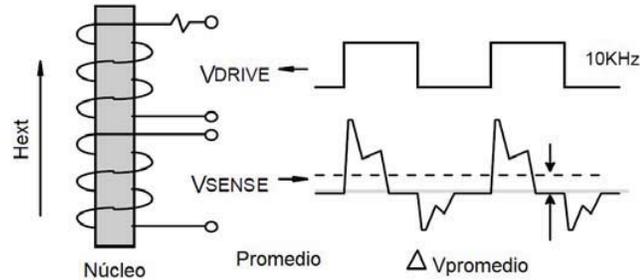
**Figura 1.12:** Sensor de densidad de flujo basado en un embobinado mas básico (6)

#### *Magnetómetro Fluxgate*

Aun cuando este tipo de sensor es utilizado desde 1936 (inventado por Aschenbrenner y Goubau), en la actualidad su uso sigue siendo muy común por sus amplias ventajas como es su alta sensibilidad y su funcionamiento a bajas frecuencias. El principio de operación del magnetómetro Fluxgate, consiste en un material ferromagnético con alta permeabilidad en el cual se disponen dos embobinados, uno de excitación (Drive) y otro de sentido (sense), figura 1.13. La inducción magnética del núcleo cambia en presencia de un campo magnético externo. La señal de excitación se aplica en la bobina primaria con una frecuencia  $f$  provocando que la magnetización del núcleo oscile en sus puntos de saturación. En ausencia de campo externo los campos generados se cancelan y no hay cambio neto de flujo en el sentido de bobinado, y por lo tanto no hay tensión inducida. Cuando hay un campo externo en una dirección definida, este va a favorecer la magnetización de uno de los embobinados por lo que los campos no se anulan provocando así un cambio neto en el flujo magnético y por lo tanto según la ley de Faraday un cambio en el voltaje en la bobina secundaria (5, 6, 24).

#### *Magnetómetro SQUID*

El magnetómetro SQUID (siglas del ingles, Superconducting Quantum Interference Device), es el dispositivo mas sensible de medición de campo magnético disponible en el mercado. Fue desarrollado con base en el trabajo de Brian J. Josephson (1962), quien desarrollo una unión de contacto (la cual lleva su nombre) capaz de medir corriente



**Figura 1.13:** Principio de operación del magnetómetro Fluxgate

extremadamente bajas. Su principio de funcionamiento se basa en la interacción de corrientes eléctricas y campos magnéticos observados en materiales que son llevados a temperaturas extremadamente bajas, es decir a una temperatura de transición superconductor. a esta temperatura el material se comporta como un superconductor y pierde toda resistencia al flujo de corriente eléctrica. El magnetómetro SQUID tiene la capacidad de medir campo desde el orden de los fempto-Teslas (fT), hasta las unidades de Teslas. La mayor dificultad que presenta este magnetómetro es la necesidad de enfriar el instrumento con Helio Líquido (aproximadamente a 4K), además de su tamaño, lo que le impide ser portable (25? ).

### ***Sensor de efecto Hall***

El sensor de efecto Hall es probablemente el sensor de campo magnético más utilizado, ya que su uso no solo se limita a la medición de la magnitud de campo magnético, además son utilizados como elementos clave en sensores de posición sin contacto, como interruptor, para medición de velocidad, o incluso de corriente eléctrica. Debido a de su simplicidad y bajo costo, este tipo de sensor se ha convertido en el preferido de los sensores magnéticos por su compatibilidad con circuitos microelectrónicos (26). El principio de funcionamiento de este tipo de sensor se basa en el fenómeno que lleva el mismo nombre (efecto Hall), el cual consiste en la interacción de electrones en movimiento con un campo magnético externo. Cuando un electrón se mueve a través de un campo magnético, este ejerce una fuerza que desvía su trayectoria de manera lateral  $\vec{F} = q\vec{v}\vec{B}$ , donde  $q$  es la carga del electrón ( $q = 1.6 \times 10^{-19}C$ ),  $\vec{v}$  es la velocidad del electrón y  $\vec{B}$  es el campo magnético.

Asumiendo una placa conductora, Figura 1.14, por la cual fluye una corriente de manera longitudinal y se le aplica un campo magnético transversal, este deflecta el flujo de corriente moviendo los electrones a un costado de la placa, el cual se traduce en una diferencia de potencial que es detectada mediante unos contactos colocados de manera transversal a la muestra. Esta diferencia de potencial se conoce como voltaje transversal Hall ( $V_H$ ) (7).

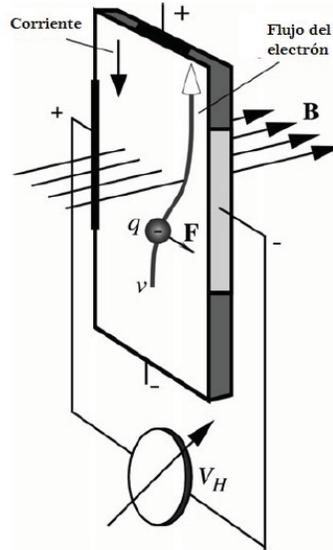


Figura 1.14: Efecto Hall (7)

### *Sensores magneto-ópticos*

La luz como onda electromagnética tiene la capacidad de interactuar ya sea con el campo eléctrico o con el campo magnético, lo que da paso a diversos efectos magneto-eléctricos y magneto-ópticos y por lo tanto a una variedad de herramientas ópticas para el diseño de sensores magnéticos. Los principios de operación de los sensores magneto-ópticos se basan en el efecto Faraday, Cotton-Mouton, Voigt, y/o efecto Kerr. Estos efectos describen el cambio en la rotación del plano de polarización de la luz linealmente polarizada y las variaciones en la elipticidad del haz reflejado o transmitido cuando interactúa con una muestra magnética (?).

### *Sensores de Magnetorresistencia*

El efecto de magnetorresistencia (cambio de la resistencia eléctrica de un material bajo el efecto de la aplicación de un campo magnético externo) fue descubierto desde el año de 1857, sin embargo, fue hace apenas 30 años que comenzó a cobrar importancia en la implementación de sensores con un fenómeno en particular llamado AMR - Magnetorresistencia Anisotrópica (*Anisotropic Magnetoresistance*), el cual es ampliamente utilizado en las cabezas magnéticas lectoras de discos duros (2).

El efecto AMR es la variación de la resistencia en función del ángulo entre la corriente aplicada a la muestra y el campo magnético externo, se ha aplicado principalmente con permalloy <sup>1</sup>, cuyo principio básico consiste en una línea delgada de Permalloy

<sup>1</sup>Permalloy se refiere a una aleación compuesta por Níquel (Ni) y Hierro (Fe), posee alta permeabilidad magnética, baja conductividad y presenta efecto AMR, se desarrolló en los laboratorios Bell

depositada en un sustrato mediante la técnica de *sputtering*, misma que al ser depositada, se somete a un campo magnético longitudinalmente, hecho que causa un efecto de anisotropía uniaxial, cuyo eje de fácil magnetización coincide con la dirección de campo magnético externo aplicado. De esta manera se tiene un control de cambio al ser aplicado un campo magnético para sensarlo.

En el caso de los lectores de discos magnéticos también son un ejemplo de sensores de MR, ya que la información se almacena en el disco como un imán con determinada orientación y magnetización, misma que con la cabeza lectora, que consiste en una tricapa magnética, se puede obtener el valor de la resistencia eléctrica en cada punto donde se almacena información y posteriormente decodificarla (27).

Existen muchas implementaciones de los sensores de MR, como escáneres, medidores de servicios de gas, detectores de humo, controles de acceso en edificios inteligentes, equipos médicos, bombas de infusión, camas de hospital, detección de puertas abiertas en electrodomésticos, como medidores de fluidos, entre muchas otras aplicaciones (28).

## 1.5. Magnetoimpedancia Gigante

La Magneto-Resistencia gigante (GMR, por sus siglas en ingles), descubierta entre los años 1988 y 1992 fue el fenómeno que dio paso al descubrimiento de la Magneto-Impedancia Gigante. En el intensivo estudio por entender y explotar la GMR, se realizaron pruebas en diferentes materiales y aleaciones con distintas geometrías bajo la excitación de una corriente alterna, descubriendo que principalmente en cintas e hilos de estructura amorfa, la respuesta ante campos magnéticos externos se magnificaba al menos dos ordenes de magnitud mayor que los sistemas que habían sido observados previamente, lo que provoco que los investigadores en magnetismo de esa época centraran toda su atención en estos materiales (Panina and Mohri, 1994; Beach and Berkowicz, 1994; Machado et al., 1995; Ciureanu et al., 1996) para explicar el fenómeno que posteriormente llamaron Magneto-Impedancia Gigante (29, 30).

La Magneto-Impedancia Gigante se define como el cambio en la impedancia total  $\mathbf{Z}$  de un conductor magnético por el cual circula una corriente alterna  $I = I_0 e^{j\omega t}$  (generando un campo magnético transversal a la muestra) bajo la influencia de un campo magnético estático  $H_{DC}$ . Dicho cambio en impedancia puede ser cuantificado mediante la siguiente ecuación: (9, 31).

$$\frac{\Delta Z}{Z} (\%) = \frac{[Z(H_{DC}) - Z(H_{DC})_{max}]}{Z(H_{DC})_{max}} \times 100 (\%) \quad (1.17)$$

Donde  $(H_{DC})_{max}$  es un campo de referencia que comúnmente es el valor del campo magnético externo capaz de saturar la muestra. La GMI tiene una fuerte dependencia con respecto a la frecuencia de excitación en un conductor magnético ultra suave bajo

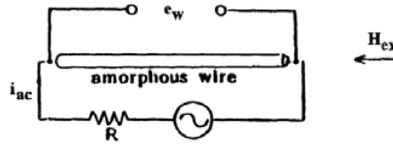
---

aproximadamente en 1914 por Ggustav Elmen (Ingeniero eléctrico y metalúrgico Sueco 1876 - 1957)

la influencia de un campo aplicado, y además puede ser explicado mediante la electrodinámica clásica. La impedancia compleja,  $Z = R + j\omega L$  (Donde  $R$  es la resistencia,  $L$  la inductancia y  $\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia), en un conductor ferromagnético se puede relacionar mediante el cociente:(8, 30).

$$Z = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} \quad (1.18)$$

Siendo,  $I_{ac}$  la amplitud de la señal senoidal de la corriente  $I = I_{ac}e^{j\omega t}$  y  $V_{ac}$  el voltaje medido en los extremos del conductor, para este trabajo se utilizó un hilo conductor ferromagnético ultra suave de estructura amorfa de una aleación rica en cobalto (Co), Figura 1.15.



**Figura 1.15:** Circuito experimental para el efecto de Magneto-Impedancia

Para el caso específico de un conductor ferromagnético de longitud  $l$  y sección transversal  $q$ , la impedancia puede ser expresada partiendo de la ecuación 1.19 mediante la ecuación 1.19

$$Z = \frac{lE_z(S)}{q\langle j_z \rangle_q} = R_{dc} \frac{j_z(S)}{\langle j_z \rangle_q} \quad (1.19)$$

Donde  $E_z$  y  $j_z$  son las componentes longitudinales del campo eléctrico y densidad de corriente respectivamente,  $R_{dc}$  es la resistencia eléctrica,  $S$  es el valor de la superficie y  $\langle j_z \rangle_q$  es el valor promedio de la densidad de corriente longitudinal en la sección transversal  $q$  (8, 17).

De la ecuación 1.19 se observa que la impedancia<sup>1</sup> se puede ver como el cociente de la densidad de corriente superficial y la densidad de corriente transversal. Formalmente, la densidad de corriente del conductor magnético se puede obtener resolviendo de manera simultánea la ecuación reducida de Maxwell y la ecuación de movimiento de Landau-Lifshitz debido a que es un conductor no convencional, ya que además de procesos de conducción, involucra procesos de magnetización. Sin embargo, es difícil obtener una solución exacta del problema mediante esta relación, por lo que la densidad de corriente varía con respecto a la geometría del conductor y con el fin de satisfacer la ecuación reducida de Maxwell, el problema se delimita asumiendo que la relación entre

<sup>1</sup>Tanto la componente resistiva como reactiva de la impedancia, son fuertemente dependientes de la frecuencia de la corriente que fluye por el conductor ferromagnético y del campo magnético externo  $H_{dc}$  aplicado.

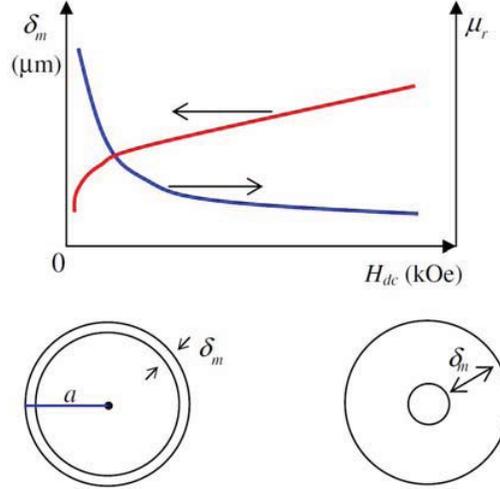
la inducción y el campo magnético es lineal ( $B = \mu H$ ), resultando la impedancia para un conductor cilíndrico magnético de la siguiente manera: (8, 17).

$$Z = \frac{R_{dc} r J_0(rt)}{2J_1(kr)} \quad (1.20)$$

Donde  $r$  es el radio del hilo,  $J_0$  y  $J_1$  son las funciones de Bessel de primer orden  $R_{dc}$  es la resistencia eléctrica y  $k$  es igual a  $(1 + j)/\delta_m$ , siendo  $j = \sqrt{-1}$  la base de los números imaginarios y  $\delta_m$  la profundidad de penetración de un medio magnético con permeabilidad circunferencial,  $(\mu_\phi)$ , definiendo la profundidad de penetración para el hilo magnético:

$$\delta_m = \frac{c}{\sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu_\phi}} \quad (1.21)$$

Siendo  $c$  la velocidad de la luz,  $\sigma$  la conductividad y  $f$  la frecuencia de la corriente  $i_{ac}$  que fluye por el hilo. En un conductor no magnético la inductancia incrementa a la par de la frecuencia y la conductividad, sin embargo de acuerdo a las ecuaciones 1.20 y 1.21 se observa que para el conductor magnético la GMI está directamente relacionado con la profundidad de penetración, que a su vez es inversamente proporcional a la permeabilidad magnética 1.16 (8, 32).



**Figura 1.16:** Dependencia de la permeabilidad reversible ( $\mu_r$ ) y profundidad de penetración ( $\delta_m$ ) con respecto a un campo magnético aplicado ( $H_{dc}$ ) (8).

