



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

**INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE LA TÉCNICA
DE MAGNETOIMPEDANCIA PARA MATERIALES
FERROMAGNÉTICOS SUAVES**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A

BENITO CASAÑAS SÁNCHEZ

Tutor:

DRA. MARÍA HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ

Ciudad Universitaria.

2012

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Castañeda Guzmán Rosalba.
Secretario: Dr. Sandoval Romero Gabriel Eduardo.
Vocal: Dra. Montiel Sánchez María Herlinda.
1er Suplente: Dr. Garduño Mejía Jesús
2do Suplente: Dr. Velasco Herrera Victor Manuel

Lugar donde se realizó la Tesis:

**“UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO”
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLA TECNOLÓGICO**

Tutor de tesis:

Dra. María Herlinda Montiel Sánchez

Firma

El infinito matemático se da en la realidad... Tenemos, pues, un infinito no sólo de primero sino además de segundo grado y podemos dejar a cargo de la imaginación de los lectores la construcción de nuevos infinitos de un grado más elevado en el espacio infinito, si tienen deseos de hacerlo.

Friedrich Engels

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.

Proyecto ICyTDF PIFUT-123

A todos y cada uno de mis Profesores y jurado de tesis por su guía, tiempo, atención, comprensión y afecto.

Debo expresar mi más sincera gratitud y aprecio a mi directora de Tesis Doctora Herlinda Montiel Sánchez. Por concederme el privilegio de colaborar con ella, por su disposición incondicional, por el soporte académico recibido y por difundir su conocimiento.

A mi familia por su soporte y atención.

A todos, gracias.

Benito Casañas Sánchez.

Índice General.

Tabla de Contenido.

A. Objetivo general.....	10
B. Objetivos particulares.....	10
C. Metodología.....	11
D. Organización de la tesis.....	11
Capítulo 1.....	12
Marco teórico.	12
1.1. Resumen Teórico.....	12
1.2. Relación de microondas a dispositivos electrónicos.....	16
1.3. Consideraciones básicas de la Teoría electromagnética.....	19
1.4. La Ley de Biot-Savart.....	22
1.5. Contribución magnética de los átomos.....	23
1.6. Espín de electrones.....	24
1.7. Diamagnetismo.....	25
1.8. Paramagnetismo.....	26
1.9. Ferromagnetismo.....	27
Capítulo 2.....	29
Efecto Magnetoimpedancia.	29
2.1. Efecto Magnetoimpedancia.....	30
2.2. Arreglo experimenta de la instrumentación para la medición del fenómeno de Magnetoimpedancia para materiales ferromagnéticos suaves.....	30
2.3. Magnetoimpedancia Gigante MIG.....	32
2.4. Tipos de muestras en los experimentos de Magnetoimpedancia.....	33
Capítulo 3.....	37
Construcción del prototipo.	37
3.1. Especificación de componentes.....	37
3.2. Analizador de Impedancias AGILENT 4395 A.....	38
3.2.1. “Test kit” Equipo de Pruebas para el modo de Analizador de Impedancia.....	40
3.2.2. “Test fixtures” Accesorio de Prueba.....	41
3.3. Bobinas de Helmholtz.....	42
3.4. Carga resistiva de calibración para frecuencias intermedias y alta frecuencia.....	42

3.5.	Implementación de la Herramienta para la adquisición de señales o datos en código ASCII y/o por el Analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales AGILENT 4395. ....	.txt 46
3.6.	Implementación de la Herramienta para el control de la Fuente de alimentación KEPCO BIPOLAR OPERATIONAL POWER SUPPLY/AMPLIFIER Modelo: BOP 100-4M.	47
3.7.	Fuente de Alimentación de Corriente AC.	48
3.8.	Circuito de Acondicionamiento.	49
3.9.	Configuración del circuito de acondicionamiento.	50
3.9.1.	Etapa 1: “Linear Buffer” Seguidor de Voltaje.	50
3.9.2.	Etapa 2: Circuito en configuración sumador-restador y amplificador.	50
3.10.	<i>Lista de componentes.</i>	53
3.11.	<i>Circuito electrónico para ensamble tarjeta PCB.</i>	54
3.12.	INTERFASE GRAFICA DE USUARIO.	55
3.13.	Zócalo de Montaje.	58
3.14.	Porta muestras	59
Capítulo 4.	.....	61
Bobinas de Helmholtz	.....	61
Principio de operación Bobinas de Helmholtz.	.....	61
4.1.	Ecuaciones para la Bobina de Helmholtz.	63
4.2.	Construcción de Carretes.	68
4.3.	Conductor eléctrico de embobinado. Alambre esmaltado.	69
4.4.	Cálculo del número de espiras por carrete.	71
4.5.	Caracterización de la Bobina de Helmholtz.	73
	Conducción de carga a través de un sólido homogéneo.	73
4.6.	Efecto de la variación de la temperatura en la resistividad.	77
Capítulo 5.	.....	80
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	.....	80
5.1.	Arreglo experimental	80
5.2.	Curvas obtenidas a partir del parámetro de calibración para altas frecuencias línea “microstrip” colocado en el “Test fixtures” Accesorio de Pruebas.	81
5.3.	Mediciones de magnetoimpedancia.	84
5.4.	Conclusiones.	90
5.5.	Trabajos a Futuro.	91
REFERENCIAS.	.....	92

Índice de figuras.

Capítulo 1

Figura 1 Corte de conductor eléctrico.

Figura 1.1 Espectro electromagnético.

Figura 1.1a Vista ampliada de la región de microondas

Figura 1.1a Vista ampliada de la región de microondas

Figura 1.2 Un campo eléctrico E , varía en el tiempo, genera un campo magnético B que es en todas partes perpendicular a la dirección en la que E se propaga.

Figura 1.3 Un campo B variable con el tiempo genera un campo E que es perpendicular en todas partes a la dirección en la que B cambia o se propaga.

Figura 1.4 Campo eléctrico E producido por la carga q .

Figura 1.5 Simplificación Electrón girando alrededor del núcleo del átomo.

Figura 1.6 Dirección de los vectores momento magnético momentum angular para un electrón.

Figura 1.7 Las dos direcciones del espín corresponden a los dos valores posibles para el número cuántico $m_s +1/2$ o $-1/2$.

Figura 1.8 Tipo de comportamiento magnético. Diamagnético: Los átomos no poseen momentos magnéticos intrínsecos

. **Figura 1.9** Tipo de comportamiento magnético. Paramagnético: Los átomos poseen momentos magnéticos intrínsecos (interiores), tienden a alinearse al azar.

Figura 1.10. Ferromagnético: Centros acoplados alineados en una dirección común.

Capítulo 2

Figura 2.1 Requerimientos mínimos para la instrumentación de la técnica de Magnetoimpedancia. a y b ejemplifican la entrada y salida respectivamente del bloque.

Figura 2.2 Ilustración medición de impedancia Básica.

Capítulo 3

Figura 3.0 Diagrama esquemático.

Figura 3.1 Analizador AGILENT 4395 A Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales.

Figura 3.2 Diagrama a bloque: Medición de señal de barrido transmitida.

Figura 3.3 Equipo de prueba para iniciar la medición en modo analizador de impedancia del Agilent 4395A

Figura 3.3a Isométrico. "Test fixtures" Accesorio de Prueba AGILENT 43961A

Figura 3.3b Isométrico. "Test fixtures" y "Test Kit" AGILENT 43961^a

Figura 3.4 Línea microstrip

Figura 3.4a Sección transversal de una Línea microstrip.

Figura 3.5 Ilustración de la superficie laminar de cobre.

Figura 3.6 Formulación Diseño de Línea "Microstrip".

Figura 3.7 Impedancia característica de las líneas "Microstrip"

Figura 3.8 Bloque de programación Herramienta para la adquisición de señales o datos en código ASCII y/o .txt

Figura 3.9 Bloque de programación para el control de la fuente de alimentación KEPCO

Figura 3.10 Diagrama esquemático para el control de la fuente de alimentación controlada por voltaje.

Figura 3.11 Etapa de aislamiento en un sistema electrónico convencional. a y b ejemplifican la entrada y salida respectivamente del bloque.

Figura 3.12 Amplificador operacional como "Linear Buffer"

Figura 3.13 Diagrama esquemático Circuito de acondicionamiento.

Figura 3.14 Diagrama esquemático Circuito de acondicionamiento completo.

Figura 3.15 Circuito impreso del Circuito de acondicionamiento completo (PCB)

Figura 3.16 Interfase grafica de usuario para la medición de Magnetoimpedancia

Figura 3.17 Conexión de los periféricos a la Unidad central de procesos (CPU).

Figura 3.18 Conexión en Bus.

Figura 3.19 Base zócalo de montaje de bobinas.

Figura 3.20 Base zócalo de montaje de bobinas y porta muestra. Todas las cotas están dadas en milímetros.

Figura 3.21 Ubicación de la muestra bajo prueba.

Figura 3.22 Vista de porta muestras con Nylomaq 90.

Capítulo 4

Figura 4.1. Vista 2D Geometría Helmholtz.

Figura 4.2 Vista 3D Geometría Helmholtz

Figura 4.3. Descripción de componentes en una espira de conductor eléctrico.

Figura 4.4 Vista 3D Isométrico. Carrete para bobina sin conductor eléctrico, todas las cotas están dadas en milímetros.

Figura 4.6 Proceso de embobinado.

Figura 4.7 Bobinas de Helmholtz maquinada y con carretes embobinados.

Figura 3.8 Medición de la respuesta de la Bobina de Helmholtz.

Figura 4.9 Esquema de las andas de energía para los electrones de un átomo

Figura 4.10 a) Representación esquemática de las bandas de energía b) Estructura cristalina para el cobre.

Capítulo 5

Figura 5.1 Arreglo experimental medición de Magnetoimpedancia

Figura 5.2 Curva experimental típica de medición Magnetoimpedancia en Vitrovac a dos diferentes frecuencias como función de un capo magnético aplicado.

Figura 5.3 Arreglo de conexión básico para medición de Magnetoimpedancia

Figura 5.4. Curva de la medición del parámetro de calibración para altas frecuencias línea "microstrip".

Figura 5.5 Medición del parámetro de calibración.

Resumen.

Los materiales magnéticos amorfos en forma de cintas de composición CoFeBSi han atraído considerablemente la atención desde la década de 1980 debido a sus aplicaciones en dispositivos electrónicos. El interés por estos materiales se ha fortalecido debido al fenómeno de Magnetoimpedancia observado en ellos a principio de la década de 1990 ya que presentan gran potencialidad para su uso como sensores de campo magnético. El efecto de Magnetoimpedancia se ha estudiado en muestras en forma de hilos ricos en hierro nanocristalinos tras ser sometidos a diferentes tratamientos térmicos, cintas ricas en cobalto y películas delgadas multicapa.[1]

El efecto de Magnetoimpedancia se define como el cambio en la impedancia eléctrica de corriente alterna en un material conductor ferromagnético suave cuando circula una señal de corriente eléctrica alterna de baja intensidad y frecuencia constante, con el propósito de inducir un campo alterno H_{ac} , en presencia de un campo magnético H_{dc} externo. Los cambios en la impedancia eléctrica son originados por la reorientación de la magnetización del material con un campo magnético de corriente directa H_{dc} , como consecuencia estos cambios en la impedancia reflejan modificaciones en la estructura magnética. La dependencia de la impedancia con el campo magnético es inducida por la habilidad de los mecanismos de magnetización de responder al campo inducido por la corriente alterna H_{ac} . Por lo que el incremento en la impedancia es función de la permeabilidad del material en la dirección del campo inducido por la corriente alterna. En física un efecto constituye un fenómeno que se genera por una causa específica y que aparece acompañado de manifestaciones puntuales que pueden ser establecidas de forma cualitativa y cuantitativa. Por lo anterior la Magnetoimpedancia es un efecto físico que se origina por el cambio de la impedancia eléctrica debida a la reorientación de la magnetización del material ferromagnético con un campo magnético de corriente directa, este cambio en la impedancia eléctrica puede ser establecido cualitativa en forma de curvas características y cuantitativa en forma de resultados numéricos sobre dichas curvas.

La frecuencia de la corriente de excitación depende de los tiempos de relajación de los procesos de magnetización dinámicos. El fenómeno de Magnetoimpedancia permite desarrollar aplicaciones tanto en el ámbito de telecomunicaciones como en el desarrollo de sensores magnéticos. Por otra parte la región baja del espectro, de 300 kHz a 300 MHz es llamada de radiofrecuencia, contiene las frecuencias medias (“Medium Frequency” MF), frecuencias altas (“High Frequency” HF) y las muy altas frecuencias (“Very High Frequency” VHF). Este rango de frecuencias está por debajo de las microondas, sin embargo es de suma importancia en las comunicaciones comerciales; los transistores, circuitos discretos y circuitos alambrados pueden ser empleados en este intervalo de frecuencia. En este intervalo de frecuencia se encuentran las ondas de difusión de radio AM, radio de onda corta, la difusión de radio FM, la radio móvil (telefonía móvil), y los canales de televisión en VHF. La banda de las microondas se extiende de 300 MHz a 300 GHz. Este intervalo de frecuencia de 300 MHz a 3 GHz se denomina banda de ultra alta frecuencia (“Ultra High Frequency” UHF). De 3 a 30 GHz es la banda de súper alta

frecuencia (“Super High Frequency” SHF). Finalmente de 30 a 300 GHz es la banda de extremadamente alta frecuencia (“Extremely High Frequency” EHF).[3]

En este sentido, la tesis está organizada en cinco capítulos, el capítulo 1, presenta un marco teórico que contiene información básica necesaria para comprender el contenido de la parte de instrumentación de la técnica de medición Magnetoimpedancia de materiales ferromagnéticos suaves, teoría de ondas electromagnéticas, Campo eléctrico y Campo magnético. En el capítulo 2 se inicia una breve definición de antecedentes de Magnetoimpedancia, así como el efecto superficial presente en muestras de materiales ferromagnéticos.

El capítulo 3 está dedicado a la instrumentación y definición de los dispositivos empleados en el arreglo experimental utilizados en el transcurso del proyecto. Se explican las partes del analizador AGILENT 4395A como medidor de variables físicas, el cual presenta tres modos de operación: analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales, el “Test Fixtures”, la línea “Microstrip” y la implementación de la herramienta para la adquisición de señales en forma de dato en código ASCII y/o formato .txt dirigida al Analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales AGILENT 4395.

El capítulo 4 está dedicado a la construcción de la Bobina de Helmholtz así como al análisis matemático para calcular la densidad de flujo magnético a partir del rotacional del potencial magnético partiendo de una espira de radio a y posteriormente para una bobina con N número de espiras. Se hace referencia al maquinado de los carretes los cuales son el soporte de los embobidos, los criterios de selección del conductor eléctrico, la base y la montura de prueba.

En el capítulo 5 se considera y se da una interpretación de los resultados experimentales obtenidos a partir de la medición de Magnetoimpedancia de un microhilo metálico amorfo con propiedades de un ferromagnético (FeCoSiB), así mismo se enlista el montaje físico del experimento y el análisis de las curvas obtenidas.

A. Objetivo general.

El objetivo principal del trabajo de tesis es la instrumentación de un sistema de medición de la técnica de Magnetoimpedancia en materiales ferromagnéticos suaves, tales como hilos, cintas y películas delgadas. Estas mediciones deben realizarse en condiciones tales que el sistema presente su máxima sensibilidad, tener la posibilidad de adquisición de datos y los resultados sean reproducibles. Esto requiere, procesar señales de frecuencia intermedia del orden de radiofrecuencia (500 KHz. a 100 Mhz.) y alta frecuencia en el rango de 300 a 500 MHz. Adicionalmente se necesita la construcción de Bobinas de Helmholtz, para generar y controlar campo magnético DC.

B. Objetivos particulares.

- Desarrollo y aprendizaje de técnicas de medición de impedancia eléctrica en frecuencia intermedia y frecuencia alta que preferentemente sean sencillas de emplear y que se adapten al equipamiento.
- Una vez realizadas las mediciones, procesar los datos obtenidos con el objetivo de caracterizar el efecto de Magnetoimpedancia en las muestras estudiadas.
- Calcular y fabricar el arreglo conocido como bobinas de Helmholtz, así como la elección de los materiales para el maquinado de los carretes. Dimensionar el conductor eléctrico apropiado para el cuerpo de las espiras o arrollamiento y dimensionar la base o zócalo de montaje.
- Trazar un parámetro de calibración para frecuencias bajas, frecuencias intermedias (“Radio Frecuencia” RF) y altas frecuencias (hasta 1 GHz) basado en una línea de transmisión “Microstrip”.
- Diseñar en Autodesk CAD 3D una montura en la cual se fijara un portamuestras, el cual colocara a la muestra bajo estudio en una región de campo magnético uniforme en el centro geométrico de las Bobinas de Helmholtz.
- Construir con electrónica analógica un circuito de acondicionamiento de señales para el control de una fuente de alimentación de corriente bipolar controlada por voltaje marca KEPCO modelo BOP 100-4M.
- Fabricar una fuente confiable para alimentar la etapa de acondicionamiento de señales la cual proporciona dos señales de voltaje de corriente directa de ± 15 Volts .

- Desarrollar en lenguaje gráfico de programación de National Instruments LabVIEW versión 8.5 una interfase gráfica de usuario amigable que permita la interacción del usuario con el entorno del sistema de medición de Magnetoimpedancia para materiales ferromagnéticos suaves.

C. Metodología.

- Estudiar el estado del arte referente a técnicas de medición de Impedancia eléctrica, prototipos de instrumentación hacia la medición de Magnetoimpedancia, por último, aplicaciones, caracterización y construcción de Bobinas de Helmholtz.
- Revisión de normas y documentos relativos a embobinados.
- Determinar un criterio de construcción de bobinas que resistieran incrementos de temperatura de operación.
- Separar la instrumentación de la técnica en Bloques funcionales.
- Realizar los análisis necesarios para obtener las ecuaciones que involucren todas las variables en la construcción de las bobinas de Helmholtz.
- Las pruebas se realizarán sobre cada bloque. Si los resultados no son los esperados se trabajará paralelamente con bloques siguientes. Pruebas de ensayo y error se llevarán a cabo hasta lograr resultados satisfactorios de los bloques bajo estudio.
- Con referencia a la programación del analizador de impedancias se realizará una interfaz gráfica de usuario en lenguaje de programación gráfica NI LabVIEW versión 8.5 para la interacción del usuario con la adquisición de datos.

D. Organización de la tesis.

En el capítulo 1 se encuentra el marco teórico. La definición de Magnetoimpedancia y el arreglo experimental detallado se abordará en el capítulo 2. En el capítulo 3 se detallará la construcción del prototipo de medición de la técnica de medición de Magnetoimpedancia, mientras que en capítulo 4 está dedicado a la construcción de la Bobina de Helmholtz así como al análisis matemático para calcular la densidad de flujo magnético a partir del rotacional del potencial magnético partiendo de una espira de radio a y posteriormente para una bobina con N número de espiras. El capítulo 5 consta de los resultados experimentales obtenidos, conclusiones y trabajos a futuro.

Capítulo 1

Marco teórico.

A través del tiempo, el ser humano ha experimentado interés sobre la interacción de la materia y la energía electromagnética. Vivimos en un mundo inmerso en ondas electromagnéticas (Campo eléctrico y Campo Magnético) en todo su vasto espectro desde las ondas de muy baja frecuencia como la energía eléctrica generada por un alternador-generador eléctrico síncrono sin escobillas, ondas de baja frecuencia de Radio hasta la energía electromagnética de las ondas de Rayos Gamma pasando por las Microondas, infrarrojo y luz visible, por lo tanto las ondas de Radiofrecuencia y Microondas es uno de los conceptos mas familiares en nuestro contexto. Medimos intensidades y longitudes de onda, nos interesa todo lo que conocemos acerca de nuestro entorno y sus formas de interacción con los materiales.

En esta sección se estudia el marco teórico y conceptos básicos de magnetismo.

1.1. Resumen Teórico.

Intensidad y densidad de Corriente.

Para estudiar las corrientes en su forma no integral dentro de una superficie, se define un campo vectorial \vec{j} (densidad de corriente) cuyo módulo es la intensidad de corriente por unidad de superficie (en el punto considerado) y su dirección y sentido son los del movimiento de las cargas en cada punto:

$$\vec{j} = \frac{dI}{ds} \vec{u} \quad 1.1$$

Donde \vec{u} es el vector unitario en el sentido del movimiento de las cargas en el punto. Por tanto en cada superficie:

$$I = \iint \vec{j} \cdot \vec{ds} \quad 1.2$$

Conservación de la carga.

El fenómeno de la corriente eléctrica consiste en cargas en movimiento, que no se crean ni destruyen, simplemente se desplazan. Puede aumentar o disminuir la concentración de las cargas libres en las superficies de los conductores, lo que altera la neutralidad natural de sus átomos, quedando cargados positiva o negativamente. Si consideramos cualquier elemento infinitesimal de volumen, el flujo de carga a través de la superficie que lo encierra es igual a la disminución por unidad de tiempo de la carga interior a dicho volumen, puesto que ésta no se crea ni se destruye solamente sale o entra en el mismo. Aplicando el teorema de Gauss a la parte izquierda de la igualdad y dividiendo ambos miembros por el volumen del elemento, nos queda la ecuación continuidad que permite escribir matemáticamente la conservación de la carga:

$$\nabla \cdot \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 1.3$$

Si en algún punto existe alguna divergencia en \vec{j} no es porque se esté creando o destruyendo carga en él, sino porque está disminuyendo o aumentando la densidad de carga en el mismo, puesto que ésta se conserva. Las cargas se mueven porque actúa una fuerza (causada, por ejemplo, por el campo eléctrico) sobre ellas. Según sea el material así será el movimiento de las cargas. Se distinguen tres grandes tipos de materiales denominados genéricamente conductores, semiconductores y aislantes.

Conductor eléctrico.