Con base en la frecuencia, el fenómeno de Magneto-Impedancia Gigante puede ser clasificado en tres regímenes de frecuencia:

1. Frecuencia baja (efecto Magneto-inductivo)

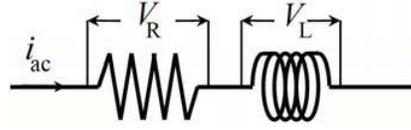
2. Frecuencia intermedia (efecto de Magneto-Impedancia)
3. Frecuencia alta (Resonancia ferromagnética)

### 1. Régimen de frecuencias bajas

En el rango de las frecuencias bajas ( $\sim kHz$ ), la profundidad de penetración (o *skin effect* como se conoce en ingles) es muy débil, por esta razón el cambio en la impedancia se debe principalmente a un cambio en la inductancia (L) del conductor, que es proporcional a la permeabilidad circunferencial, a este efecto se le conoce como Magneto-Inductivo por lo tanto el voltaje medido en los extremos de la muestra se le da el nombre de voltaje inductivo  $V_L$ .

El hilo ferromagnético amorfo, puede ser considerado como un arreglo resistivo inductivo siendo su circuito equivalente el mostrado en la figura 1.17 y de acuerdo con la ley de Kirchhoff, el voltaje total es la suma de los voltajes de cada elemento, ecuación 1.22.

$$V_T = V_R + V_L \quad (1.22)$$



**Figura 1.17:** Circuito equivalente del hilo magnético conductor (9).

Analíticamente, para un conductor considerado un medio lineal isotrópico o medios óhmicos caracterizados por poseer una conductividad  $\sigma$  constante, existirá un campo eléctrico relacionado con un potencial  $\Delta V$  en cualquier punto  $P$  dado por la ecuación 1.23 (9, 33).

$$\Delta V = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.23)$$

Sin embargo para un conductor magnético uniforme la ecuación 1.23 se modifica considerando la corriente  $i_{ac}$  que fluye en el hilo, la cual genera un campo magnético circular  $H_\phi$  que magnetiza el material en la misma dirección, que a su vez afecta el voltaje en los extremos del hilo conductor obteniendo la siguiente ecuación (9, 34):

$$\Delta V = \langle E \rangle_z l \quad (1.24)$$

Donde  $\langle E \rangle_z$  es el promedio del campo eléctrico debido al cambio de la magnetización circular  $H_\phi = \frac{2i_{ac}r}{ca^2}$ , donde  $a$  es el radio del hilo.

$$E_z(r) = -\frac{j\omega}{c^2} i_{ac} \int_0^r \frac{2r' dr'}{a^2} \mu_\phi(r'), \quad r \leq a \quad (1.25)$$

Definiendo,  $a$  como el radio del alambre, y la permeabilidad circunferencial como  $\mu_0$  y  $\mu_{phi} = dB_\phi/dH_\phi$

Por lo tanto de la ecuación 1.23 y considerando el efecto magneto-inductivo de la ecuación 1.22, el voltaje total en el hilo amorfo a bajas frecuencias se obtiene de la siguiente manera:

$$V = R i_{ac} + \langle E \rangle_z l \quad (1.26)$$

Sustituyendo 1.25 en 1.26 el voltaje total es:

$$V = R i_{ac} - \frac{j\omega}{c^2} i_{ac} \int_0^r \frac{2r' dr'}{a^2} \mu_\phi(r') \cdot l \quad (1.27)$$

Con base en la ecuación 1.18 y sustituyendo la ecuación 1.27 la impedancia resulta:

$$Z = R - \frac{j\omega}{c^2} 2l \int_0^r \frac{r' dr'}{a^2} \mu_\phi(r') \quad (1.28)$$

$$Z = R - \frac{j\omega}{c^2} L_i \quad (1.29)$$

Donde:

$$L_i = 2l \int_0^r \frac{r' dr'}{a^2} \mu_\phi(r') \quad (1.30)$$

## 2. Régimen de frecuencias intermedias

Para este intervalo de frecuencia ( $\sim$  cientos de kHz hasta décimas de MHz) el efecto Skin se vuelve importante. El cambio de la impedancia y por lo tanto el efecto GMI, se deben a las variaciones en la profundidad de penetración (la cual modifica la distribución de corriente en la sección transversal del conductor hacia la superficie) debida a grandes cambios en la permeabilidad efectiva, ecuación 1.31 causada por el campo externo aplicado. En este caso, tanto el abombamiento de las paredes (las cuales oscilan a la frecuencia de la corriente de excitación) como la rotación de la magnetización contribuyen a la permeabilidad circular y por consecuencia a la Magneto-Impedancia Gigante (35, 36).

$$\mu_\phi^{eff} = \mu_\phi^{rot} + \mu_\phi^{mov} \quad (1.31)$$

Donde  $\mu_\phi^{rot}$  es la contribución de la permeabilidad por la rotación de la magnetización y  $\mu_\phi^{mov}$  es la contribución de la permeabilidad por el movimiento de las paredes de dominio. Conforme la frecuencia aumenta y el efecto de piel se vuelve más fuerte, la contribución por el movimiento de paredes comienza a amortiguarse debido a corrientes

Eddy que se generan en el conductor y consecuentemente la rotación de la magnetización es la que domina (35).

Considerando un hilo delgado con una magnetización homogénea, que varía linealmente con el campo magnetizante debido a la corriente  $i_{ac}$ , la impedancia puede ser calculada para cualquier frecuencia de la siguiente manera (34):

$$Z = -\frac{j\omega}{c^2} L_e + \frac{1}{2} Rka \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \quad (1.32)$$

Siendo  $L_e = 2l \ln(l/a)$  la parte externa de la auto inducción del hilo. Si  $a/\delta_m \gg 1$  la expansión para altas frecuencias resulta:

$$Z = -R \frac{a}{2\delta_m} - \frac{j\omega}{c^2} [L_e + L_i(\frac{2\delta_m}{a})] \quad (1.33)$$

### 3. Régimen de frecuencias altas

En este régimen (correspondiente a frecuencias de cientos de MHz hasta los GHz) el movimiento de las paredes ya fue completamente amortiguado y el efecto de Magneto-Impedancia se asocia con los grandes cambios en la profundidad de penetración que son causados por el mismo mecanismo que origina la resonancia ferromagnética. El máximo cambio de Magneto-Impedancia se presenta a campos para los cuales la película se encuentra magnéticamente saturada (9, 17, 34).

# Desarrollo del Sensor de Magnetoimpedancia

---

## 2.1. Hilo ferromagnético amorfo

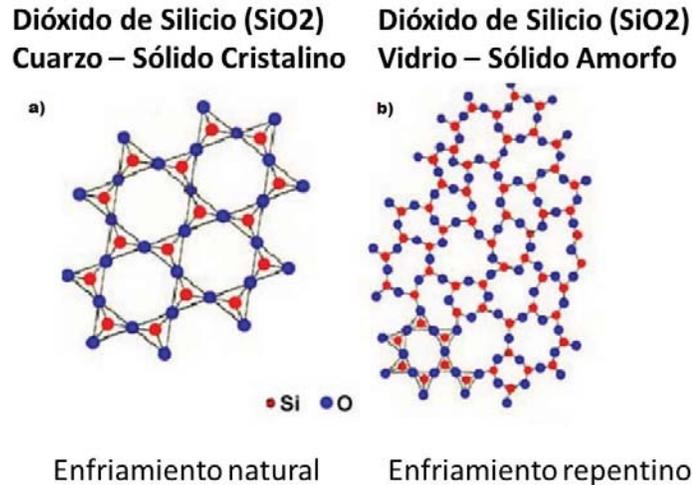
### 2.1.1. Estructura amorfa

Los materiales en el estado sólido se clasifican en cristalinos y amorfos. En los materiales cristalinos, los átomos adoptan arreglos ordenados y repetitivos, formando estructuras tridimensionales periódicas (un ejemplo clásico son los metales) y se definen como materiales con orden de largo alcance. Los materiales amorfos son aquellos que no cuentan con un ordenamiento atómico periódico de largo alcance (ejemplos comunes de estas estructuras son los vidrios), pero presentan un orden de corto alcance. La figura 2.1 muestra la diferencia entre una estructura cristalina y una amorfa; el dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) tiene la capacidad de presentar ambos estados cristalinos dependiendo de su proceso de enfriamiento (37, 38).

En particular los materiales que presentan GMI son materiales amorfos y la estructura está estrechamente relacionada con el proceso de enfriamiento. En específico los materiales ferromagnéticos pueden tener una estructura amorfa si se utiliza en su preparación una técnica de enfriamiento ultra rápido.

Las condiciones cruciales que debe satisfacer un material para observar el fenómeno de Magnetoimpedancia gigante son las siguientes:

- El material debe ser metálico y generalmente amorfo.
- El material debe ser magnéticamente suave.
- Alta magnetización de saturación.



**Figura 2.1:** Estructura del  $SiO_2$  como a) sólido cristalino o b) como sólido amorfo, dependiendo de su enfriamiento.

- Alta permeabilidad.
- Magnetostricción baja y negativa.
- Tener un eje de fácil magnetización bien definido, sin embargo el campo de anisotropía  $H_k$  debe ser relativamente pequeño. Además se prefiere que la relación entre el campo de anisotropía  $H_k$  y el campo coercitivo  $H_c$  se encuentre alrededor de 20.

En general las aleaciones ferromagnéticas amorfas presentan el fenómeno de GMI, ya que cumplen con las características antes mencionadas. En este trabajo se utilizó un hilo ferromagnético amorfo rico en Cobalto (Co) de composición  $FeCoSiB^1$ , el cual fue fabricado por el método de enfriamiento ultra rápido conocido como *in-rotating-water quenching* (enfriamiento por rotación de agua). (9, 10, 39).

El método de *in-rotating-water quenching* consiste en fundir la aleación en una atmósfera de argón dentro de una boquilla de cuarzo, posteriormente se opera un pistón que proyecta la aleación fundida hacia una superficie donde se encuentra el agua de enfriamiento rotando a una velocidad alta. La aleación fundida se solidifica rápidamente en el agua formando un hilo continuo que es colectado en la parte interior del tambor rotatorio debido a la fuerza centrífuga, figura 2.2 (10, 39).

<sup>1</sup>Proporcionado por la compañía Japonesa Unitika LT

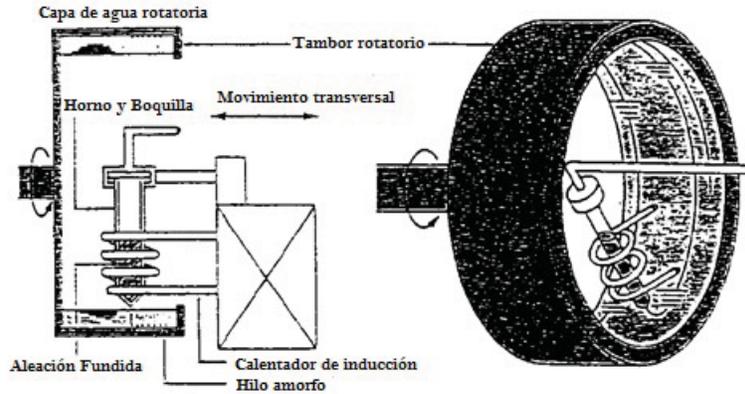


Figura 2.2: Técnica de enfriamiento por rotación de agua (10).

## 2.2. Parámetros del hilo amorfo y respuesta en frecuencia para arreglos de uno y dos hilos

El elemento sensor elegido para este trabajo fue un hilo de aleación amorfa compuesto de  $FeCoSiB$ , con  $30 \mu m$  de diámetro y una constante de magnetostricción negativa de  $\lambda = -10^{-7}$ , producido por la empresa Japonesa UNITIKA LDT.

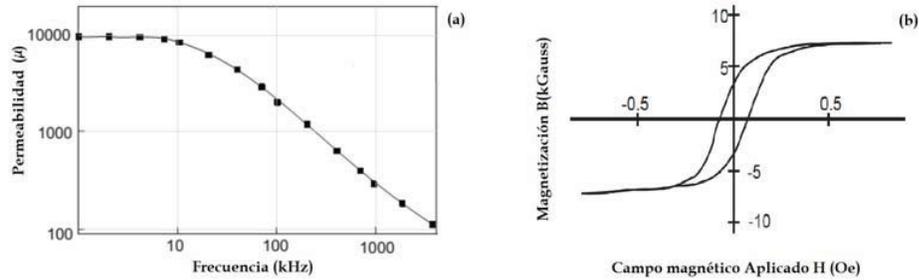
Los parámetros del micro hilo proporcionados por el fabricante son los siguientes:

- Alta permeabilidad relativa constante hasta 10 kHz de  $\mu_r = 10000$ , figura 2.3 (a).
- Campo coercitivo  $H_c = 0.06 Oe$ .
- Magnetización de saturación  $M_s = 8000 Gauss$ , figura 2.3 (b).

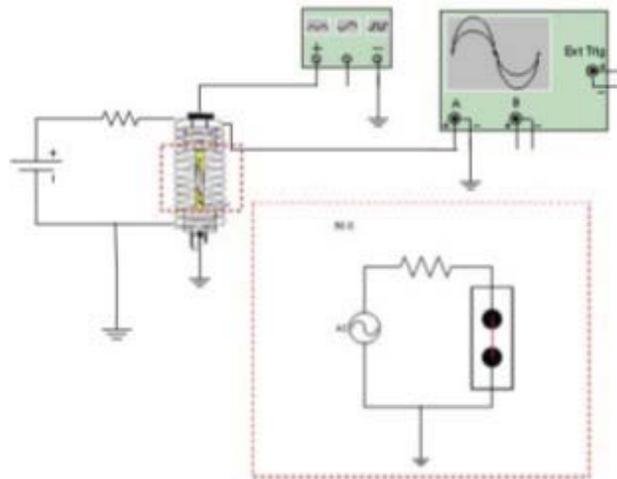
Para realizar la caracterización del hilo amorfo se parte de la instrumentación básica del fenómeno de Magnetoimpedancia, figura 2.4, la cual consta de una fuente de excitación alterna  $I_{ac}$  para el hilo amorfo, la cual promueve la precesión de los espines, una fuente generadora de campo magnético  $H_{DC}$  y un instrumento para la medición de la respuesta.

Con base en lo anterior se realizó el experimento de Magnetoimpedancia (MI) utilizando un equipo analizador de redes de la marca Agilent modelo 4395A, figura 2.7 a), cuyas características se muestran en el apéndice B.5. El equipo analiza el cambio en impedancia de la muestra y además tiene la capacidad de funcionar como generador de señal, proporcionando una onda senoidal con frecuencia y voltaje variable de

2.2 Parámetros del hilo amorfo y respuesta en frecuencia para arreglos de uno y dos hilos



**Figura 2.3:** (a) Gráfica de la permeabilidad en función de la frecuencia. (b) Gráfica de la curva de histéresis del hilo amorfo.



**Figura 2.4:** instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia.

100 kHz – 500 MHz y 0.354 mV – 630.02 mV respectivamente. La siguiente parte del experimento de MI, es la generación de un campo magnético externo,  $H_{DC}$ , el cual en este trabajo se realiza mediante unas bobinas de Helmholtz alimentadas por una fuente de voltaje que tiene la capacidad de proporcionar un voltaje máximo de  $\pm 30V$  y una corriente máxima de 8 A. En conjunto el arreglo genera un campo magnético de  $\pm 50G$ , la caracterización de las bobinas se presenta en la figura 2.5.