Los conductores son materiales con electrones libres que debido a la naturaleza de su enlace metálico los electrones pueden moverse de un átomo a otro, por la interacción de un campo eléctrico. La ley de Ohm establece que existe una constante, aunque normalmente disminuye con la temperatura, denominada conductividad eléctrica σ , que es el coeficiente de proporcionalidad entre el campo eléctrico \vec{E} aplicado y la densidad de corriente \vec{j} originada. De modo que:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad 1.4$$

Si \vec{E} es constante en el tiempo también lo es \vec{j} , lo que significa que las cargas libres de los conductores se mueven en ellos con velocidad constante y no aceleradamente aunque el campo eléctrico ejerza una fuerza constante sobre ellos. Esto es, análogo, a un cuerpo que se desplace por una superficie, va rozando con las cargas fijas de los átomos produciéndose el fenómeno de la resistencia eléctrica, originando que las cargas móviles no aumentan su energía cinética porque la van transmitiendo a las cargas fijas, que aumentan su agitación, esto se manifiesta con el

incremento de temperatura del conductor, lo que limita la densidad de corriente \vec{j} máxima admisible adyacente, que ya no tienen como contornos conductores equipotenciales.

Fuerza y campo magnético.

La materia está compuesta de átomos constituidos por núcleos y de cargas eléctricas negativas que orbitan alrededor de él. Además de ese movimiento orbital, algunos de los electrones denominados libres pueden desplazarse entre átomos originando una corriente eléctrica. Observadas a distancias mucho mayores que las atómicas, las cargas orbitales permanecen situadas en una región o punto dentro de la estructura cristalina, lo que permite que se les considere estáticas. La presencia de cargas orbitales da lugar a fuerzas y campos electrostáticos que actúan sobre cualquier otra carga en reposo. Si las cargas se mueven con velocidad \vec{V} se observa que, además de la fuerza electrostática, experimentan otra fuerza denominada magnética, de manera que la fuerza total es:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad 1.5$$

El primer término es qE la fuerza eléctrica y el segundo término es la fuerza magnética. Esta segunda actúa solo sobre las cargas móviles en las que $\vec{V} \neq 0$ y depende de un campo magnético \vec{B} .

Relación de campo eléctrico y magnético.

Se dice que el campo electrostático está creado por las cargas en reposo y el magnético lo está por las cargas en movimiento, se dice que ambos campos tienen un valor diferente para diferentes observadores en movimiento relativo, puesto que la velocidad de cada carga es distinta para cada uno de ellos, uno puede ver en reposo a una carga que otro ve en movimiento. La relación entre los diferentes campos \vec{E} y \vec{B} , y que miden dos observadores en movimiento relativo, la establece la teoría de la relatividad, pero en los casos en los que las velocidades de las cargas sean despreciables frente a la de la luz, como en las corrientes dentro de los conductores, que son las únicas que vamos a tratar, las relaciones entre los campos vistos por un observador 2 y otro observador 1 que se mueve con una velocidad \vec{V}_1 respecto a aquel, son:

$$\vec{B}_1 = \vec{B}_2 = \vec{B}$$

La fuerza magnética $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$ puede formularse para la corriente que circula por un conductor. En este caso, sobre el conjunto de cargas móviles contenidas en cada dv del mismo actúa una fuerza magnética que se expresa como:

$$\overline{d\vec{F}} = \vec{j} \times \vec{B} dv \quad 1.6$$

La fuerza magnética es perpendicular a la velocidad de las cargas sobre las que actúa, por lo tanto, no puede realizar ningún trabajo sobre ellas. Sin embargo, sabemos que cualquier conductor por el cual circula una corriente I en presencia de un campo magnético \vec{B} experimenta una fuerza perpendicular a I y a \vec{B} , como se ve en la figura 1.

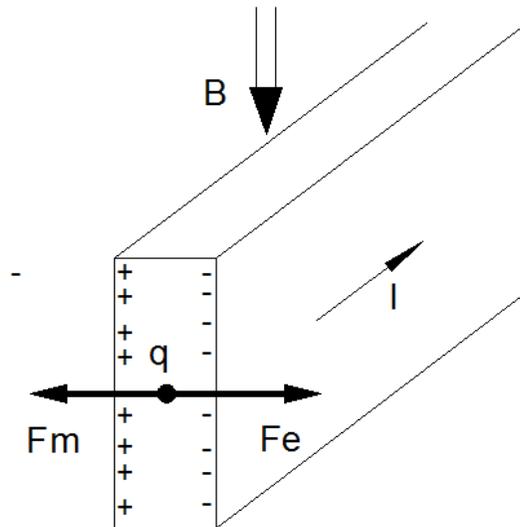


Figura 1 Corte de conductor eléctrico.

Solamente las cargas móviles como la q de la figura 1 experimentan la fuerza magnética que tiende a desplazarlas perpendicularmente a la corriente, alterando el equilibrio electrostático del total de cargas existentes compuesto por las móviles que son una pequeña fracción y las fijas, que son la gran mayoría. Eso crea una acumulación de cargas positivas y negativas. La acumulación de cargas positivas y negativas son muy pequeñas, su medición experimental se debe a HALL, basta que las cargas móviles se desplacen unas fracciones de radio atómico, para que las cargas fijas generen una fuerza eléctrica \vec{F}_e sobre aquéllas que anula a la fuerza magnética \vec{F}_m como se muestra en la figura 1. Dos consecuencias principales se deducen de lo dicho. La primera es que la fuerza \vec{F}_e que ejerce el conjunto de cargas fijas sobre el conjunto de cargas móviles tienen una reacción igual y contraria, la cual la ejercen las cargas móviles sobre las fijas. Éstas, experimentan una fuerza que tiene el mismo valor y sentido que \vec{F}_m , que no es magnética sino eléctrica. Esta fuerza experimentada por las cargas fijas que constituye la estructura sólida del conductor, es la que mueve a éste en los motores y generadores eléctricos.

La segunda consecuencia es que el desplazamiento transversal experimentado por las cargas móviles es despreciable macroscópicamente, de modo que la distribución de la densidad de corriente \vec{j} no se ve afectada por la presencia o ausencia de \vec{B} constante, y depende únicamente del campo de potencial electrostático que se establece en el conductor.

Onda electromagnética.

Las ondas electromagnéticas clásicas se pueden describir como un proceso continuo, que se usa como modelo para establecer las diferencias entre una onda y una partícula, así la formulación clásica de la teoría electromagnética, a nivel macroscópico, es muy diferente a nivel microscópico.

Einstein fue el primero en sugerir que la onda electromagnética, que nosotros percibimos macroscópicamente, es la manifestación estadística de un fenómeno microscópico conformado por una población de partículas (ensamble de electrones) [3]. El físico Danés Louis de Broglie, definió a la energía electromagnética como una forma de materia cuantificable. El concepto de fotón en su representación moderna se remonta a 1905 gracias al brillante trabajo teórico sobre el efecto fotoeléctrico llevado a cabo por Albert Einstein. Al sumergir un metal en radiación electromagnética éste emite electrones. El asombroso tratamiento de Einstein estableció que el mismo campo electromagnético está cuantificado. Cada fotón componente tiene una energía que es el producto de la constante de Planck y la frecuencia del campo de la radiación ν :

$$\xi = h\nu \quad 1.7$$

ξ Energía radiante cuantizada. Existe en descargas localizadas

h Constante de Planck = $6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ o $4.1356692 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$

ν Frecuencia temporal o el número de ondas por unidad de tiempo. Frecuencia del campo de la radiación. $\nu = \frac{1}{\tau}$

τ Periodo de la función.

Los fotones son partículas elementales sin masa, sin carga y estables que sólo existen a la velocidad de la luz $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$

1.2. Relación de microondas a dispositivos electrónicos.

El espectro electromagnético enumera las regiones principales en las que se divide la radiación electromagnética figura 1.1. Las regiones se denominan Bandas de frecuencia. No hay límite superior a la longitud de onda teórica, se han detectado ondas de más de 18 millones de millas de longitud que llegan a la tierra desde el espacio exterior. La banda de radiofrecuencia se extiende desde pocos Hz hasta $1 \times 10^9 \text{ Hz}$, éstas son emitidas por circuitos electrónicos.

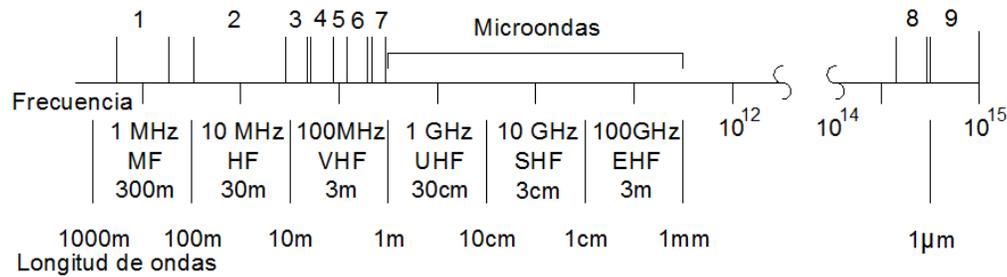


Figura 1.1a Vista ampliada de la región de microondas.

La región baja del espectro, de 300 kHz a 300 MHz es llamada de radiofrecuencia, contiene las frecuencias medias (“Medium Frequency” MF), frecuencias altas (“High Frequency” HF) y las muy altas frecuencias (“Very High Frequency” VHF). Este rango de frecuencias está por debajo de las microondas, sin embargo es de suma importancia en las comunicaciones comerciales, los transistores, circuitos discretos, circuitos alambrados y sensores magnéticos. En este rango de frecuencia se ubican las ondas de difusión de radio AM, radio de onda corta, la difusión de radio FM, la radio móvil y los canales de televisión en muy alta frecuencia.

La banda de las microondas se extiende en 300 MHz a 300 GHz. Las microondas son importantes para las comunicaciones y aplicaciones de radar por su alta frecuencia y su corta longitud de onda. La alta frecuencia otorga una capacidad de Ancho de Banda amplio, así, en un sistema cuyo ancho de banda es el 10 % para 10 GHz da un ancho de banda efectivo de 1GHz. En este ancho de banda puede ser contenido toda la información de un sistema de comunicación comercial. Las longitudes de onda corta permiten concentrar en una pequeña área la energía proveniente del pre-amplificador de salida de los dispositivos no solo en la parte de las comunicaciones, sino también en los equipos industriales, aplicación científica y ciencia médica.

[4]

Debido a sus características las microondas pueden emplearse en los siguientes ámbitos:

- **Comunicaciones**
 - UHF Televisión.
 - Comunicaciones satelitales
 - Comunicaciones en troposfera
 - Sistemas Radio Móvil
 - Telemetría
- **Radar**
 - Búsqueda
 - Control de tráfico aéreo.
 - Navegación
 - Rastreo
 - Control y detección de fuego

Medición de velocidad

- **Bloqueadores electrónicos antimisil**
- **Calefacción aplicada a la cocción de alimentos**
Hornos industriales
- **Industria, ciencia y medicina.**
Aceleradores lineales
Plasma
Radio astronomía
Prueba de quipos.