La muestra ferromagnética se coloca dentro del campo magnético y es alimentado con la señal proveniente del analizador de redes. Para realizar la medición se requiere un arreglo experimental que permita un acoplamiento de impedancias entre los conectores coaxiales del equipo y el hilo ferromagnético, con base en esto se pensó en el diseño de una línea de microcinta (“microstrip” en ingles), la cual es una línea de transmisión que

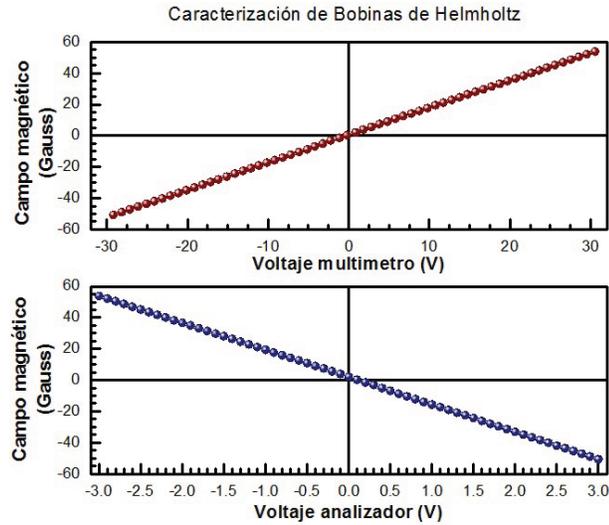


Figura 2.5: Caracterización de las bobinas de Helmotz para el campo externo  $H_{DC}$ .

consiste en una fina línea conductora colocada en un lado sobre un sustrato dieléctrico que tiene un plano de tierra en el lado opuesto. Las características de la línea microcinta, son muy similares a las de una línea de transmisión coaxial ya que a la microcinta se le considera una modificación al cable coaxial tal y como se muestra en la figura 2.6 b), donde las líneas punteadas corresponden a la distribución de campo magnético y las líneas sólidas al campo eléctrico (40). El cálculo de la línea microstrip se realizó conforme al trabajo de (9).

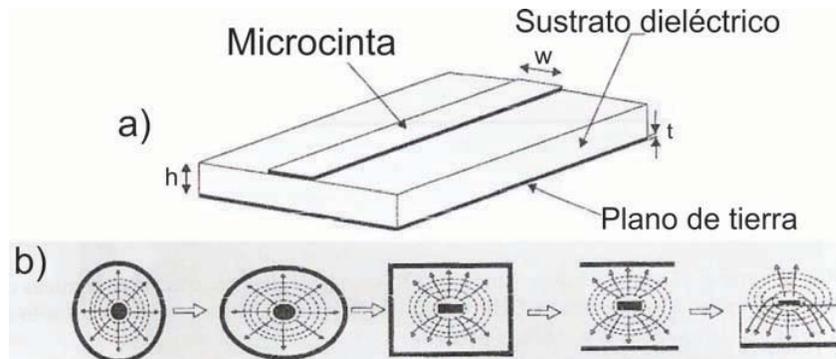
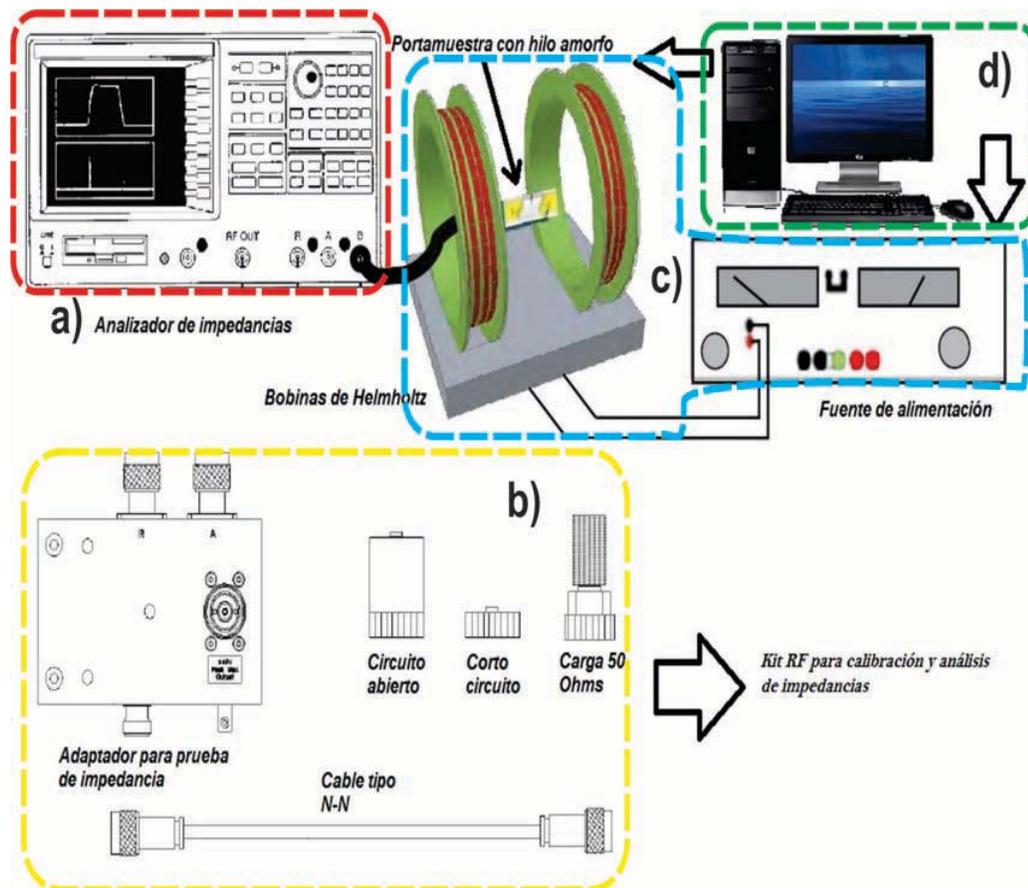


Figura 2.6: a) Línea de transmisión Microcinta. b) Transformación de cable coaxial a Microcinta.

Todo el sistema de caracterización, figura 2.7 a), se controla mediante un software diseñado en Visual C<sup>®</sup>, el cual conjunta el control del analizador de impedancias y la

## 2.2 Parámetros del hilo amorfo y respuesta en frecuencia para arreglos de uno y dos hilos

fuente de las bobinas de Helmholtz. El programa consta de una etapa de configuración, la cual pide los parámetros iniciales del equipo y el rango de frecuencia al que se va a trabajar, posteriormente realiza la calibración del equipo en circuito abierto, circuito cerrado y con carga de  $50 \Omega$ , con el fin de tener una referencia con respecto a las medidas de impedancia del equipo. Finalmente se selecciona una frecuencia y se realiza un barrido en campo magnético obteniendo así el cambio de impedancia en función de un campo magnético. Los datos resultantes de la caracterización del hilo ferromagnético corresponden al módulo de la impedancia ( $|Z|$ ) en unidades de ohms ( $\Omega$ ), aplicando la ecuación 1.13 se obtiene la *Magnetoimpedancia*.



**Figura 2.7:** Arreglo experimental para obtener la respuesta en magnetoimpedancia del hilo ferromagnético amorfo. a) Equipo analizador de redes Agilent modelo 4395A. b) Kit de calibración y análisis de impedancias 43961A. c) Bobinas de Helmholtz. d) control de todo el proceso mediante la computadora.

### 2.2.1. Metodología

Para el diseño del sensor de campo magnético se consideró la instrumentación básica del fenómeno de Magnetoimpedancia, figura 2.4, por lo que el trabajo se dividió en cuatro etapas principales, figura 2.8, que son excitación, acondicionamiento, adquisición y procesamiento. Cabe mencionar que antes se realizó la caracterización del elemento sensor con MI.

#### 2.2.1.1. Etapa de excitación.

Esta etapa se compone de un oscilador de onda senoidal tipo Colpitts diseñado para una frecuencia de 16 MHz, debido a que a esta frecuencia se determina la mejor respuesta obtenida para un arreglo de dos hilos paralelos. Posteriormente se tiene una etapa de pre-amplificación (amplificando la señal proveniente del oscilador) con el objetivo de excitar al hilo o arreglo de hilos con una corriente no mayor a 30 mA, promoviendo el desplazamiento y oscilación de las paredes de dominio magnético, así como modificar la amplitud de precesión con la finalidad de obtener una mayor respuesta en el cambio de la impedancia.

#### 2.2.1.2. Etapa de Acondicionamiento.

La lectura obtenida del sensor pasa por dos circuitos amplificadores no inversores conectados en cascada con el objetivo de acoplar la impedancia e incrementar la amplitud de la señal.

Posteriormente se realizó una rectificación de la señal para convertirla a un nivel de DC, mediante un rectificador de onda completa implementado con diodos de germanio de conmutación rápida y una etapa diferencial para sumar las fases positiva y negativa obteniendo finalmente una señal rectificada.

Mas adelante se integró la señal para obtener su valor promedio el cual se traduce en un nivel de DC, mismo que se introduce a una etapa final de amplificación, dejando así una señal acondicionada independiente de la frecuencia y dependiente de la amplitud de la respuesta de MI, al tratarse de un nivel de DC, se tiene la facilidad de procesarla en casi cualquier dispositivo embebido para su manipulación.

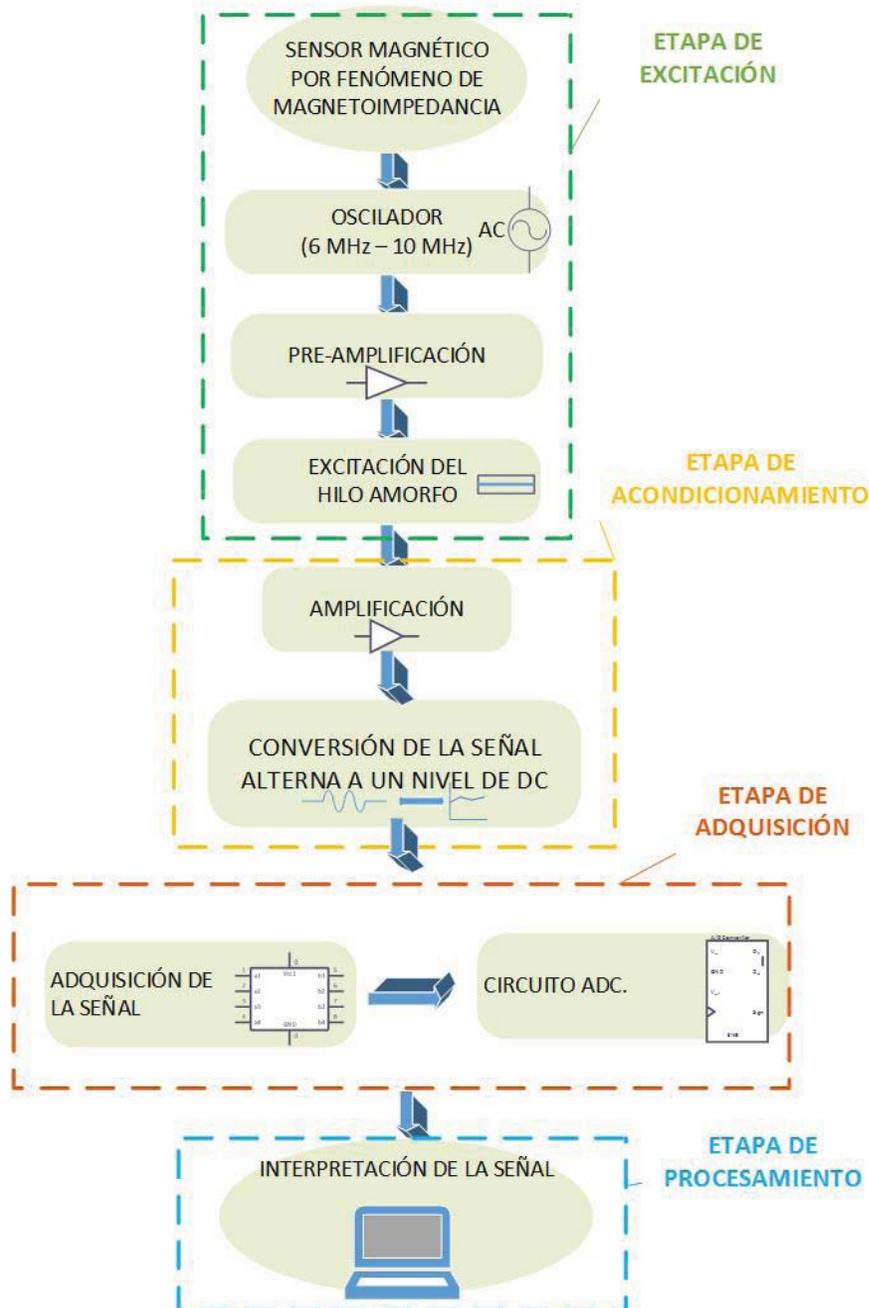


Figura 2.8: Diagrama a bloques general de la metodología del sensor.

### 2.2.1.3. Etapa de Adquisición.

Se utilizó un microcontrolador marca *Freescale* modelo MC9S08MM128 (ver figura 2.9), el cual cuenta con un convertidor analógico digital (ADC) de 16 bits, permitiendo con ello una mayor resolución para la detección de la señal, una vez realizado el acondicionamiento, la señal es enviada vía USB del microcontrolador al ordenador para su visualización.

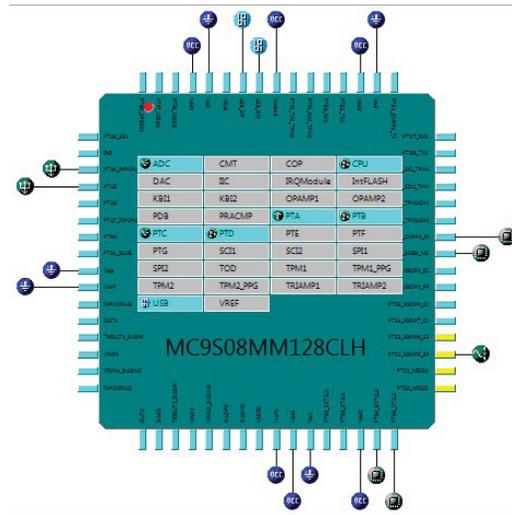


Figura 2.9: Configuración de los módulos del microcontrolador *Freescale* MC9S08MM128.

### 2.2.1.4. Etapa de Procesamiento.

Una vez que la señal fue acondicionada y digitalizada, se diseñó el programa con ayuda del Software *VisualC#*<sup>®</sup>, mismo que se utiliza para acoplar el microcontrolador y una fuente de alimentación marca *Agilent E3640A* mediante comunicación GPIB, la cual controla una bobina utilizada para la calibración y prueba del prototipo de sensor.

El paso posterior al establecimiento de comunicación entre el microcontrolador y la fuente, es la calibración del sensor, para la cual el programa cuenta con una etapa en la cual se realiza un promedio de 100 mediciones o muestras de la respuesta del sensor sin campo magnético aplicado, dicho valor se guarda para restarlo a las lecturas posteriores, ya que se trata de un valor de referencia que permite discriminar las contribuciones de campo magnético externo al deseado. Finalmente el programa tiene la capacidad de realizar un barrido en campo magnético y leer la respuesta del sensor para establecer el comportamiento del instrumento.