Por otra parte, la radiación capaz de penetrar a la atmósfera terrestre oscila alrededor de un centímetro hasta 30 metros de longitud de onda. Por lo que las microondas tienen su aplicación directa en la radioastronomía. En concreto, los átomos de hidrogeno, repartidos en varias regiones del espacio emiten radiación de 21 cm (1 420 MHz). Gran información acerca de la estructura de nuestra galaxia se ha obtenido del estudio de la emisión electromagnética de esta frecuencia. Los campos electromagnéticos tienen las mismas características que las ondas electromagnéticas viajando en el espacio libre, sin embargo, sus valores son modificados cuando las microondas son forzadas a viajar a través de líneas de transmisión. Dentro de líneas de transmisión de alta frecuencia transmisor-receptor, las microondas no pueden ser conducidas por cables (conductores eléctricos), para su transmisión o difusión de un componente a otro. Para esto se presentan tres tipos de líneas de transmisión (cable coaxial, guías de onda y líneas “microstrip”) los cuales serán definidos en las secciones siguientes. [4]

1.3. Consideraciones básicas de la Teoría electromagnética.

Experimentalmente sabemos que las cargas, aunque estén separadas en el vacío, sufren una interacción mutua. Como posible explicación podríamos especular que cada carga emite y absorbe un flujo de partículas indetectable. El intercambio de estas partículas entre las cargas puede considerarse como el modo de interacción. Alternadamente, podemos tomar el punto de vista clásico e imaginar que cada carga está rodeada de campo eléctrico. Suponemos solamente que cada carga interactúa directamente con el campo eléctrico en el que está sumergida. Por consiguiente, si una carga puntual q experimenta una fuerza F_e , el campo eléctrico E en la posición de la carga está definido por $F_e = q \cdot E$. Observemos que una carga móvil puede expresar otra fuerza F_m la cual es proporcional a su velocidad V . Por lo tanto tenemos que definir otro campo, es decir, la inducción magnética o sencillamente el campo magnético B , tal que $F_m = q \cdot V \times B$

Si ambas fuerzas F_e y F_m se dan simultáneamente, la carga se mueve a través de una región ocupada por el campo eléctrico y el campo magnético donde $F = q \cdot E + q \cdot V \times B$. Por lo tanto, el

campo magnético es generado por portadores de carga en movimiento y por campo eléctrico variable en el tiempo.

Si un campo eléctrico E , varía en el tiempo, generará un campo magnético B que en todo el espacio es perpendicular a la dirección de propagación de E , como se muestra en la figura 1.2.

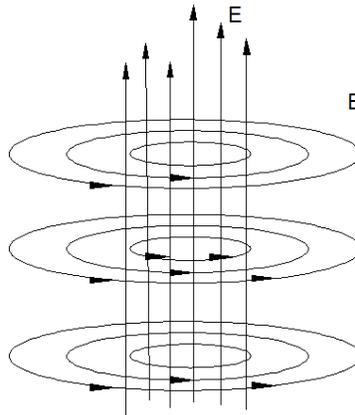


Figura 1.2 Un campo eléctrico E , varía en el tiempo, genera un campo magnético B que es en todas partes perpendicular a la dirección en la que E se propaga.

De igual manera un campo B variable con el tiempo genera un campo E que es perpendicular en todas partes a la dirección de propagación del campo B Figura 1.3.

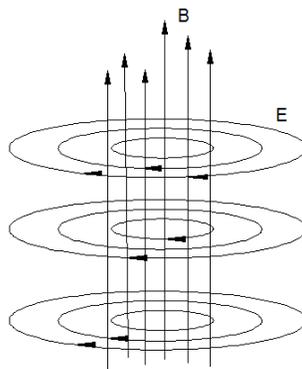


Figura 1.3 Un campo B variable con el tiempo genera un campo E que es perpendicular en todas partes a la dirección en la que B cambia o se propaga.

Ahora, si se considera una carga que se acelera desde el reposo, cuando la carga está estática, tiene asociada a ella un campo eléctrico uniforme radial E que se extiende en todas direcciones. En el instante en que la carga comienza a moverse, el campo eléctrico E se altera en la proximidad de la misma y esta alteración se propaga en el espacio con una velocidad finita. El campo eléctrico variable en el tiempo induce un campo magnético, como se describe en las siguientes ecuaciones

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (i)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (ii) \quad 1.8$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (iii)$$

Si la velocidad de la carga es constante, la velocidad de cambio del campo eléctrico \mathbf{E} es constante y el campo magnético \mathbf{B} resultante también es constante. Si la carga esta acelerándose, entonces $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ no es constante y el campo magnético \mathbf{B} inducido depende del tiempo.

El campo \mathbf{B} variable con el tiempo genera un campo \mathbf{E} , (ecuaciones 1.3) continúa con \mathbf{E} y \mathbf{B} acoplados uno a otro en la forma de un pulso. A medida que un campo cambia, genera un nuevo campo que se extiende un poco más allá, y así el pulso se mueve de un punto al siguiente a través del espacio.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = - \frac{\partial B_x}{\partial t} \quad (i)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = - \frac{\partial B_y}{\partial t} \quad (ii) \quad 1.9$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = - \frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (iii)$$

Los campos \mathbf{E} y \mathbf{B} se consideran como dos aspectos de un solo fenómeno físico, el *campo electromagnético*, cuya fuente es una carga en movimiento. La perturbación, una vez que ha sido generada en el campo electromagnético, se mueve más allá de su fuente e independientemente de ella. Los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo se generan mutuamente en un ciclo infinito. La energía electromagnética consiste en una fuerza eléctrica F_e y una fuerza magnética F_m . La fuerza eléctrica es similar a la gravitacional. El origen del campo gravitacional es la masa y el del campo eléctrico es la carga eléctrica, ambos campos varían inversamente al cuadrado de la distancia a sus orígenes respectivos, la carga eléctrica puede tener polaridad positiva o negativa, en tanto la masa no exhibe tal propiedad. Toda la materia contiene una mezcla de neutrones, protones positivamente cargados y electrones negativamente cargados, la cantidad de carga fundamental es la de un solo electrón, denotado por la letra e . La unida con la cual se mide la carga eléctrica es el Coulomb (C), la magnitud de e es: $e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] La carga de un solo electrón es $q_e = -e$, de un protón es igual magnitud pero de polaridad opuesta $q_p = e$. En la figura 1.4 se ilustran las líneas del campo eléctrico producido por una carga positiva. Las unidades de E es el volt por metro (V/m).

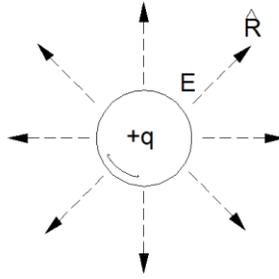


Figura 1.4 Campo eléctrico E producido por la carga q.

Principio de superposición lineal. Establece el vector campo eléctrico total en un punto del espacio producido por un sistema de cargas puntuales es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos en ese punto producido por las cargas individuales.

1.4. Ley de Biot-Savart.

Se observa que los polos iguales en los imanes se repelen y los contrarios se atraen. Esta propiedad de atracción repulsión es similar a la fuerza eléctrica entre cargas eléctricas, excepto por una importante diferencia: las cargas eléctricas pueden estar aisladas, pero los polos magnéticos siempre existen en pares. Alrededor de 800 a.C. los griegos descubrieron que cierta clase de rocas exhiben una fuerza que atrae limaduras de hierro (Magnetita Fe_3O_4) el fenómeno que se representa en ellas es el magnetismo. En el siglo XIII se descubrió que, cuando se colocaba una aguja sobre la superficie de un imán natural esférico, este se orientaba a lo largo de distintas direcciones. [6] Trazando las direcciones tomadas por la aguja, se determinó que la fuerza magnética formaba líneas de campo que rodeaba la esfera y parecía que pasaban a través de dos puntos diametralmente opuestos entre sí. No solo existe un campo magnético alrededor de los imanes permanentes, también puede crearse mediante corriente eléctrica. Oersted encontró que una corriente eléctrica presente en un alambre hacía que la aguja de una brújula colocada cerca de él se desviara, su dirección era perpendicular al alambre. El alambre que conducía corriente inducía un campo magnético circular alrededor del alambre.

La Ley de Biot-Savart estima el campo magnético producido por una corriente I que circula por un conductor. [7]

$$dB = \frac{\mu_0 I d\mathbf{l} \times \bar{r}}{2\pi r^2} \quad (\text{T) Teslas} \quad 1.10$$

μ_0 Permeabilidad Magnética en el espacio libre $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

$d\mathbf{l}$ Vector tangente al conductor en cada punto de igual sentido que la corriente I

r Distancia radial a la corriente I

\bar{r} Vector unitario en la dirección de r

1.5. Contribución magnética de los átomos.

Los electrones girando alrededor del núcleo, contribuyen al magnetismo de la materia. Considerando un electrón (carga q_e) que gira en una órbita circular con una velocidad tangencial v , como se muestra en la figura 1.5

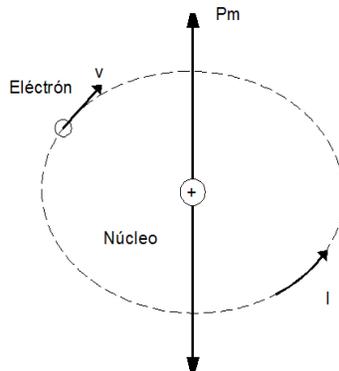


Figura 1.5 Simplificación Electrón girando alrededor del núcleo del átomo.

Este electrón representa una espira de corriente eléctrica, ya que en cada segundo su carga puede pasar varias veces por un punto cualquiera de la trayectoria circular; el valor de esta corriente es [6]

$$I = q_e f \quad [A]$$

Donde

I Corriente eléctrica de la espira.

q_e Carga del electrón

f Frecuencia natural $f = \frac{w}{2\pi}$

v Velocidad tangencial del electrón.

La magnitud del momento magnético P_m del electrón en órbita es

$$P_m = IA = q_e(\pi r^2) = \frac{q_e}{2} vr \quad 1.11$$

$|P_m|$ Magnitud del momento magnético P_m del electrón en órbita.

I Valor de la corriente eléctrica.

La magnitud del momento angular del electrón en órbita es

$$L = m_e v r$$

Por lo tanto

$$P_m = \frac{q_e}{2m_e} L$$

Se observa que los vectores de momento magnético P_m y momento angular orbital L , están relacionados por medio de la constante $\frac{q_e}{2m_e}$, para el caso de un electrón esta será negativa, ya que q_e es negativa, por lo que los vectores P_m y L , tendrán direcciones opuestas. Tal relación es general para cualquier orbita donde el momento angular sea constante, el momento magnético permanecerá constante. Adicionalmente al magnetismo producido por los electrones en órbita, existe otra contribución magnética debida a la rotación de las partículas alrededor de su eje llamado espín. El espín es una fenómeno cuántico, su momento angular esta cuantizado, su valor y símbolo son:

$$|S| = \text{momentum angular interno} = \frac{h}{4\pi}$$

Donde

$$h \text{ Constante de Planck} = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ o } 4.1356692 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

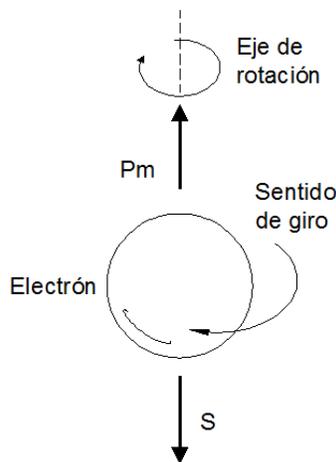


Figura 1.6 Dirección de los vectores momento magnético momentum angular para un electrón.

En la figura 1.6 se muestra la dirección del momento magnético y del momento angular para un electrón girando sobre su eje. La dirección del momento magnético se obtiene considerando al electrón como una esfera de carga negativa girando sobre su eje [6].

1.6. Espín de electrones.

El espín de los electrones se describe mediante el *número cuántico magnético del espín* m_s (el subíndice significa espín). Solamente están permitidos dos valores posibles para $m_s = +1/2$ o $-1/2$ (Figura 1.7). Los físicos holandeses George Uhlenbeck y Samuel Goudmit (1925) postularon que los electrones tienen una propiedad intrínseca llamada espín de electrones [6]. Estos dos posibles valores del espín hacen que las líneas del espectro se dividan en dos líneas espectrales.

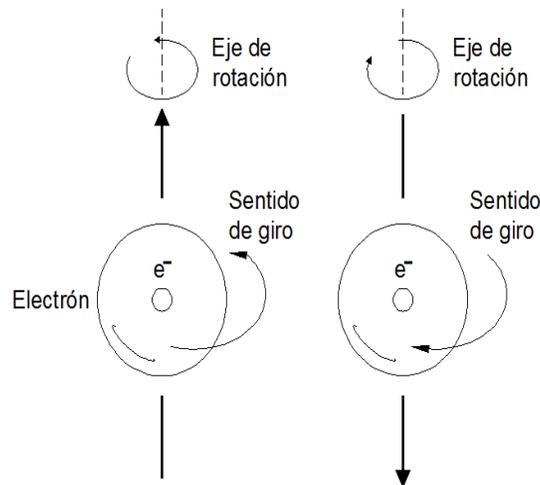


Figura 1.7 Las dos direcciones del espín corresponden a los dos valores posibles para el número cuántico $m_s = +1/2$ o $-1/2$.

Clasificación de las sustancias de acuerdo a sus propiedades magnéticas.

Todas las sustancias en su medio natural pueden ser consideradas materiales magnéticos. [Rojo métodos matemáticos]

1.7. Diamagnetismo.

El diamagnetismo se basa en la interacción del campo aplicado y los electrones, cuando se aplica un campo magnético externo se induce una corriente superpuesta cuyo efecto magnético es opuesto al campo aplicado. Todos los átomos y moléculas tienen contribuciones al magnetismo de origen diamagnético debido a la circulación de electrones inducida por un campo magnético externo [8].

Las principales características del diamagnetismo son:

- Los materiales diamagnéticos se magnetizan débilmente en sentido opuesto al campo magnético aplicado. Resulta así una fuerza de repulsión respecto al campo aplicado.

- La susceptibilidad magnética es negativa y pequeña y la permeabilidad relativa es menor que 1.
- Los materiales diamagnéticos no tienen momentos magnéticos intrínsecos Figura 1.8

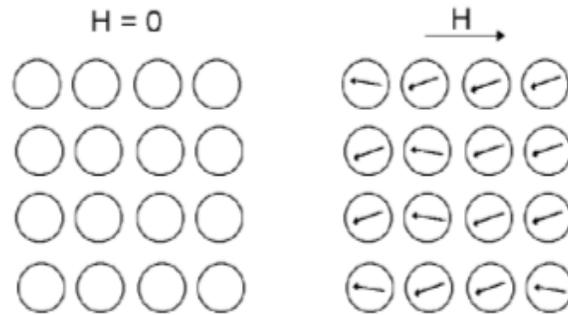


Figura 1.8 Tipo de comportamiento magnético. Diamagnético: Los átomos no poseen momentos magnéticos intrínsecos

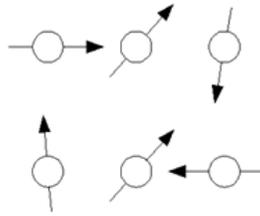
1.8. Paramagnetismo.

Los materiales paramagnéticos se caracterizan por poseer átomos con un momento magnético neto (figura 1.9), **se alinean en la dirección de un campo magnético aplicado.**

Las características:

- Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente en el mismo sentido que el campo magnético aplicado.
- La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña, por lo tanto, la permeabilidad relativa es mayor que 1.
- La intensidad de la respuesta magnética ante la presencia de un campo magnético es muy pequeña y difícil de detectar excepto a temperaturas extremadamente bajas o campos aplicados muy intensos.

Los materiales paramagnéticos muestran una relación lineal de la susceptibilidad respecto a la temperatura. [8] Los materiales paramagnéticos poseen momentos magnéticos intrínsecos, un campo magnético aplicado tiende a alinearlos, pero la agitación térmica promueve arreglos al azar. Cuando un átomo o un ión tienen uno o más electrones no apareados la muestra es paramagnética. En un sólido, los electrones no apareados de los átomos o los iones del sólido no se ven influenciados por los electrones de los átomos o los iones adyacentes. Los momentos magnéticos de los iones individuales están orientados al azar como se observa en la figura 1.9. Cuando se coloca un campo magnético, los momentos magnéticos se alinean paralelos unos a los otros y producen una interacción de atracción con el imán. Una muestra paramagnética se orienta en un campo magnético.



. **Figura 1.9** Tipo de comportamiento magnético. Paramagnético: Los átomos poseen momentos magnéticos intrínsecos (interiores), tienden a alinearse al azar.

La susceptibilidad magnética puede definirse como la medida de la facilidad que presenta un material a ser magnetizado por un campo magnético H . La siguiente tabla muestra valores de susceptibilidad magnética para diversas sustancias paramagnéticas y diamagnéticas.

Tabla de susceptibilidades magnéticas χ_m a T ambiente y a 1 atmósfera			
Paramagnéticos (+)		Diamagnéticos (-)	
Oxígeno	1.94×10^{-6}	Hidrógeno	-2.08×10^{-9}
Sodio	8.4×10^{-6}	Nitrógeno	-6.7×10^{-9}
Magnesio	1.2×10^{-5}	CO ₂	-1.19×10^{-8}
Aluminio	2.1×10^{-5}	Alcohol	-0.75×10^{-5}
Tungsteno	7.6×10^{-5}	Agua	-0.91×10^{-5}
Titanio	1.8×10^{-4}	Cobre	-0.98×10^{-5}
Platino	2.93×10^{-4}	Plata	-2.64×10^{-5}
		Oro	-3.5×10^{-5}

Tabla 1.1. Valores de susceptibilidad magnética.

1.9. Ferromagnetismo.

La propiedad por excelencia de estos materiales es el alineamiento paralelo espontáneo que se da entre sus momentos magnéticos atómicos en ausencia de campo. Entre estos materiales se encuentran el hierro (Fe), el cobalto (Co) y el níquel (Ni), así como la aleación de éstos con otros elementos. El Ferromagnetismo se presenta cuando los electrones no apareados de los átomos o de los iones van en el mismo sentido de orientación que los electrones de sus vecinos. El arreglo más estable (de menos energía) se presenta cuando los espines de los electrones de los átomos o iones adyacentes están alineados en la misma dirección como se ilustra en la figura 1.10 [8].

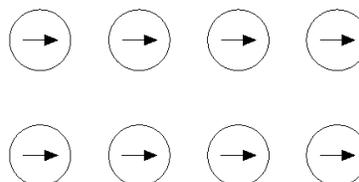


Figura 1.10. Ferromagnético: Centros acoplados alineados en una dirección común.

La temperatura tiende a desordenar los espines, de forma que por encima de una temperatura crítica (también llamada de Curie), el efecto cooperativo y ordenado de los espines desaparece y el comportamiento del material es el típico paramagnetismo. Por debajo de la temperatura T_c , los electrones se mantienen acoplados y alineados, la magnetización se mantiene incluso cuando el campo ha desaparecido. Cuando un sólido ferromagnético se coloca en un campo magnético, los electrones tienden a alinearse a lo largo del campo magnético. Cuando es retirado el campo magnético, las interacciones entre los electrones hacen que el sólido, como un todo, mantenga un momento magnético.

Capítulo 2

Efecto Magnetoimpedancia.

Antecedentes.

Son varios los fenómenos por los cuáles puede cambiar la impedancia eléctrica de un material ferromagnético en presencia de un campo magnético, pero todas comparten un origen común: la dependencia de la permeabilidad con el campo magnético. Algunos de ellos son conocidos desde el siglo XIX (efecto Mateucci, efecto Wiedemann inverso), aunque han seguido siendo tema de investigación y se agrupan bajo el nombre de Efecto Magnetoimpedancia [9].

Los primeros trabajos que describieron correctamente el Efecto Magnetoimpedancia fueron publicados en el año de 1930 por E.P. Harrison, basado en experimentos llevados a cabo en alambres permalloy [2]. El permalloy es una aleación magnética constituida por 20% de hierro y 80% de níquel. Sin embargo fue en el año de 1990 cuando este tema atrajo el interés debido al descubrimiento de los materiales magnéticos amorfos y nanocristalinos, dando lugar a una notable cantidad de publicaciones. El primer trabajo publicado del efecto de Magnetoimpedancia en muestras amorfas fue desarrollado por V.E. Makhotkin en 1991, aunque en revisiones posteriores ofrecen una descripción más precisa de los resultados publicados. El efecto Magnetoimpedancia se explica por el efecto piel. Cuando una corriente eléctrica de AC uniforme de frecuencia angular ω de la forma, $I_z = I_0 e^{(j\omega t)}$ según la ley de Ampere, esta corriente induce en el interior del material un campo magnético H de amplitud y fase variable con el tiempo, cuyas líneas se cierran en el plano perpendicular a la corriente. A su vez H creará un campo eléctrico E (según la ley de Maxwell para el rotacional del campo eléctrico) y su consiguiente corriente inducida en la misma dirección que la corriente aplicada, de modo que se superpondrán a ésta. La densidad de corriente resultante que fluye a través del material conductor, tiende a hacerlo más cerca de la superficie que en el centro, es decir, la densidad de corriente que fluye por un conductor es mayor en la superficie que en el centro o base del mismo, y su expresión matemática es: [9]

$$J_z = J_0 e^{-(x/\delta)} e^{-j(x/\delta)} \quad (2.1)$$

Donde J es la densidad de corriente, x la dirección perpendicular al flujo de corriente. Por lo tanto x une el centro del conductor con su superficie (perpendicular a z), tomada de tal modo que en la superficie $x = 0$.

Así, la amplitud de la corriente depende de la coordenada x , disminuyendo con la profundidad según una exponencial negativa, conocido como profundidad de penetración, cuya expresión es [2]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\sigma\mu}}$$

δ profundidad de la piel

$\sigma = nq\mu$ Conductividad eléctrica de material [Ro]

w Frecuencia angular

n Número de portadores por unidad de volumen $\left[\frac{1}{m^3}\right]$

q Carga eléctrica de cada uno de los portadores [C]

μ Permeabilidad eléctrica $\left[\frac{C \cdot m}{N \cdot s}\right]$

De esta expresión puede observarse que δ depende inversamente a la frecuencia y a la permeabilidad magnética del material, además que es un fenómeno que se presenta en materiales conductores.