## 2.3. Diseño Electrónico

En este trabajo se propuso un diseño de oscilador colpitts el cual se explica en el apéndice A, el circuito se diseño a 16 MHz debido a que fue la mejor respuesta en GMI obtenida para el arreglo de dos hilos paralelos. La configuración final se muestra en la figura 2.10 a). En la figura 2.10 b), se muestra la señal proveniente del oscilador observando que cuenta con estabilidad de forma, amplitud y frecuencia. Una ventaja de usar este tipo de osciladores es que permite ajustar valores de frecuencia unicamente con el uso de capacitores variables en el circuito tanque (ver anexo A).

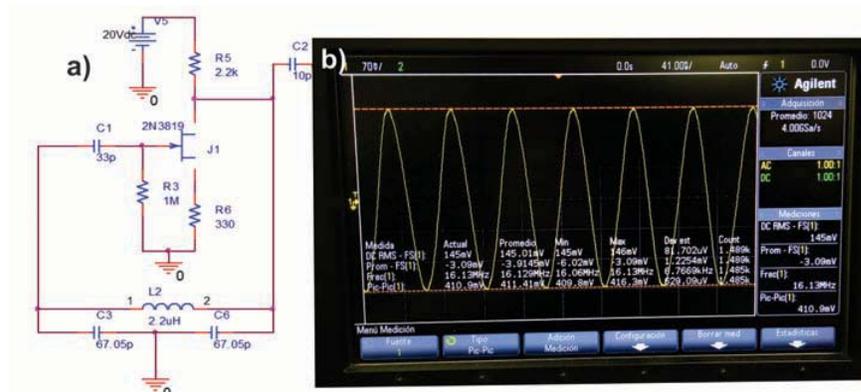
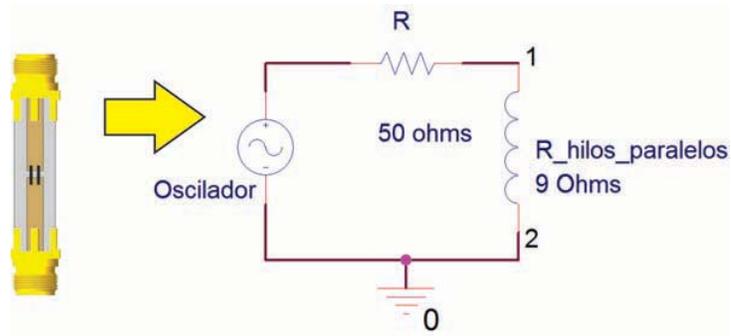


Figura 2.10: a) Oscilador Colpitts. b) Señal del oscilador Colpitts.

Para la etapa de acondicionamiento se utilizaron amplificadores operacionales modelo LM7171, en específico por que cumplen con un ancho de banda por demás superior al necesario para el diseño que se tiene en este trabajo. El circuito acondicionador se conforma de varias etapas las cuales se describen a continuación. El análisis general de los circuitos utilizados se encuentra en el anexo B.

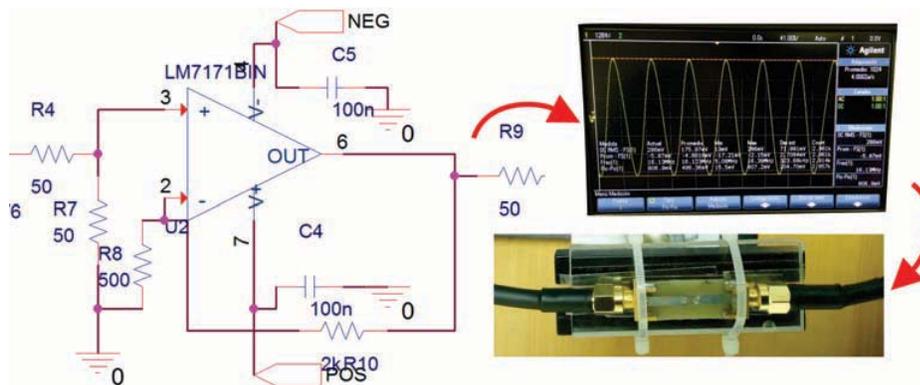
El porta muestras en el que se coloca el hilo ferromagnético, tiene un circuito equivalente como el mostrado en la figura 2.11, el cual se compone de un arreglo resistivo de  $50 \Omega$  en serie con el arreglo de hilos conductores. cada elemento sensor tiene una resistencia aproximada de  $18 \Omega$  debido a que estos están en paralelo, la contribución resistiva de los hilos es de  $9 \Omega$ .

La corriente que circula por el hilo amorfo se prefiere no mayor a 20 mA para no alterar permanentemente la estructura amorfa del micro hilo, debido a esto, la señal proveniente del oscilador se amplifico mediante un circuito amplificador no inversor al



**Figura 2.11:** Señal del oscilador amplificada que excita al hilo amorfo.

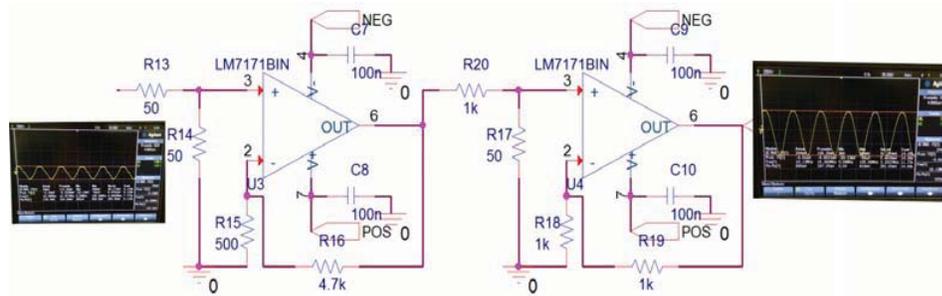
cual se le puede variar la ganancia para ajustar la corriente que pasa por el elemento sensor. Sin carga, la señal amplificada se ajustó a 1.2 V<sub>p-p</sub>, una vez conectado el circuito a la línea de transmisión esta señal decreció a  $\approx 800$  mV, figura 2.12.



**Figura 2.12:** Señal del oscilador amplificada que excita al hilo amorfo.

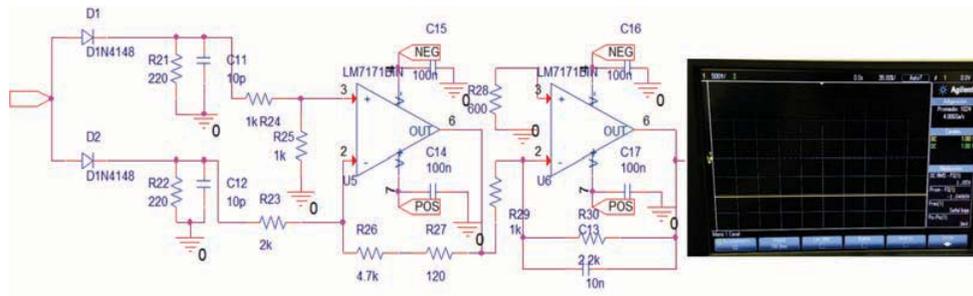
Debido a que la señal de interés es únicamente la del arreglo de hilos ferromagnéticos, se toma la señal de voltaje de estos, observando que en primera instancia la forma de la señal ya no corresponde a la de una senoidal pura, y que la amplitud es pequeña (pero correspondiente al divisor de voltaje) se realizó una amplificación en cascada como se muestra en la figura 2.13.

Posteriormente la señal amplificada pasa por un rectificador de onda completa compuesto por un arreglo de diodos de conmutación rápida que suprimen un ciclo de la señal (dependiendo de la orientación del diodo) y un circuito restador, figura 2.14, que compone las fases obteniendo así una señal puramente positiva. Con el fin de obtener un señal con nivel de DC, la señal rectificada pasa por un circuito integrador para que



**Figura 2.13:** acoplamiento y amplificación de la señal proveniente de los hilos ferromagnéticos.

la señal final sea el valor medio absoluto, figura 2.14.



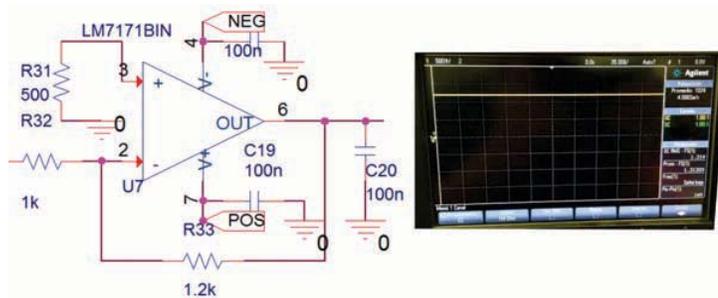
**Figura 2.14:** Circuito rectificador de onda completa.

Finalmente, la señal proveniente del integrador pasa por un amplificador inversor, figura 2.15 de ganancia unitaria y así invertir el signo de la señal de DC, para facilitar el tratamiento de la señal con cualquier dispositivo controlador o procesador. En este trabajo la señal se conecta a un microcontrolador *Freescale* modelo MC9S08MM128, en el cual como se comentó anteriormente se hace la conversión de la señal analógica-digital. Los datos son enviados posteriormente por el puerto USB<sup>1</sup> al software que se encarga del control y despliegue de la señal.

## 2.4. Desarrollo de Software

El programa que recibe la señal del microcontrolador y además controla la fuente que proporciona campo magnético en el orden de micro Teslas se desarrolló en el software

<sup>1</sup>Del inglés *Universal Serial Bus*



**Figura 2.15:** instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia.

Visual Studio® en lenguaje C#. Su funcionamiento se describe mediante el diagrama a bloques mostrado en la figura 2.17. El programa consiste en tres partes principales, la conexión entre el microcontrolador y el software, la conexión entre la fuente que controla la bobina (que a su vez controla una bobina diseñada para generar campos magnéticos  $< 10 \mu T$ ) y el despliegue de la señal como se muestra en la figura 2.16.

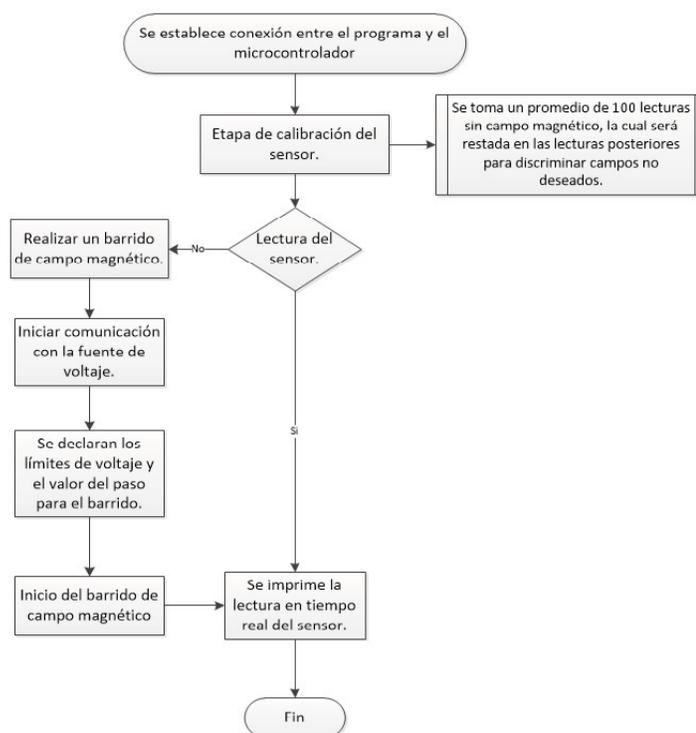


**Figura 2.16:** instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia.

La bobina utilizada se diseño para campos magnéticos en el orden de los micro Teslas, con base en al ecuación para el diseño de un solenoide, figura 2.18, ecuación 2.1 (41):

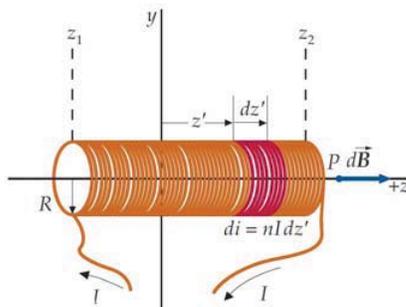
$$B_z(Z) = \frac{1}{2} \mu_0 n L \left( \frac{z - z_1}{\sqrt{(z - z_1)^2 + R^2}} - \frac{z - z_2}{\sqrt{(z - z_2)^2 + R^2}} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $B_z$  representa el flujo de campo al centro del solenoide,  $z_1$  y  $z_2$  representan los



**Figura 2.17:** instrumentación básica del fenómeno de magneto impedancia.

extremos de la longitud  $L$  de la bobina,  $R$  es el radio,  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío,  $I$  la corriente que circula por la bobina y  $n$  el número de vueltas del solenoide.

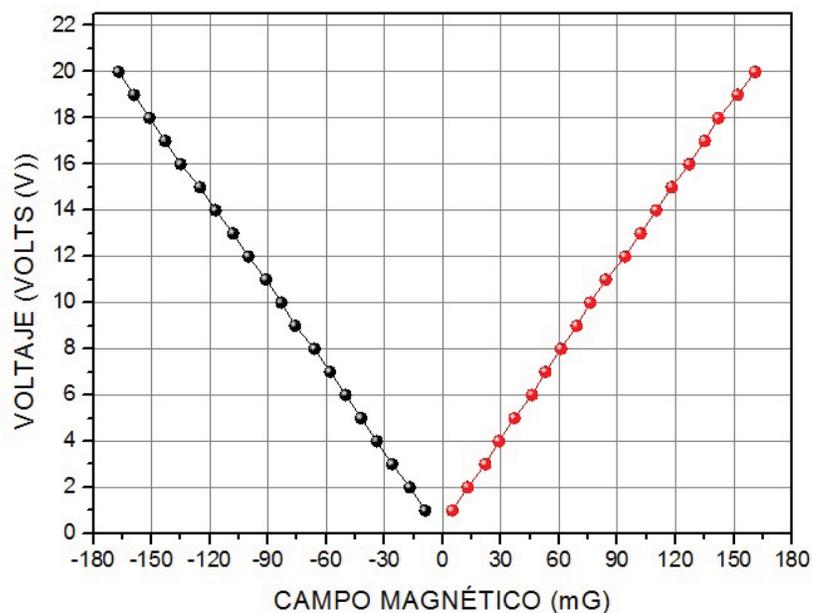


**Figura 2.18:** Diseño de un solenoide.

Proponiendo una bobina con un un radio  $R= 0.025$  m, 50 vueltas y una longitud  $L=0.0365$  m. Para disminuir la corriente que alimenta la bobina se colocó una resis-

tencia en serie de  $1\text{ k}\Omega$  y teniendo una fuente que proporciona un voltaje de  $0\text{ V}$  -  $20\text{ V}$ , por ley de Ohms la corriente que se proporcione es aproximadamente de  $0\text{ A}$  -  $20\text{ mA}$ .