2.1. Efecto Magnetoimpedancia.

La Magnetoimpedancia se define como el cambio en la impedancia eléctrica de un conductor ferromagnético suave, al cual se le aplica una corriente alterna AC de baja intensidad y frecuencia constante, con el propósito de inducir un campo alterno H_{ac} , en presencia de un campo magnético H_{dc} externo. Los cambios en la impedancia son originados por la variación de la magnetización del material con el campo magnético H_{dc} y el campo magnético alterno inducido por la corriente alterna. En consecuencia estos cambios en la impedancia reflejan modificaciones en la estructura magnética del material. La dependencia de la impedancia con el campo magnético es inducida por la habilidad de los mecanismos de magnetización de responder al campo de corriente alterna H_{ac} es decir a inducir una respuesta magnética dinámica. Por lo que el incremento en la impedancia es función de la permeabilidad del material en la dirección del campo aplicado [9].

2.2. Arreglo experimenta de la instrumentación para la medición del fenómeno de Magnetoimpedancia para materiales ferromagnéticos suaves.

La técnica de Magnetoimpedancia se emplea para la caracterización de materiales ferromagnéticos suaves, los cambios en la impedancia del material ferromagnético son originados por la variación de la magnetización del material con un campo magnético externo H_{dc} y la excitación del campo magnético alterno afectando, así, los mecanismos conductivos. [9] Los requerimientos básicos para la implementación de la técnica de medición experimental se definen a continuación:

- **Puente de Impedancias.** El analizador AGILENT 4395A es un equipo de medición de variables físicas el cual presenta tres modos de operación: analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales. En particular en este trabajo se empleara el analizador AGILENT4395A en el modo de Analizador de Impedancias, implementando las herramientas de adquisición, procesamiento de datos y patrones de calibración para este dispositivo.
- **Bobina de Helmholtz.** Una de las componentes importantes para la instrumentación de la técnica de Magnetoimpedancia es la generación de campo magnético estable y uniforme, con una intensidad máxima de campo magnético de 200 Oerstedes y un volumen mínimo de estabilidad de 1 cm^3 .
- **Montura.** Permite controlar altura y posición de la muestra bajo estudio. Por lo que se tiene que garantizar que la muestra bajo estudio sea colocada en el centro geométrico de las Bobinas de Helmholtz, que es donde se ubica la mayor concentración de líneas de campo magnético en el interior de los carretes, y se garantiza que el campo magnético es uniforme, como se muestra en la figura 2.1.
- **Interfaz de Usuario.** La interfaz de comunicación permite la interacción del usuario con las herramientas de adquisición integradas en NI LabVIEW versión 8.5.

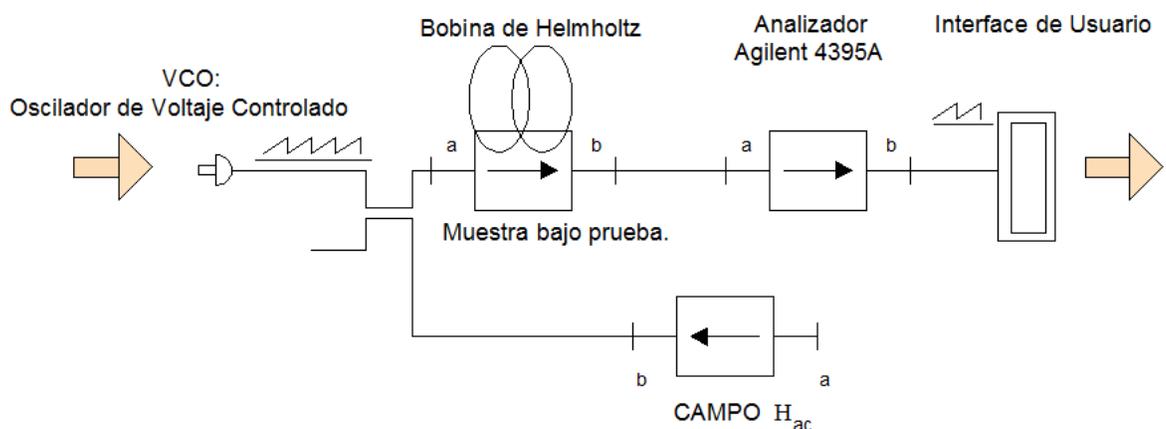


Figura 2.1 Requerimientos mínimos para la instrumentación de la técnica de Magnetoimpedancia. *a* y *b* ejemplifican la entrada y salida respectivamente del bloque.

2.3. Magnetoimpedancia Gigante MIG.

La Magnetoimpedancia Gigante es la respuesta de los materiales a frecuencias altas, el efecto superficial da lugar a cambios grandes en la impedancia de hasta 600 % en algunos materiales [9].

Para altas frecuencias el efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI), se ha explicado por medio de la electrodinámica clásica, como una interacción entre el campo magnético H_{ac} y la magnetización debida al campo magnético H_{dc} , el efecto GMI es principalmente originado por cambios en la componente resistiva de la impedancia (Z)¹, dado que es un efecto superficial. Esto causa que la corriente se limite a la superficie de la muestra, reduciendo el efecto de la sección transversal del material, produciendo un aumento en la componente resistiva de la impedancia (Z). Por lo que a altas frecuencias es determinante el efecto piel en el comportamiento de la Magnetoimpedancia.

Una descripción matemática del efecto superficial se ha obtenido de la electrodinámica clásica a partir de las ecuaciones de Maxwell. Para un conductor eléctrico el cual transporta una intensidad de corriente alterna de forma sinusoidal, la penetración y profundidad de la piel (δ), se da por la siguiente expresión:

$$\delta = \left[\frac{\rho}{\mu_0 \mu_{ef} \pi f} \right]^{\frac{1}{2}} \quad 2.2$$

Donde:

f frecuencia del campo.

ρ resistividad del muestra.

μ_{ef} permeabilidad efectiva en el caso del efecto GMI.

Para un sistema laminar la impedancia (Z) se relaciona con la profundidad de piel superficial a través de la expresión siguiente:

$$(Z) = R_{dc} \cdot jka \coth jka \quad 2.3$$

Donde

$$k = \frac{1 + j}{\delta} \quad 2.4$$

R_{dc} Resistencia dc

¹ Un vector impedancia consta de un aparte real (resistencia, R) y una parte imaginaria (Reactancia, X). La impedancia puede ser denotada empleando las coordenadas rectangulares de la forma $Z = R + j X$

a Espesor de la muestra.

Siguiendo las expresiones 4.2 y 4.3, la impedancia de un conductor ferromagnético depende de la permeabilidad transversal, esta se origina por dos contribuciones: el movimiento de pared de dominio y la rotación de espín, ambas debidas a un campo magnético aplicado externo H_{dc} , y que depende de la intensidad de este.

A frecuencias bajas, el movimiento de pared de dominio determina la permeabilidad. Mientras que a frecuencias altas el movimiento de pared de dominio es fuertemente amortiguado por corrientes microscópicas y la contribución de la rotación de la magnetización es dominante. El amortiguamiento del movimiento de la pared de dominio a altas frecuencias reduce el efecto de histéresis².

El método experimental consiste en aplicar una corriente alterna con un puente de impedancias figura 2.2, [12] al mismo tiempo que se aplica un campo magnético de corriente directa H_{dc} , mediante un solenoide en cuyo interior se coloca el porta muestras, con la finalidad de inducir una nueva orientación de dominios transversales o circunferenciales, obteniéndose únicamente los efectos de los dominios longitudinales.

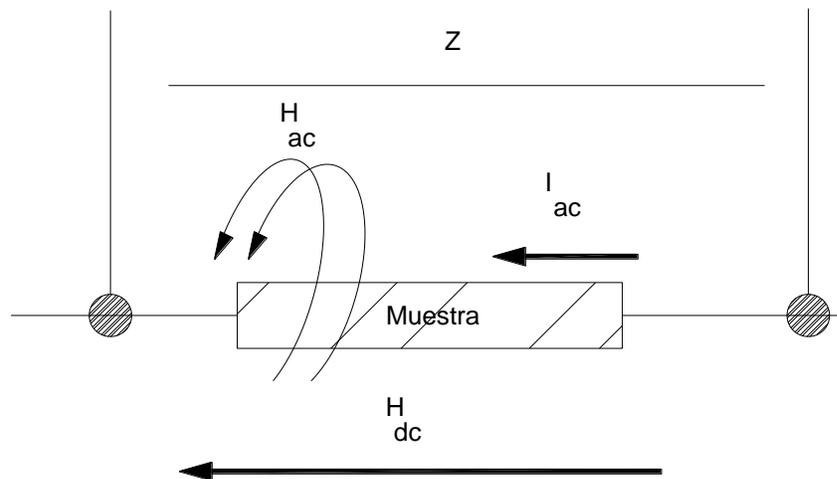


Figura 2.2 Ilustración medición de impedancia Básica.

2.4. Tipos de muestras en los experimentos de Magnetoimpedancia.

² Histéresis:

El ciclo de histéresis es una curva que indica la forma en la que la magnetización de un material está atrasada con respecto a la fuerza magnetizante, es decir es una Curva de magnetización de los materiales.

Hay tres grandes grupos de muestras que se emplean en los experimentos de Magnetoimpedancia: Hilos, Cintas y Películas delgadas [9]. Sus principales características se resumen a continuación.

- **Hilos.** Muestras amorfas o nanocristalinas de forma cilíndrica, cuyo diámetro oscila entre 30 y 125 micras. Los hilos han sido objeto de la mayor cantidad de trabajos en el campo de la Magnetoimpedancia, dada su respuesta de Magnetoimpedancia Gigante (hasta 700%) y la baja frecuencia en la que estos resultados se alcanzan. Su principal inconveniente es la dificultad en el método de obtención y como consecuencia la dificultad de integrarlo a un procesos de fabricación.
- **Cintas.** Laminas amorfas de varias decenas de micras de espesor y anchuras del orden de milímetros. [11] Su frecuencia óptima de trabajo está típicamente en las unidades o decenas de Megahertz, con una Magnetoimpedancia máxima publicada de 400%. Al igual que los hilos su inconveniente es la dificultad de integración en procesos de fabricación.
- **Películas Delgadas.** El espesor de las capas suele ser del orden de decimas de micra, más finas que los hilos y las cintas. La Magnetoimpedancia Gigante aparece en ellas a partir de las decenas de MHz, los mejores resultados se obtienen normalmente en el rango de los centenares de MHz. Los valores máximos publicados hasta ahora son del 700% para la Magnetoimpedancia relativa. La estructura típica de estas muestras es una tricapa del tipo F/C/F, siendo F un material ferromagnético conductor y C un conductor no magnético. [12]

Las curvas típicas de Magnetoimpedancia se ilustran en la figura 2.3. Las regiones de frecuencia en las que ocurren estos comportamientos dependen del material bajo estudio.

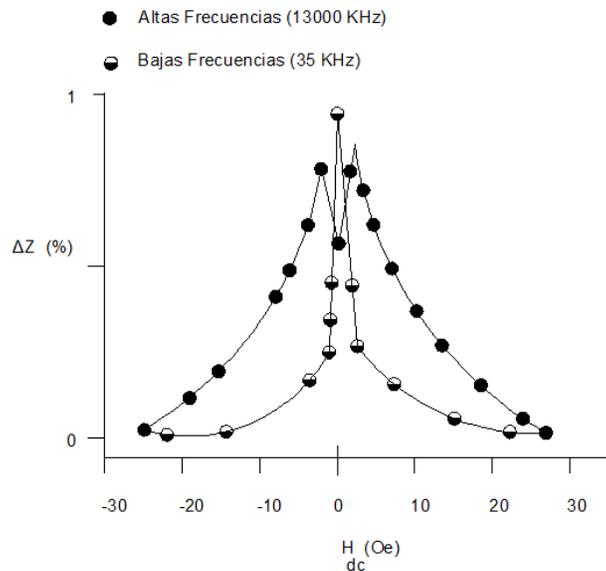


Figura 2.3 Curva experimental típica de medición Magnetoimpedancia en Vitrovac a (aleación rica en Co) dos diferentes frecuencias como función de un campo magnético aplicado.

La respuesta de la Magnetoimpedancia está en función de la frecuencia, en general se puede dividir en tres regiones:

1. **Frecuencias muy bajas.** (del orden de 1 – 10 kHz)

La dependencia de la impedancia con el campo H_{dc} es atribuida a la respuesta inductiva, la cual es proporcional a la permeabilidad circunferencial (o transversal) del material. Por lo tanto, a muy bajas frecuencias el cambio de la impedancia del material se origina exclusivamente por efectos magnetoinductivos causados por los procesos de magnetización reversibles.

2. **Frecuencias bajas e intermedias en el intervalo de algunos cientos de MHz (Radiofrecuencia)**

En este rango de frecuencias el efecto piel es muy fuerte, el incremento de la impedancia es debido a rotaciones de espín que son excitados con el campo de corriente alterna H_{ac} . La curva característica corresponde a dos máximos los cuales coinciden con la anisotropía magnética.

3. **Frecuencias altas en la región de microondas (GHz)**

En esta frecuencia la respuesta es superficial por la presencia constante del efecto piel. En la actualidad se encuentra en discusión lo que sucede a esta frecuencia, existiendo dos puntos de vista. El primer criterio establece que la respuesta Magnetoimpedancia

gigante corresponde al comportamiento resonante ferromagnético del material. El segundo criterio establece la contribución de los componentes de polarización de naturaleza magnética y eléctrica.

La razón de incremento de la impedancia debido a un campo magnético se determina mediante la expresión:

$$\Delta Z = \frac{|Z(H_{dc}) - Z(H_S)|}{|Z(H_S)|} \times 100$$

Donde:

ΔZ Incremento de la impedancia

$Z(H_S)$ Impedancia eléctrica de un campo magnético de considerando que alcanza la magnetización de saturación del material bajo estudio

$Z(H_{dc})$ Impedancia eléctrica en función de un campo magnético H_{dc} externo

Capítulo 3

Construcción del prototipo.

3.1. Especificación de componentes.

Para la construcción del prototipo de medición de la técnica es necesario establecer los componentes que lo constituyen mediante un diagrama esquemático, como se muestra en la figura 3.0, y que corresponde a los módulos en la cual se divide la parte experimental de la tesis.

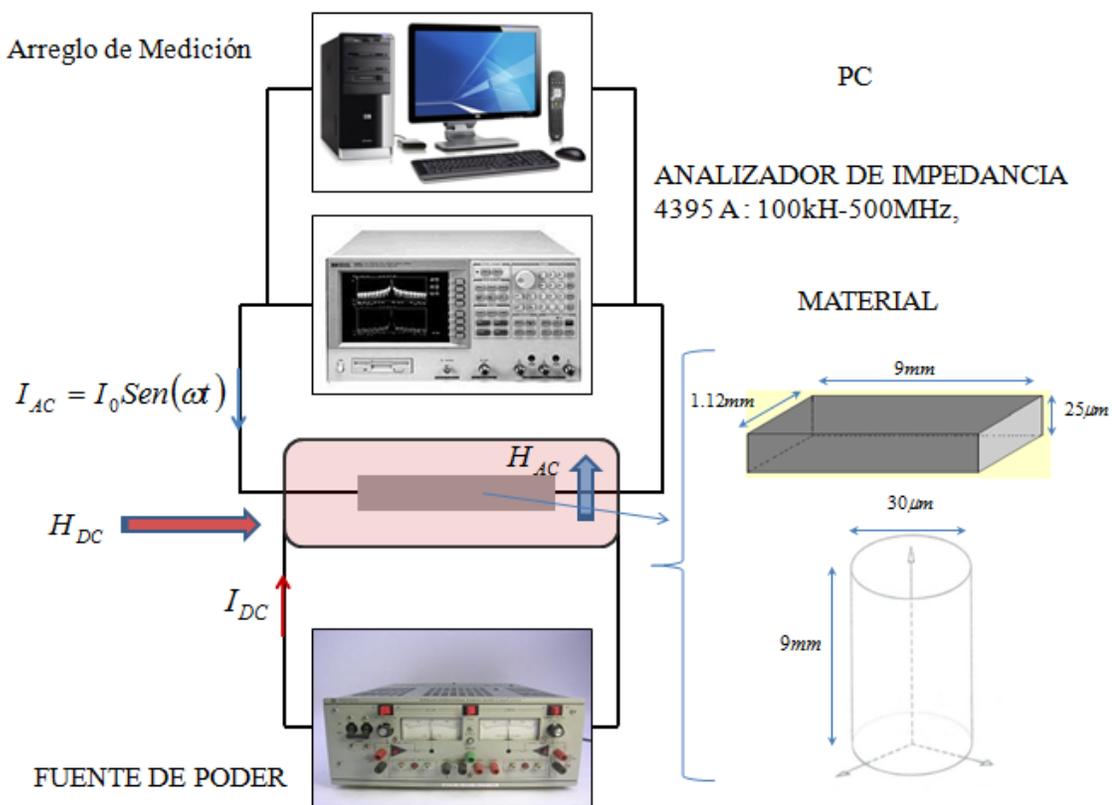


Figura 3.0 Diagrama esquemático.

A continuación se enlistan los bloques del diagrama esquemático del prototipo medición de Magnetoimpedancia, descritos en la sección 2.

- Puente de Impedancias.
- Bobina de Helmholtz.
- Fuente de alimentación de corriente eléctrica controlada por voltaje.
- Montura.
- Interfaz de Usuario.

3.2. Analizador de Impedancias AGILENT 4395 A

El analizador AGILENT 4395A es un equipo de medición de variables físicas el cual presenta tres modos de operación: (figura 3.1) Analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales. En particular en este trabajo se empleara el analizador AGILENT4395A en el modo de Analizador de Impedancias, implementando las herramientas de adquisición, procesamiento de datos y patrones de calibración para este dispositivo. [13]

En el analizador AGILENT 4395A los componentes para frecuencias altas como filtros, fuentes multipunto y amplificadores operan a más de un rango de frecuencia, así como al ancho de banda.

Especificaciones Técnicas de Salida.

Variables de salida.....Magnitud de la impedancia
|Z|, Y, L, C, Q, R, X, G, B, θ^3

Especificaciones Técnicas de Salida.

Variables de salida.....Magnitud de la impedancia.

Impedancia característica de salida.....50 Ω nominal

Resolución.....0.1 dB

Tiempo de espera previo a medición (Pre calentamiento).....> 30 minutos

$$^3 |Z| = R + jX$$

|Z|	Magnitud de la impedancia	[Ω]
R	Resistencia eléctrica	[Ω]
X	Reactancia; X_L Reactancia Inductiva.	[Ω]
	$X_L = 2\pi fL$	
	X_C Reactancia Capacitiva.	[Ω]
	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	

Y Reciproco de la impedancia se denomina Admitancia

$$Y = \frac{1}{R+jX} = G + jB \quad \text{Siemens (S).}$$

G Conductancia

B Susceptancia

Temperatura de Operación..... $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}^4$



Figura 3.1 Analizador AGILENT 4395 A

Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales.

Al tener la capacidad de un ancho de banda amplio hace posible barrer la energía de la fuente a través de un rango de frecuencia deseada y obtener una señal de salida continua detectable y cuantificable tal como **pérdidas** de retorno de transmisión o reflexión [14].

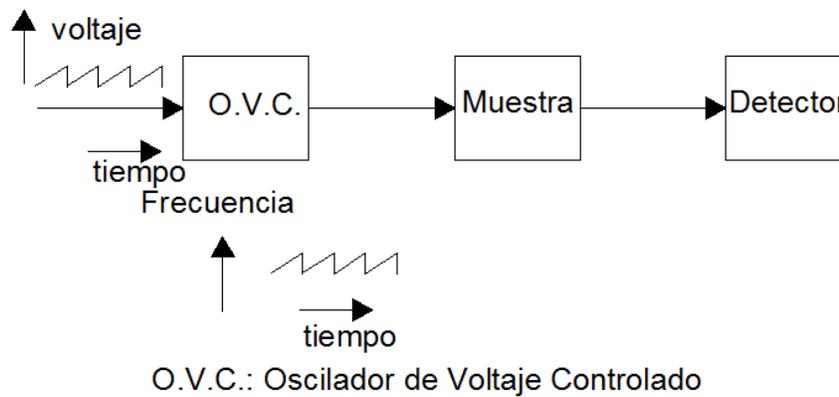


Figura 3.2 Diagrama a bloque: Medición de señal de barrido transmitida.

En la figura 3.2 [15] se observa un oscilador de voltaje controlado (O.V.C.) con una amplitud constante de salida lo que da una serie de cambios de frecuencia en forma de rampa lo cual es impulsado por un equivalente voltaje de control. Un detector y un display se conectan a la salida del dispositivo bajo prueba o Muestra para medir el nivel de transmisión como función de la frecuencia. [16]

⁴ Temperatura de operación óptima.

Impedancia eléctrica.

La impedancia eléctrica es un importante parámetro usado para caracterizar circuitos electrónicos, dispositivos y materiales usados para hacer componentes o sensores. La impedancia (Z) se define como la oposición de un dispositivo o circuito presenta al flujo de una corriente eléctrica a una frecuencia determinada y es representada como una cantidad compleja que se muestra gráficamente en un plano de vectores. La impedancia consta de un aparte real (resistencia, R) y una parte imaginaria (Reactancia). La impedancia puede ser denotada empleando las coordenadas rectangulares de la forma $R+jX$ o en la forma polar como una magnitud y ángulo de fase. $|Z| \angle \theta$. El recíproco de la impedancia se denomina Admitancia (Y) $\frac{1}{z} = \frac{1}{R+jX} = Y = G + jB$, donde G representa la conductancia, B la susceptancia. Las unidades de la impedancia son el Ohm (Ω) y la admitancia el Siemens (S).