Experimentalmente la bobina se caracterizó con un Gaussmetro con el cual se pudo obtener, por la resolución del equipo, un valor mínimo de campo magnético de  $5\text{ mG}$  a un  $1\text{ Volt}$ . El valor máximo de campo magnético medido correspondiente a  $20\text{ V}$  de la fuente de alimentación, fue de  $161\text{ mG}$ , como se muestra en la figura 2.19.

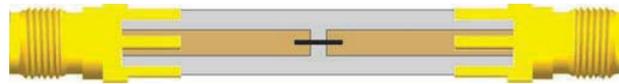


**Figura 2.19:** Caracterización de la bobina de calibración.

## Análisis de Resultados

---

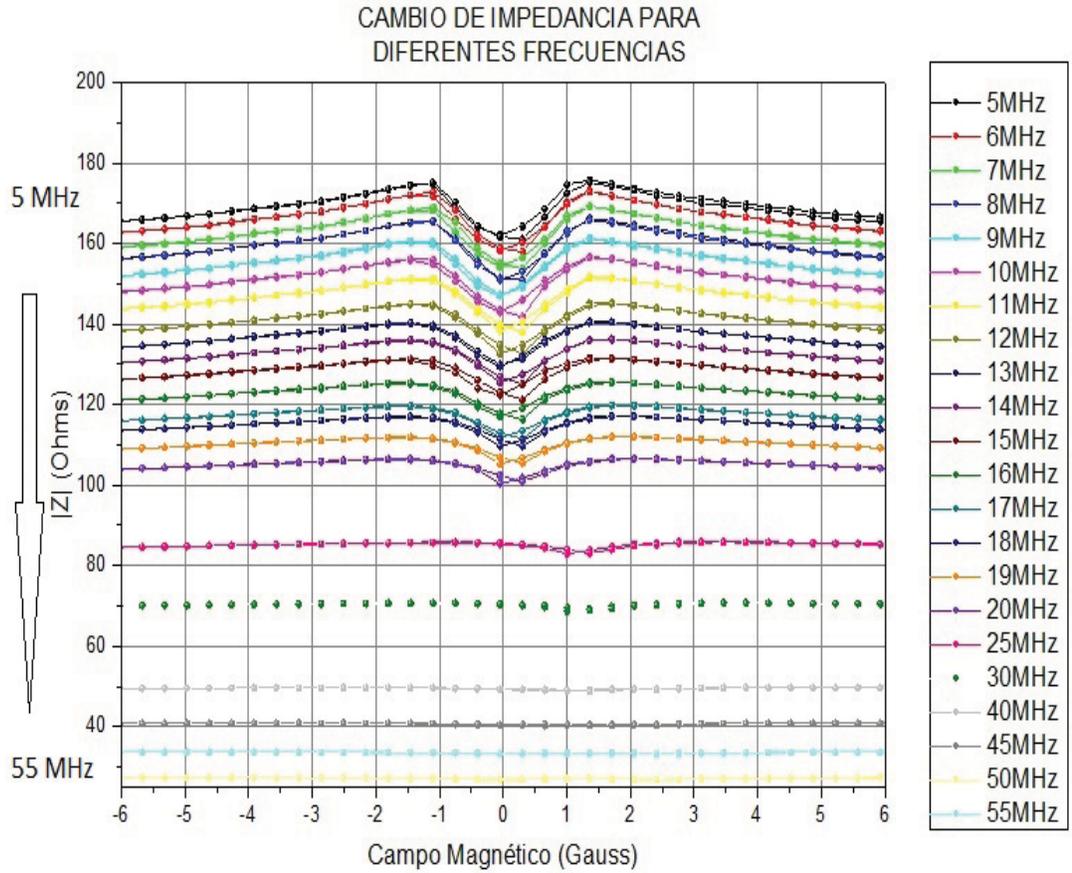
### 3.1. Respuesta de Magnetoimpedancia de un Hilo amorfo



**Figura 3.1:** Porta muestra para caracterización de un hilo amorfo.

La caracterización en Magnetoimpedancia es esencial para establecer las condiciones de diseño electrónico para el prototipo de sensor de campo magnético. La figura 3.2 muestra la gráfica del cambio en impedancia para diferentes frecuencias (de 5 MHz a 55 MHz) con respecto al campo magnético. En esta respuesta se observan dos cosas esenciales, una es la fuerte dependencia que tiene la impedancia del hilo ante cambios en la frecuencia, ya que el cambio aproximado se encuentra entre 4 y 5 Ohms para cada intervalo de 1 MHz. Por otro lado, se observa que el cambio en amplitud de la impedancia ocurre en un intervalo de campo magnético centrado en cero Gauss hasta la respuesta correspondiente a 20 MHz, posterior a esta, la respuesta tiene un corrimiento de un Gauss y una disminución en la amplitud de la MI. La respuesta típica de la MI de un hilo ferromagnético consiste en una señal con dos máximos, característico de una anisotropía circunferencial y que va cambiando en función de la frecuencia debido a la profundidad de penetración de la onda electromagnética. A mayores frecuencias existe una competencia con la respuesta de la rotación y precesión de espín, por lo que la Magnetoimpedancia se amortigua.

Se realizó el análisis de la dependencia de la Magnetoimpedancia con respecto a la frecuencia, figura 3.3, observando que el mayor cambio en Magnetoimpedancia se encuentra a una frecuencia de 10 MHz. Donde además el cambio a campo bajo es de  $-1.3$  a  $1.3$  Gauss y se puede aproximar a una función lineal.



**Figura 3.2:** Respuesta de en impedancia de un hilo.

En la figura 3.4, se observa un cambio de  $\Delta Z/Z$  del 10.42%, se observan los máximos característicos de una estructura de dominios circunferencial y se determina cual es la región de la respuesta lineal para este caso.

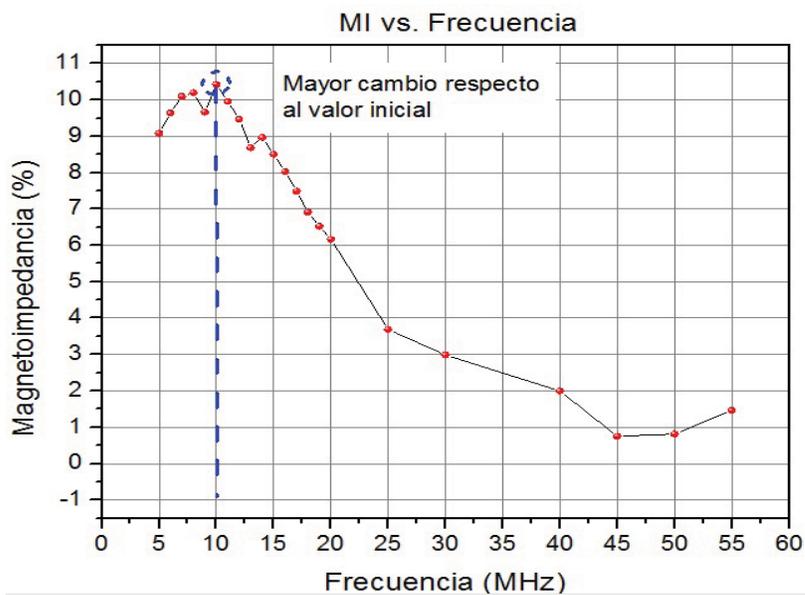


Figura 3.3: Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia de un hilo.

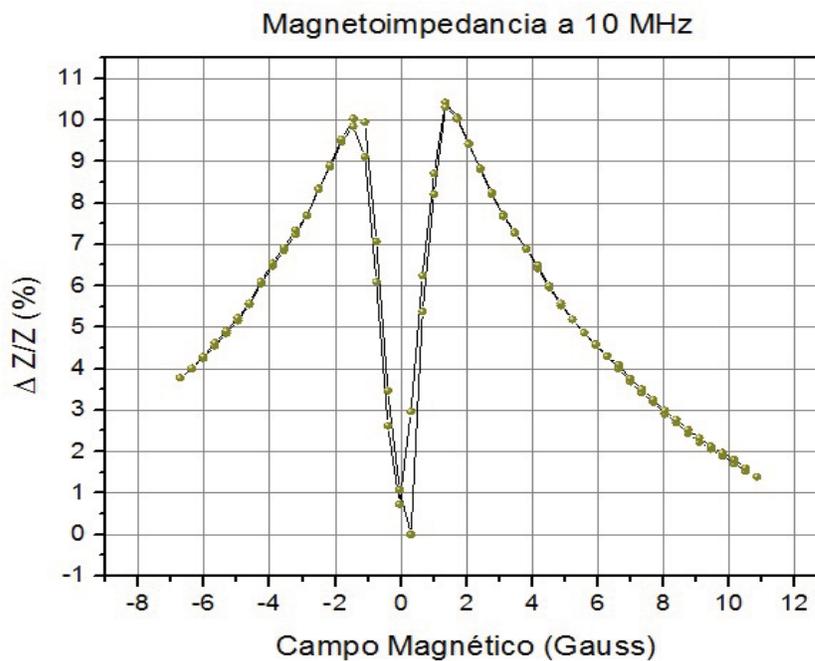


Figura 3.4: Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia.

### 3.2. Respuesta de Magnetoimpedancia de dos Hilos amorfos paralelos

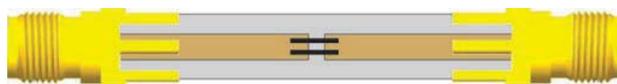


Figura 3.5: Porta muestra para caracterización de dos un hilos amorfos.

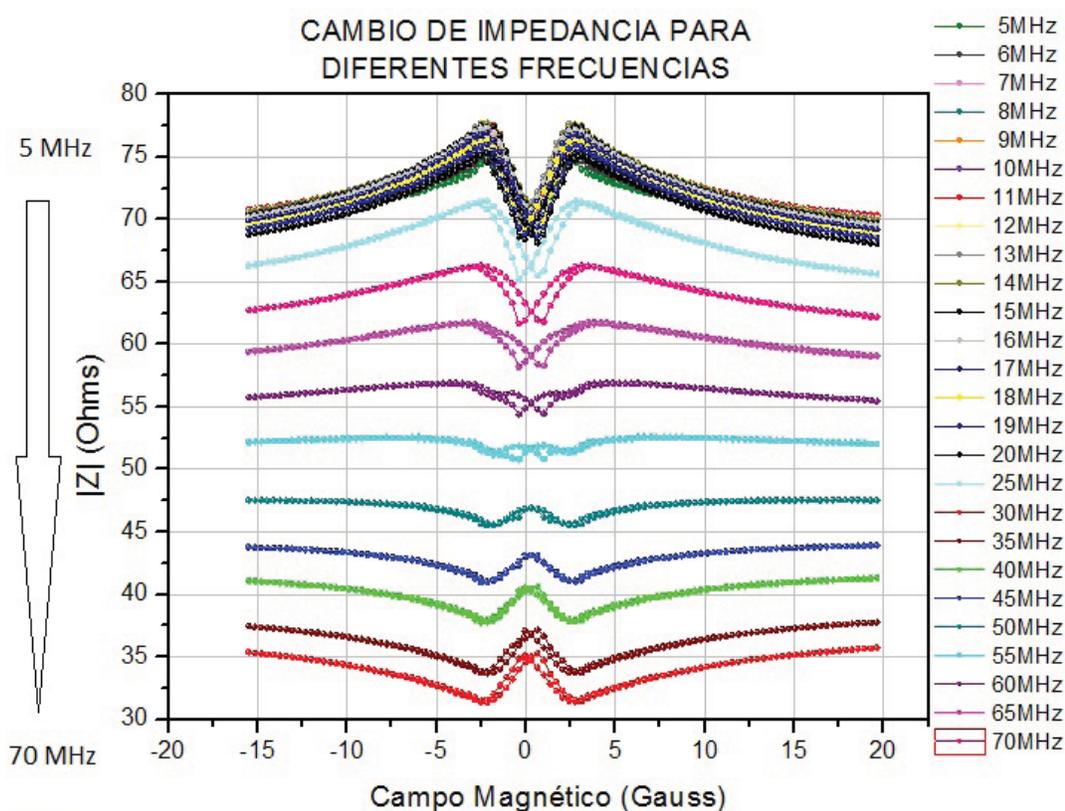
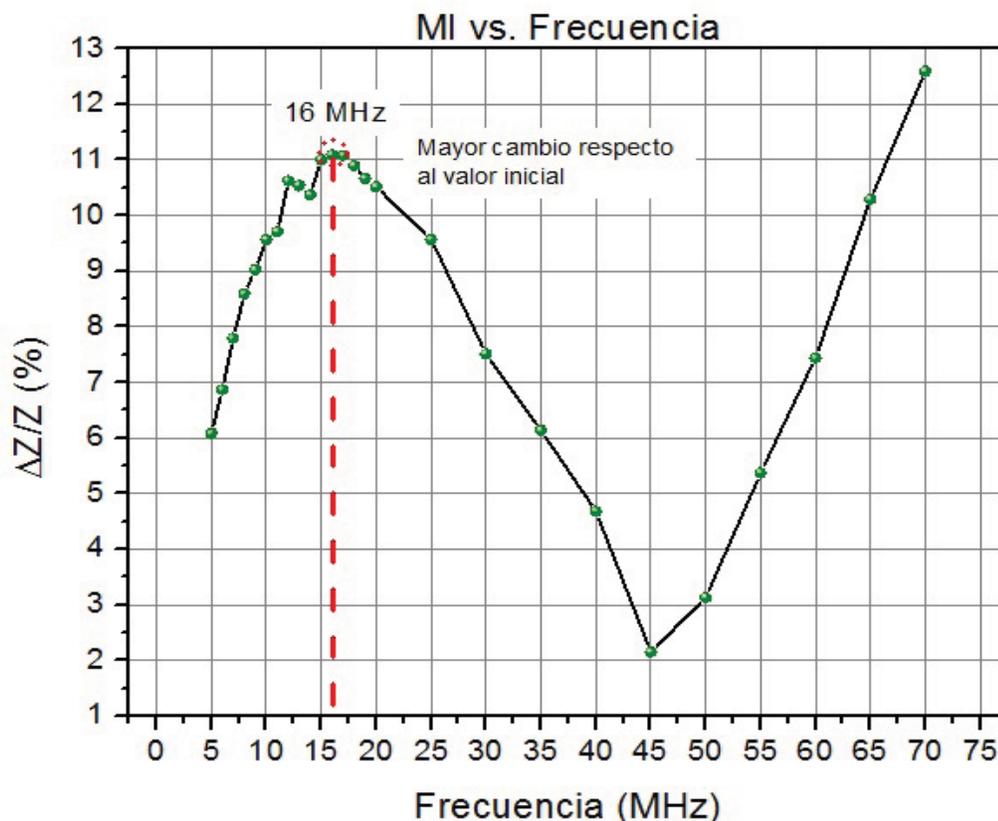


Figura 3.6: Respuesta de la impedancia de dos hilos paralelos a diferentes frecuencias.

A diferencia de la caracterización de un hilo amorfo, cuando se dispone de un arreglo de dos hilos paralelos, figura 3.5, la dependencia de la impedancia con respecto de la frecuencia se ve modificada como se muestra en la figura 3.6. La primera diferencia se observa en el intervalo de frecuencias de 5 MHz a 20 MHz donde la impedancia es casi constante. Se observa también que en todo el barrido de frecuencias no existe un

desplazamiento significativo de la respuesta central como el observado en las curvas obtenidas con un hilo, figura 3.2, sin embargo, la diferencia más relevante ocurre a partir de los 50 MHz, donde además de la inversión de la señal, su magnitud aumentar al incrementar la frecuencia. Esto puede explicarse debido a un comportamiento de auto inducción originado por los micro hilos.



**Figura 3.7:** Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia del arreglo de dos hilos paralelos.

En la gráfica de la figura 3.7 se presenta el comportamiento de la Magnetoimpedancia en función de la frecuencia, notando que el primer máximo se ubica a 16 MHz, figura 3.8 (cuyo cambio porcentual es de 11.08 %) con un comportamiento típico de MI, posteriormente decrece hasta los 45 MHz donde la señal pierde su forma y registra el menor cambio en MI (3.5%), después de este valor la señal comienza a invertirse, fenómeno que puede ser relacionado al acoplamiento entre los hilos ferromagnéticos, además de existir una competencia entre procesos de absorción asociados a la rotación y precesión de espín, originando así una inversión en la MI.

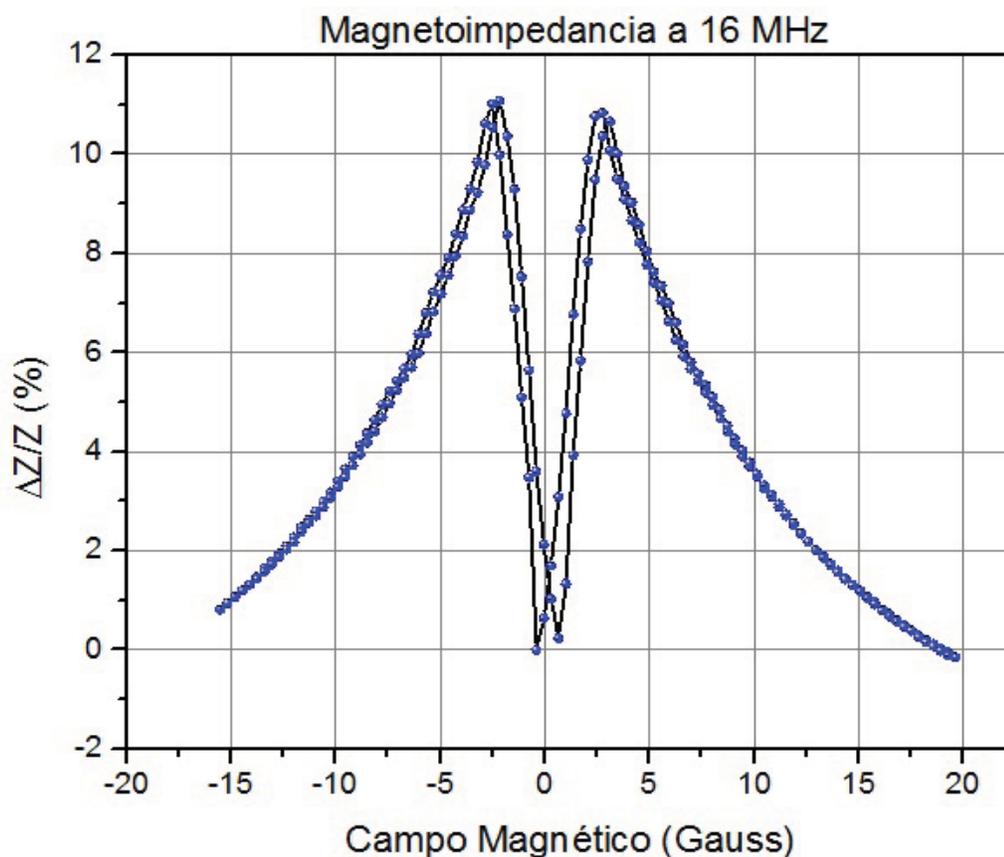


Figura 3.8: Curva de Magnetoimpedancia del arreglo de hilos paralelos a 16 MHz.

Una vez observadas y analizadas las respuestas anteriores, se tomó la determinación de utilizar el arreglo de dos hilos paralelos, ya que proporciona un mayor cambio en MI además de poseer mayor estabilidad en su impedancia nominal ( $50 \Omega$ ) ante cambios en frecuencia, lo que favorece el acoplamiento entre las etapas del sistema de detección y por lo tanto existe una mayor transferencia de energía lo que incrementa la eficiencia.

Para el diseño de un sensor se prefiere en la mayoría de los casos trabajar en la región lineal del elemento sensor. De acuerdo a lo anterior, se decidió trabajar con el centro de la curva de Magnetoimpedancia, ya que presenta un rango de detección con respuesta lineal a campos magnéticos de baja intensidad. Como se ha recalado a lo largo del trabajo, el objetivo es medir campos menores a  $1 \mu T$ , en la figura 3.9 se observa la respuesta de MI a una frecuencia de 16 MHz del arreglo de hilos amorfos para un rango de campo magnético de  $\pm 3 mG$ . Se realizó un ajuste de los datos a una línea encontrando que el valor de la  $\Xi = 0.9659$ , por lo que corresponde a una respuesta lineal entre  $\Delta Z$  y  $H$

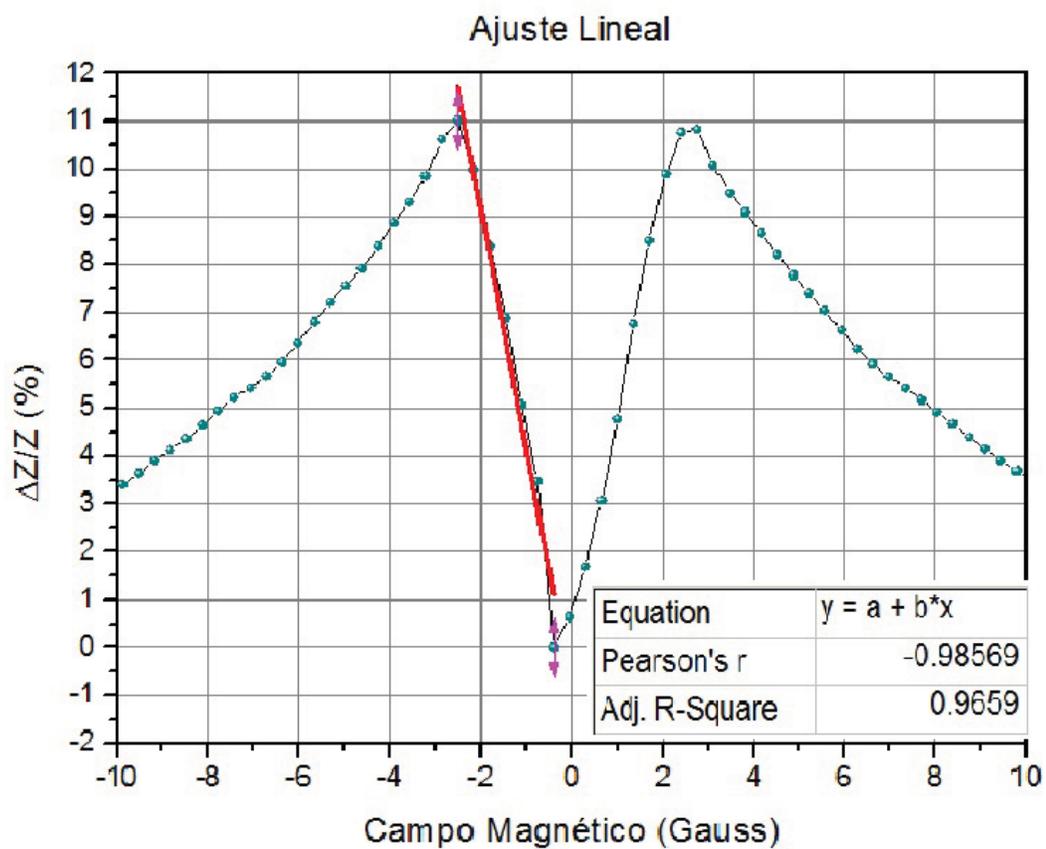


Figura 3.9: Ajuste lineal en la parte central de la curva de Magnetoimpedancia para una frecuencia de 16 MHz.

### 3.3. Respuesta del arreglo propuesto para el prototipo se sensor de campo magnético

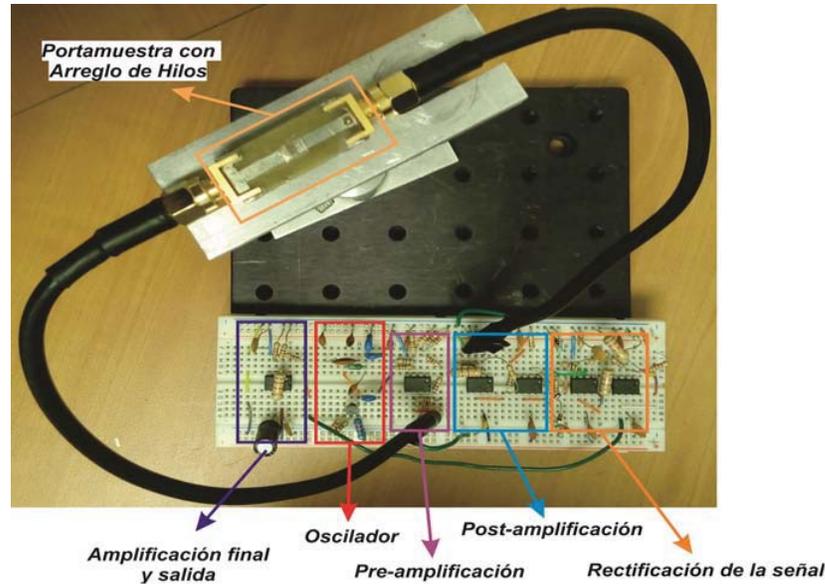


Figura 3.10: Arreglo experimental del prototipo de sensor de campo magnético.

En la figura 3.10 se muestra el arreglo experimental donde se unen todos los elementos del capítulo anterior para formar el prototipo de sensor de campo magnético utilizando el fenómeno de magnetoimpedancia. Una vez conectado, se realizaron algunas pruebas para observar las ventajas y limitantes del prototipo.

La primera prueba consistió en colocar el elemento sensor al centro del solenoide, como se muestra en la figura 3.11, posteriormente se varió el voltaje (proporcional a la corriente) de la fuente que alimenta el solenoide y por lo tanto el campo magnético que circula al centro de la bobina. El barrido se realizó de 0 A a 16 mA, lo que se traduce a valores de campo magnético de 0 G a 127 mG. El sensor registra un cambio de voltaje proporcional al campo magnético de la bobina, dicho voltaje modifica su nivel de DC dependiendo la orientación del campo magnético, es decir, el prototipo permite conocer la dirección del campo magnético medido.

Se realizaron tres medidas con el fin de probar la reproducibilidad del prototipo, figura 3.12, observando un comportamiento similar en cada una de las mediciones lo que resulta favorable, sin embargo con forme se realizan mediciones existe una diferencia en el nivel de DC en cada una de ellas lo que puede ser atribuido a una remanencia en la bobina o incluso en el arreglo de hilos.

### 3.3 Respuesta del arreglo propuesto para el prototipo se sensor de campo magnético



Figura 3.11: Prueba con campo magnético mediante le solenoide del prototipo de sensor.

Para comprobar la linealidad previamente observada en la curva de Magnetoimpedancia, se utilizo la medida dos (figura 3.12) y se le aplicó un ajuste lineal, figura 3.13, destacando que aun después del tratamiento de la señal el comportamiento lineal se mantiene en gran porcentaje como se muestra en el valor de la correlación de la señal ajustada y la señal medida.

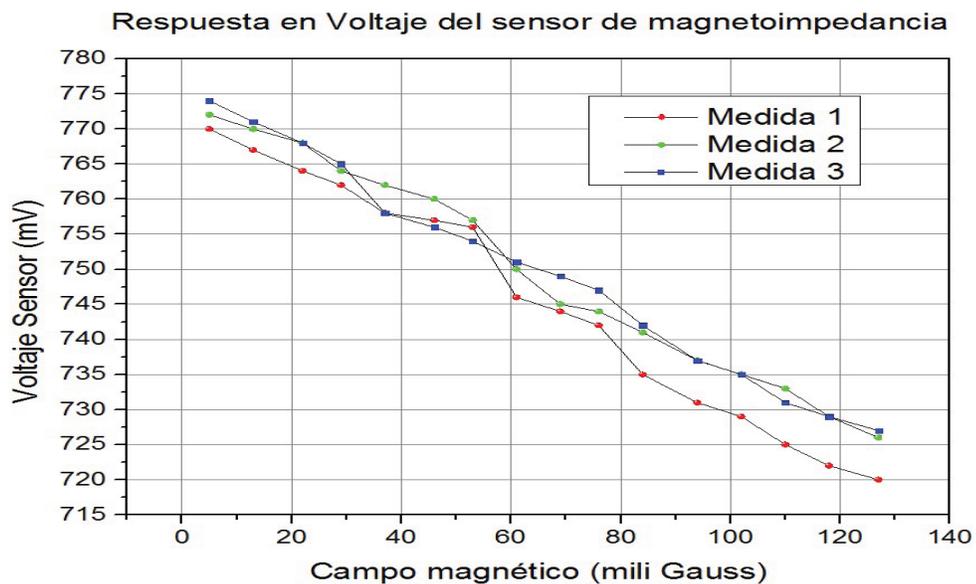
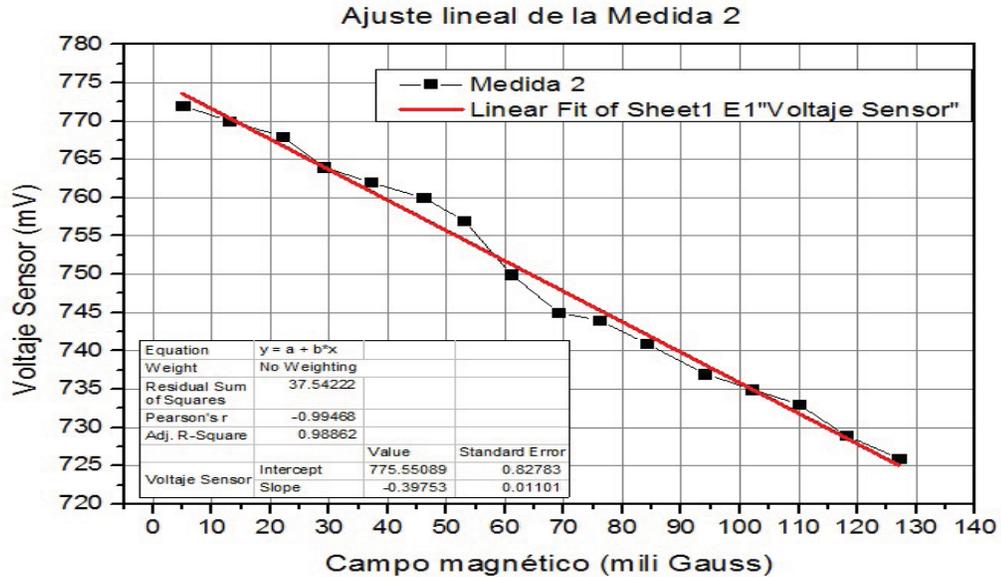


Figura 3.12: Curva de Magnetoimpedancia dependiente de la frecuencia.

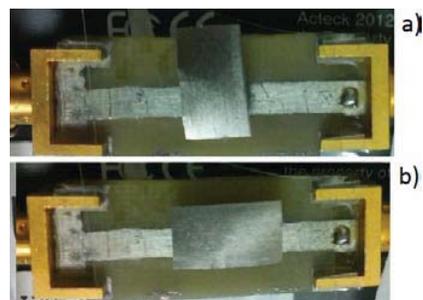
Posteriormente con el fin de comprobar la sensibilidad del prototipo de sensor ante

### 3.3 Respuesta del arreglo propuesto para el prototipo se sensor de campo magnético



**Figura 3.13:** Ajuste lineal de la medida 2.

muestras metálicas no-magnéticas y muestras magnéticas, se colocó un porta objetos sobre el arreglo de hilos ferromagnéticos a una altura de 1.27 mm y se propusieron 7 muestras oblongas diferentes: Oro (Au), Cobre (Cu), aleación de CoFeBSiCuNb, Vitrovac 6025 en cinta, Vitrovac 6025 en depósito de 197 nm, vitrovac 6030 y Niquel (Ni). Todas las muestras fueron medidas (tomando como base su lado mas largo) tanto de manera longitudinal como transversal a los hilos amorfos, figura 3.14.



**Figura 3.14:** Disposición de las muestras con respecto al arreglo de hilos ferromagnéticos de manera: a) transversal, b) longitudinal.

Para el caso del oro y el cobre no se registró cambio alguno, lo que resulta favorable para el prototipo, ya que estos materiales no son magnéticos. Para el caso de las otras 5 muestras las cuales si son magnéticas, resultaron cosas muy interesantes ya que el

---

### 3.3 Respuesta del arreglo propuesto para el prototipo se sensor de campo magnético

dispositivo fue capaz de detectar el campo inicial e incluso distinguir el eje de fácil magnetización de cada muestra. Los resultados se resumen en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Respuesta de prototipo de sensor ante diferentes muestras magnéticas

Muestra	Disposición	Valor inicial (Volts)	Valor con la muestra (Volts)
Aleación CoFeBSiNbCu	Transversal	1.29	1.305
	Longitudinal	1.29	1.311
Vitrovac 6025 (197 nm)	Transversal	1.291	1.293
	Longitudinal	1.292	1.298
Vitrovac 6025 cinta	Transversal	1.292	1.297
	Longitudinal	1.29	1.3
Vitrovac 6030	Transversal	1.287	1.312
	Longitudinal	1.293	1.303
Niquel	Transversal	1.287	1.25
	Longitudinal	1.292	1.194
Oro	Transversal	1.28	1.28
	Longitudinal	1.28	1.28
Cobre	Transversal	1.29	1.29
	Longitudinal	1.29	1.29

## Conclusiones y trabajo a futuro

---

Se realizaron pruebas con dos tipos de arreglos de sensor, uno de ellos fue con un solo hilo ferromagnético dispuesto sobre la línea *microcinta*, y el segundo con dos hilos paralelos, mismos que se fijaron a la cinta mediante pintura de plata, con el objetivo de crear una buena sujeción entre los elementos sensores y la línea de transmisión. Se observó que en el arreglo de un hilo (figura 3.1) tuvo la mejor respuesta en Magnetoimpedancia (10.42%) a una frecuencia de 10 MHz, mientras que el arreglo de dos hilos (figura 3.5) tuvo un cambio porcentual de (11.08%), a una frecuencia de 16 MHz. Si bien la amplitud de MI del arreglo de hilos paralelos no es mucho mayor que el de un hilo existen grandes diferencias en su respuesta. En primera instancia el arreglo de hilos paralelos se basó en los sensores fluxgate cuyo principio de operación se asocia con inductancias mutuas. sin embargo al realizar la caracterización de MI se tuvieron otros resultados asociados con acoplamientos entre procesos de magnetización.

Comparando las respuestas de impedancia  $|Z|$  de un hilo y el arreglo de hilos, lo mas importante a destacar es que en el arreglo de dos hilos amorfos, existe una menor dependencia de la impedancia con respecto a la frecuencia de alimentación, es decir, la impedancia se mantiene cuasi constante a lo largo de un intervalo de frecuencias de 5 MHz a 20 MHz. A diferencia de un solo hilo amorfo como elemento sensor, en el cual el valor de su impedancia cambia en todo el intervalo de frecuencias.

Otra diferencia importante es que mientras la respuesta en amplitud de un hilo amorfo decrece inversamente proporcional a la frecuencia, el arreglo de hilos amorfos presenta un máximo en su respuesta a la frecuencia de 16 MHz, posteriormente tiene un mínimo a la frecuencia de 45 MHz, y contrario a lo esperado, la señal comienza a invertir su sentido y a incrementar en amplitud.

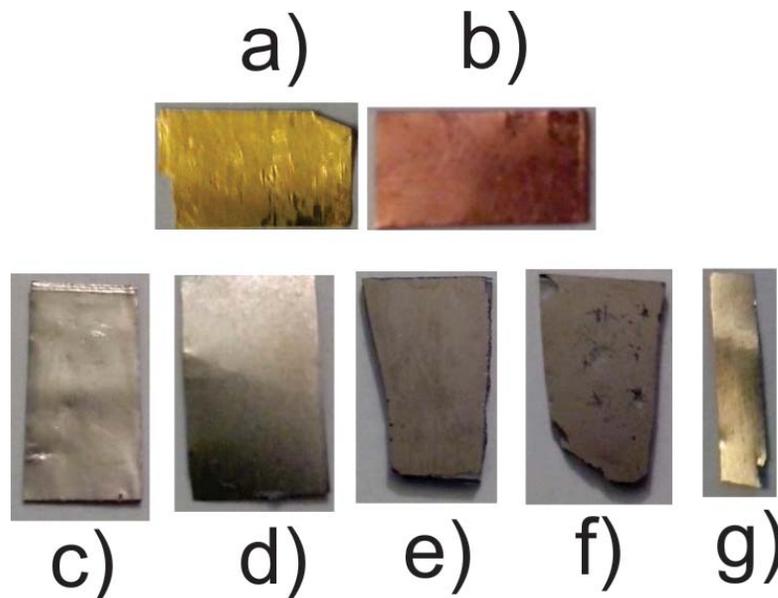
El diseño electrónico presentó algunos problemas debidos a la frecuencia, cuando se planteaba utilizar un solo hilo amorfo se trabajaba con un intervalo de frecuencias de 7 MHz a 10 MHz, sin embargo aún cuando el amplificador (LM318) tiene un ancho de banda a pequeña señal de 15 MHz no fue suficiente para tratar la señal. Por esta

---

razón se eligió el amplificador LM7171 (cuyas características se comentaron con anterioridad) el cual permitió aumentar la frecuencia para trabajar con el arreglo de hilos ferromagnéticos con gran estabilidad.

Una vez probados los circuitos electrónicos donde se incluyen las etapas del generador de funciones, la amplificación y acondicionamiento de señal, se realizaron pruebas con el arreglo de dos hilos paralelos, para ello se utilizó la bobina diseñada y caracterizada previamente, la cual se alimentó para generar campo magnético en el orden de los  $\mu\text{T}$ , observándose cambios en el nivel de DC que se asoció a la respuesta del elemento sensor. De lo anterior se puede concluir que el arreglo de dos hilos pudo sensar campos magnéticos en el orden de los  $\mu\text{T}$ , por lo que se cumplió el objetivo en cuanto a la resolución esperada del sensor.

Posteriormente se realizaron pruebas con muestras metálicas ferromagnéticas y metálicas no magnéticas, figura 4.1, observándose que para los metales (Au y Cu) no se registró cambio en el valor de la MI, tal como era esperado, ya que se trata de materiales que poseen propiedades diamagnéticas y por lo tanto no existen líneas de campo que puedan ser medidas, a diferencia de las aleaciones y el níquel utilizados, ya que estos tienen una magnetización que pudo ser detectada por el elemento sensor de acuerdo a los cambios registrados en el nivel de DC.



**Figura 4.1:** Muestra: a) Oro, b) Cobre, c) Níquel, d) vitrovac 6030, e) vitrovac 6025, f) vitrovac 6025 (197 nm), g) aleación CoSiBFeNbCu.

---

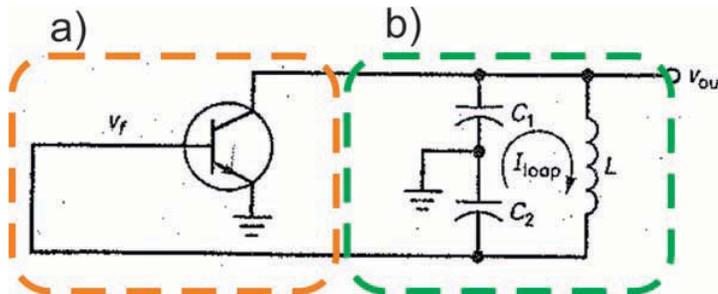
Se observaron cambios al colocar las muestras ferromagnéticas en orientaciones diferentes, principalmente de manera longitudinal y perpendicular a los hilos, tomando como referencia el eje longitudinal de las muestras. La muestra que presentó el mayor campo magnético fue el Níquel.

Aun cuando la respuesta del prototipo de sensor es muy prometedora por su sensibilidad y que es capaz de detectar la orientación de campo magnético, aun existe trabajo a futuro que se debe realizar. En primera instancia el sensor presenta un problema de estabilidad, debido a que los cambios se miden en décimas de mili Volt, y si el cambio de campo magnético es muy pequeño cuesta mucho trabajo tener una medida fija, por lo que se trabajó con el promedio. Otro problema que presenta el sensor es que no cuenta con un valor inicial o de referencia fijo, ya que es muy sensible a la alimentación y además dependiendo la magnitud de campo medido, tiende a quedarse con un remanencia lo que se ve reflejado en un aumento o disminución en el nivel de la señal medida.

Finalmente, se propone cambiar el arreglo electrónico para obtener una mejor respuesta; en cuanto al tratamiento de la señal, se propone realizar a una conversión analógica-digital de alta velocidad para evitar la pérdida de resolución cuando se convierte la señal alterna a un nivel de DC.

## Diseño del Oscilador Colpitts

Un oscilador se compone de dos partes principales, un circuito resonante (figura A.1 b)) y un circuito amplificador (figura A.1 a)) que se encarga de sostener la oscilación la correcta amplitud y fase (42).



**Figura A.1:** a) Etapa de amplificación. b) Circuito resonante (Tanque).

Un oscilador Colpitts es un oscilador tipo LC (Inductor-Capacitor) en el cual la parte resonante es un circuito tanque (compuesto por un divisor de voltaje capacitivo) y la amplificación se realizó con un transistor amplificador JFET canal-N (el cual es un amplificador para señales VHF/UHF<sup>1</sup>).

La mayoría de los osciladores LC, utilizan circuitos tanque con una  $Q^2$  mayor a 10. Con base en esto la frecuencia de resonancia aproximada se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{A.1})$$

<sup>1</sup>Very High Frequency/Ultra High Frequency

<sup>2</sup> $Q$  o factor de calidad, es un factor que indica que tan selectivo es un resonador.

Donde:  $f_r$  es la frecuencia de resonancia,  $L$  es la inductancia de la bobina y  $C$  es la capacitancia total del circuito tanque en el cual circula la corriente por  $C_1$  en serie con  $C_2$ , por lo tanto  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

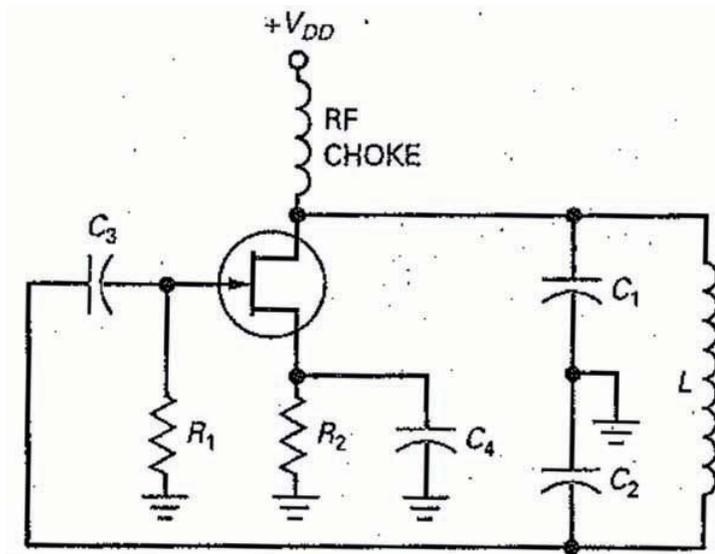


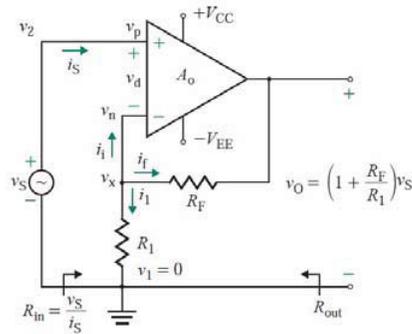
Figura A.2: Esquema general de un circuito oscilador colpitts con transistor JFET.

Para el caso particular del arreglo de hilos amorfos paralelos (el cual presentó la mejor respuesta en la caracterización por Magnetoimpedancia) la frecuencia de resonancia para el diseño del circuito es  $f_r = 16\text{MHz}$  y proponiendo un valor comercial de inductor  $L = 2.2\mu\text{H}$ . Despejando la ecuación A.1 y sustituyendo la frecuencia y el valor del inductor se tiene que la capacitancia total es  $\approx 45\text{pF}$ , sin embargo en la práctica el valor resultante de capacitancia total para obtener los 16 MHz de frecuencia de resonancia fue de  $C = 33.5\text{pF}$

# Análisis de circuitos de acondicionamiento

## B.1. Amplificador Operacional no inversor

El amplificador no inversor (figura B.1) fue utilizado en la etapa de pre-amplificación para amplificar la señal del oscilador y así ajustar la corriente que circula por el hilo amorfo y post-amplificación, para amplificar el voltaje del arreglo de hilos amorfos.



**Figura B.1:** Amplificador operacional en configuración no inversor.

Asumiendo un amplificador ideal el  $V_d = 0$ ,  $i_s$  y  $A_o = \infty$ . El voltaje  $v_x$  en la terminal inversora es:

$$V_x = V_s - V_d \approx v_s \quad (\text{B.1})$$

Usando la ley de corriente de Kirchhoff

$$i_1 + i_f + i_i = 0 \quad (\text{B.2})$$

por lo tanto, como la corriente  $i_i$  en un amplificador operacional es cero,  $i_1 = -i_f$ , entonces:

$$\frac{v_x}{R_1} = -\frac{v_x - v_O}{R_F} \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{v_s}{R_1} = -\frac{v_s - v_O}{R_F} \quad (\text{B.4})$$

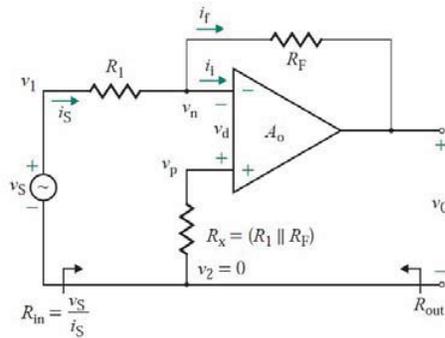
Por lo tanto despejando el voltaje de salida:

$$v_O = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)v_s \quad (\text{B.5})$$

Finalmente la ganancia se calcula de la siguiente manera:

$$A_f = \frac{v_O}{v_s} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (\text{B.6})$$

## B.2. Amplificador Operacional inversor



**Figura B.2:** Amplificador operacional en configuración inversor (11).

Mediante la ley de voltaje de Kirchhoff:

$$v_s = R_1 i_s - v_d \quad (\text{B.7})$$

$$-v_d = R_F i_f + v_O \quad (\text{B.8})$$

Aplicando la ley de corriente de Kirchhoff:

$$i_s = i_f + i_i \quad (\text{B.9})$$

Para el caso de un amplificador ideal,  $V_d \approx 0$  e  $i_i \approx 0$  por lo tanto la ecuación B.7 resulta:

$$v_s = R_1 i_s \tag{B.10}$$

Donde:

$$i_f = \frac{v_s}{R_1} \tag{B.11}$$

Sabiendo que de B.8:

$$R_F + v_O = 0 \tag{B.12}$$

y que la corriente de retroalimentación es:

$$i_f = -\frac{v_O}{R_F} \tag{B.13}$$

Como la impedancia de entrada es muy grande  $i_i \approx 0$ , por lo tanto la ecuación B.9 resulta:

$$i_s = i_f \rightarrow \frac{v_s}{R_1} = -\frac{v_O}{R_F} \tag{B.14}$$

Finalmente el voltaje de salida es:

$$v_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right)v_s \tag{B.15}$$

Por lo tanto la ganancia del circuito sera:

$$A_f = -\left(\frac{R_F}{R_1}\right) \tag{B.16}$$

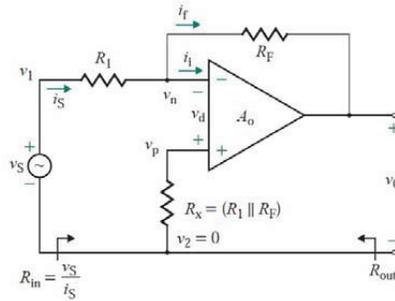


Figura B.3: Amplificador operacional en configuración diferencial (11).

### B.3. Amplificador Operacional diferencial

En la configuración diferencial, figura B.3, se aplican dos voltajes ( $v_a$  y  $v_b$ ), tanto en la terminal inversora como en la no inversora. Se utiliza el teorema de superposición para calcular el voltaje de salida  $v_O$ , por lo tanto el voltaje de salida es la suma de la salida debida a la fuente  $a$   $v_{oa}$  y la salida debida a la fuente  $b$   $v_{ob}$ .

El voltaje  $v_x$  está relacionado con el voltaje de entrada  $v_a$  mediante el divisor de voltaje:

$$v_x = \frac{R_x}{R_x + R_a} v_a \quad (\text{B.17})$$

Pasivando la fuente  $b$ , el amplificador operacional queda en configuración no inversor, por lo tanto el voltaje de salida debido a la fuente  $a$  es:

$$v_{oa} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) v_x = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_x}{R_x + R_a}\right) v_a \quad (\text{B.18})$$

Por otro lado pasivando la fuente  $a$  el voltaje debido a la fuente  $b$  es:

$$v_{ob} = -\frac{R_F}{R_1} v_b \quad (\text{B.19})$$

Por lo tanto el voltaje de salida resultante es:

$$v_O = v_{ob} + v_{oa} = -\frac{R_F}{R_1} v_b + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_x}{R_x + R_a}\right) v_a \quad (\text{B.20})$$

Si  $R_a = R_1$  y  $R_f = R_x$ :

$$v_O = (v_a - v_b) \frac{R_F}{R_1} \quad (\text{B.21})$$

## B.4. Amplificador Operacional integrador

El circuito integrador se basa en un circuito amplificador inversor, la diferencia es que se agrega un capacitor como retroalimentación. La función del capacitor es integrar la señal para obtener su valor promedio. Como la señal que entra al integrador es rectificadada de onda completa, el voltaje DC se obtiene de la siguiente manera (11, 43):

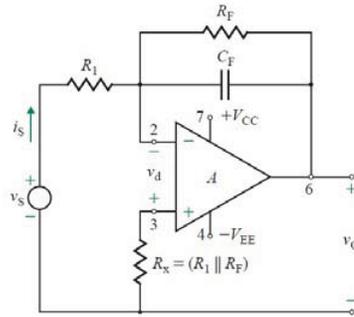


Figura B.4: Amplificador operacional en configuración integrador (11).

$$v_O = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin(\omega t) dt \quad (\text{B.22})$$

Desarrollando y considerando  $T = 2\pi$

$$v_O = \frac{1}{\pi} (-V_p \cos(\pi) + V_p \cos(0)) \int_0^{\pi} dt \quad (\text{B.23})$$

Finalmente

$$v_O = \frac{2V_p}{\pi} \quad (\text{B.24})$$

## B.5. Características del equipo Agilent 4395A en modo Analizador de Impedancias (1)

### Option 4395A-010 Impedance measurement

The following specifications are applied when the 43961A impedance test kit is connected to the 4395A.

#### Measurement functions

Measurement parameters

Display parameters

Z, Y, L, C, Q, R, X, G, B,  $\theta$   
 $|Z|$ ,  $Q_z$ , R, X,  $|Y|$ ,  $\theta_y$ , G, B,  $|\Gamma|$ ,  $\theta_\gamma$ ,  $\Gamma_x$ ,  $\Gamma_y$ , Cp, Cs,  
 Lp, Ls, Rp, Rs, D,  $\bar{Q}$

#### Display formats

- Vertical lin/log scale
- Complex plane
- Polar/Smith/admittance chart

#### Sweep parameters

- Linear frequency sweep
- Logarithmic frequency sweep
- List frequency sweep
- Power sweep (in dBm unit)

#### IF bandwidth

- 2, 10, 30, 100, 300, 1k, 3k, 10k, 30k [Hz]

#### Calibration

- OPEN/SHORT/LOAD 3 term calibration
- Fixture compensation
- Port extension correction

#### Measurement port type

- 7-mm

#### Output characteristics

Frequency range ..... 100 kHz to 500 MHz

Frequency resolution ..... 1 mHz

Output impedance ..... 50  $\Omega$  nominal

Output level  
 when the measurement port is terminated by 50  $\Omega$  <sup>1</sup> ..... -56 to +9 dBm  
 when the measurement port is open ..... 0.71 mVrms to 1.26 Vrms

Resolution ..... 0.1 dB

Level accuracy .....

frequency < 1 MHz —  $\pm (A + 3)$  [dB]

frequency  $\geq$  1 MHz —  $\pm (A + 1)$  [dB]

where, A is the sum total of level accuracy, level linearity and level flatness specifications for output characteristics of network measurement.

## Bibliografía

---

- [1] Agilent Technologies. *Agilent 4395A Network/Spectrum/Impedance Analyzer Data Sheet*. Agilent Tech. Inc., 2008. [xii](#), [60](#)
- [2] J. Stöhr and H.C. Siegmann. *Magnetism: From Fundamentals to Nanoscale Dynamics*. Springer Series in Solid-State Sciences. Springer, 2006. [xiii](#), [xiii](#), [xiii](#), [1](#), [2](#), [3](#), [4](#), [6](#), [7](#), [8](#), [9](#), [17](#)
- [3] J.M.D. Coey. *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 2010. [xiii](#), [1](#), [2](#), [3](#)
- [4] C.W. Chen. *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials*. Dover Books on Physics. Dover Publications, 2013. [xiii](#), [12](#)
- [5] Michael J Caruso, Tamara Bratland, Carl H Smith, and Robert Schneider. A new perspective on magnetic field sensing. *SENSORS-PETERBOROUGH-*, 15:34–47, 1998. [xiii](#), [13](#), [15](#)
- [6] S. Tumanski. *Handbook of Magnetic Measurements*. Series in Sensors. CRC Press, 2011. [xiii](#), [15](#)
- [7] J. Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer, 2010. [xiii](#), [16](#), [17](#)
- [8] Manh-Huong Phan and Hua-Xin Peng. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*, 53(2):323–420, 2008. [xiii](#), [19](#), [20](#)
- [9] Arturo Mendoza Castrejón and María Herlinda Montiel Sánchez. *Desarrollo de un sensor de detección de campo magnético usando el fenómeno de magnetoimpedancia / tesis que para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería (Ingeniería Eléctrica), presenta Arturo Mendoza Castrejón ; tutor principal de tesis María Herlinda Montiel Sánchez*. 2014. [xiii](#), [6](#), [7](#), [8](#), [13](#), [18](#), [21](#), [23](#), [25](#), [28](#)
- [10] I Ogasawara and S Ueno. Preparation and properties of amorphous wires. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 31(2):1219–1223, 1995. [xiii](#), [25](#), [26](#)

- 
- [11] M. Rashid. *Microelectronic Circuits: Analysis & Design*. Cengage Learning, 2010. xv, xv, xv, 56, 58, 59
- [12] W. Göpel, H. Meixner, J. Hesse, and J.N. Zemel. *Sensors: a comprehensive survey. Micro- and nanosensor technology/trends in sensor markets*. Sensors: A Comprehensive Survey. VCH, 1995. xvi, 11, 14
- [13] D.J. Dunlop and Ö. Özdemir. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge Studies in Magnetism. Cambridge University Press, 2001. 3
- [14] E. Du Trémolet de Lacheisserie, D. Gignoux, and M. Schlenker. *Magnetism*. Number v. 1 in Collection Grenoble Sciences. Springer, 2005. 3
- [15] K.H.J. Buschow and F.R. Boer. *Physics of Magnetism and Magnetic Materials*. Focus on biotechnology. Springer, 2003. 4
- [16] N.A. Spaldin. *Magnetic Materials: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press, 2010. 4
- [17] Eduardo López Molina and María Herlinda Montiel Sánchez. *Estudio del fenómeno de magnetoimpedancia y resonancia ferromagnética en tricapas metálicas / tesis que para obtener el grado de Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, presenta Eduardo López Molina ; tutora principal de tesis María Herlinda Montiel Sánchez*. 2013. 4, 6, 7, 19, 20, 23
- [18] D. Askeland and P. Fulay. *The Science & Engineering of Materials*. Cengage Learning, 2005. 6
- [19] M. Getzlaff. *Fundamentals of Magnetism*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. 6
- [20] C.G. Stefanita. *Magnetism: Basics and Applications*. SpringerLink : Bücher. Springer, 2012. 7
- [21] D. Sirdeshmukh, L. Sirdeshmukh, K.G. Subhadra, and C.S. Sunandana. *Electrical, Electronic and Magnetic Properties of Solids*. Springer Series in Materials Science. Springer International Publishing, 2014. 7
- [22] G. Bertotti. *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Academic Press series in electromagnetism. Academic Press, 1998. 10
- [23] I. Sinclair. *Sensors and Transducers*. Elsevier Science, 2000. 12
- [24] James Lenz and Alan S Edelman. Magnetic sensors and their applications. *Sensors Journal, IEEE*, 6(3):631–649, 2006. 15
- [25] G. Meijer. *Smart Sensor Systems*. Wiley, 2008. 16
- [26] P. Ripka. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House remote sensing library. Artech House, 2001. 16

- 
- [27] P. Ripka and A. Tipek. *Modern Sensors Handbook*. ISTE. Wiley, 2013. 18
- [28] *Sensing and Control: Sensores Magnetorresistivos de IC, serie Nanopower*. 2014. 18
- [29] Y. Liu, D.J. Sellmyer, and D. Shindo. *Handbook of Advanced Magnetic Materials*. Number v. 2. Springer, 2005. 18
- [30] R.J. Gibbs and North Atlantic Treaty Organization. Scientific Affairs Division. *Modern Trends in Magnetostriction Study and Application*. NATO science series: Mathematics, physics, and chemistry. Springer Netherlands, 2001. 18, 19
- [31] C. Tannous and J. Gieraltowski. Giant Magneto-Impedance and its Applications. *ArXiv Physics e-prints*, August 2002. 18
- [32] Amruta Borge. *Giant magneto-impedance effect in thin film layered structures*. PhD thesis, University of Central Florida Orlando, Florida, 2005. 20
- [33] F.T. Ulaby, E. Michielssen, and U. Ravaioli. *Fundamentals of Applied Electromagnetics*. Prentice Hall, 2010. 21
- [34] L.V Panina, K Mohri, K Bushida, and M Noda. Giant magneto-impedance and magneto-inductive effects in amorphous alloys. *Journal of Applied Physics*, 76(10):6198–6203, 1994. 21, 23
- [35] M Knobel and KR Pirota. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 242:33–40, 2002. 22, 23
- [36] Anh-Tuan Le and Manh-Huong Phan. Advanced magnetic microwires as sensing elements for lc-resonant-type magnetoimpedance sensors: a comprehensive review. *Journal of superconductivity and novel magnetism*, 25(2):181–195, 2012. 22
- [37] M Hinojosa M, Reyes. Estructura de sólidos amorfos. *Revista ingenierías, FIME, UANL*, III(9):7–14, 2000. 24
- [38] Valenzuela Manjares R. G. Vazquez, M. *Aplicaciones de sensores basados en el efecto de magnetoimpedancia / tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico*. 2001. 24
- [39] Karin Liliana García and Raul Alejandro Valenzuela Monjaraz. *Correlacion entre los procesos de magnetizacion y el efecto de la magnetoimpedancia en hilos ferromagnéticos amorfos / tesis que para obtener el título de Fisico, presenta Karin Liliana Garcia Hernandez*. 2001. 25
- [40] Sanz Aurelio Bava, Jose. *Técnicas de diseño de amplificadores en microondas*. Universidad Nacional de la Plata, 1999. 28
- [41] P.A. Tipler and G. Mosca. *Physics for Scientists and Engineers: With Modern Physics*. W. H. Freeman, 2008. 36
-

- [42] A. Malvino and D. Bates. *Electronic Principles*. McGraw-Hill Education, 2015. 53
- [43] R.F. Coughlin, F.F. Driscoll, and R.B. Gutiérrez. *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. Pearson Educación, 1999. 59