La Reactancia toma dos formas, la reactancia inductiva (X_L) y la reactancia capacitiva (X_C). Por definición $X_L = 2\pi fL$ y $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

El factor de calidad Q es proporcional a la energía almacenada en un componente a la energía disipada por el mismo, Q es adimensional por lo tanto $Q = \frac{X}{R} = \frac{B}{G}$. Q es comúnmente aplicada a inductores. [13]

Para las capacitancias el término más utilizado para denotar la pureza es el factor de disipación D , ésta cantidad es simplemente el recíproco de Q por lo que $D = \frac{1}{Q}$

3.2.1. “Test kit” Equipo de Pruebas para el modo de Analizador de Impedancia.

El “Impedance Test kit” (ITK) es un **accesorio de prueba para iniciar la medición en modo analizador de impedancia del Agilent 4395A, con el número de parte 43961A, que corresponde a la forma de conexión de la muestra.** Adicionalmente al ITK se integran tres estándares de calibración (impedancia infinita, impedancia cero y carga a 50Ω), los cuales tienen conexión APC-7, estos se conectan al puerto de entrada del ITK (Figura 3.3). Los conectores APC-7 son muy sensibles al daño y a la suciedad. La calibración es la parte inicial en el procedimiento de medición en el modo analizador de impedancia.

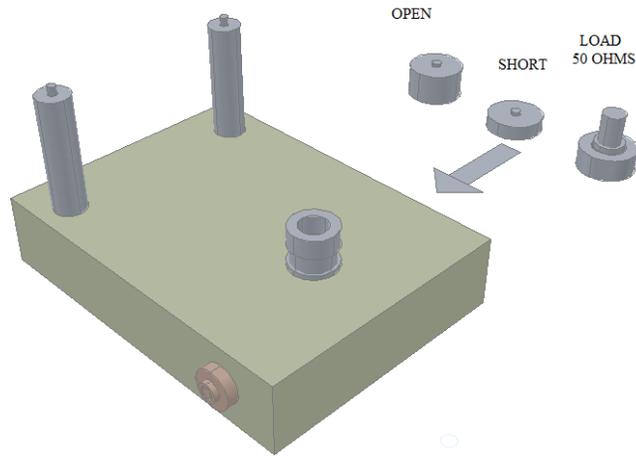


Figura 3.3 “Impedance Test kit”, accesorio de prueba para iniciar la medición en modo analizador de impedancia del Agilent 4395A

3.2.2. “Test fixtures” Accesorio de Prueba.

El “Test Fixtures” juega un papel importante en la medición de impedancia tanto mecánica como eléctricamente. La calidad del aparato determina la precisión de la medición. Para nuestra medición se empleó el Test Fixtures como un puente de medición entre el AGILENT 4395A y la muestra patrón de calibración del instrumento de medición. (figura 3.3a) [13]

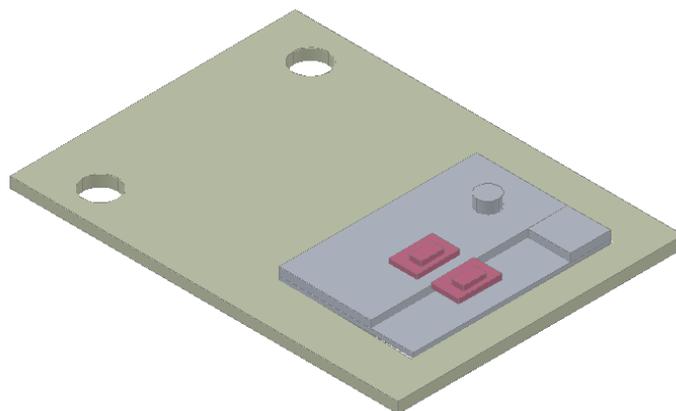


Figura 3.3a Isométrico.

“Test fixtures” Accesorio de Prueba AGILENT 43961A

Para elegir el tipo de “test fixtures” se considera no solo la disposición física de los contactos (figura 3.3b) sino también el rango de frecuencia de operación, el rango de impedancia y el voltaje de DC que pueda ser aplicado. Los contactos terminales del “test fixtures” son de dos terminales de forma de clip los cuales garantizan la correcta sujeción de la muestra bajo prueba.

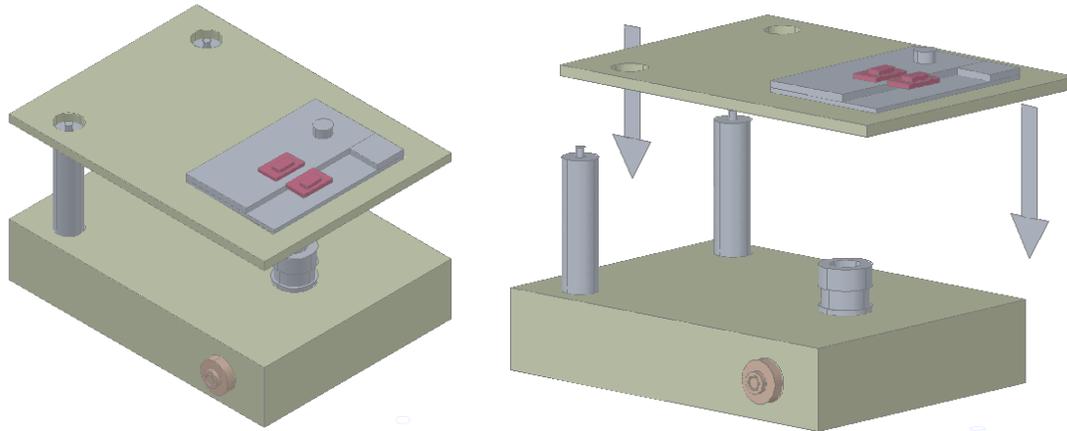


Figura 3.3b Isométrico.

“Test fixtures” y “Test Kit” AGILENT 43961A.

3.3. Bobinas de Helmholtz.

El arreglo conocido como Bobinas de Helmholtz se obtiene con dos bobinas circulares concéntricas de Radio R , en serie con sus centros geométricos separados una distancia R a lo largo del eje de simetría (eje y) e igual al radio de una bobina o carrete. Este arreglo permite obtener una zona de campo magnético uniforme alrededor del punto central O . La corriente eléctrica fluye en la misma dirección en cada bobina. En la sección 4 se describe detalladamente el funcionamiento y la construcción del mismo.

3.4. Carga resistiva de calibración para frecuencias intermedias y alta frecuencia.

Para efectos de calibración del puente de impedancias Agilent 4395A se diseñó un patrón de calibración para frecuencias intermedias y microondas hasta 1 Ghz, y consiste en una carga de 50Ω . A frecuencias bajas los dispositivos como transistores y capacitores a frecuencias por debajo del rango de microondas son conectados por cables. El flujo de electrones en los cables es llevado como señal eléctrica de bloque a bloque.

A altas frecuencias de microondas los transistores convencionales, circuitos integrados CI y alambres no funcionan convencionalmente debido a la contribución de de la reactancia y el tiempo de transmisión, por ello son requeridos dispositivos especiales para el procesamiento y transmisión de microondas.

Básicamente son tres los tipos de líneas de transmisión para el espectro electromagnético microondas. El cable coaxial, la guía de onda y las líneas microstrip. Los materiales y la forma de cada línea de transmisión varían de acuerdo a la aplicación.

Cable coaxial

El cable coaxial ofrece la ventaja de un amplio ancho de banda y una sección transversal pequeña, sin embargo presenta una alta atenuación y una capacidad limitada de manejo de potencia.

Guía de onda

La guía de onda ofrece un estrecho ancho de banda, sin embargo tiene una capacidad alta de manejo de potencia, bajas perdidas a la transmisión.

Líneas microstrip

Las líneas de transmisión planares o líneas “microstrip” figura 3.4, se forman por dos o más conductores planos en paralelos. Mientras que los cables coaxiales estándar y las guías de onda son usados para conectar las partes de los equipos entre sí, las líneas microstrip son usadas dentro de los propios dispositivos microondas.[4]

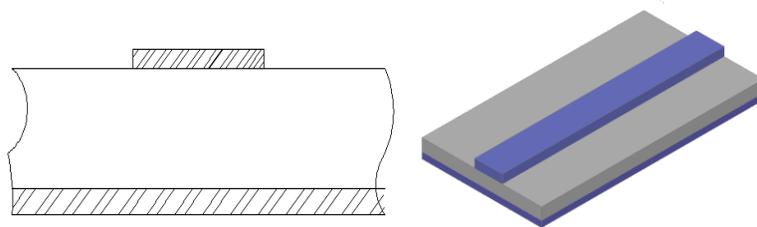


Figura 3.4 Línea microstrip

El material dieléctrico que sirve como soporte mecánico de línea “microstrip” está en un solo lado de la línea conductora.

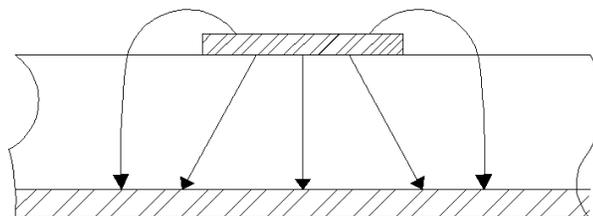


Figura 3.4a Sección transversal de una Línea microstrip.

Las flechas en la sección transversal (figura 3.4a) ejemplifican el campo electromagnético asociado a la propagación

Para la fabricación de **Patrón de calibración** con impedancia eléctrica característica de $Z_0 = 50 \text{ ohms}$ se selecciono una “GUIDELINE” RF-35 fabricada por “TACONIC” ⁵

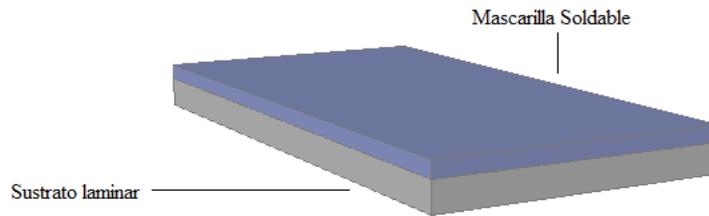


Figura 3.5 Ilustración de la superficie laminar de cobre.

La guía presenta las siguientes características:

- El producto RF-35 está hecho a base de tejas de fibra de vidrio como se observa en la figura 2.5b y una capa laminar de cobre el cual es un material termoplástico con una excelente estabilidad eléctrica.
- El sustrato de fibra de vidrio (figura 3.5) proporciona gran estabilidad mecánica. Las propiedades del material del sustrato se muestran a continuación.

Propiedades de la línea de transmisión
Tabla de Constante dieléctrica para la placa RF-35

	10 Ghz	1 Mhz
RF-35	3.5	3.5
RF-35P	3.5	3.5

Tabla 3.1 Propiedades del material RF-35

Dada la constante dieléctrica del material para la construcción de la línea “Microstrip” procedemos a la construcción: [17]

- La tarea es calcular el ancho W que se muestra en la figura 3.6.
- El valor de H (Altura sustrato) es dato de fabricante

⁵ Fabricante de laminas de bajo costo para aplicaciones de radio frecuencia y de microondas con sede en New York, Estados Unidos de América.

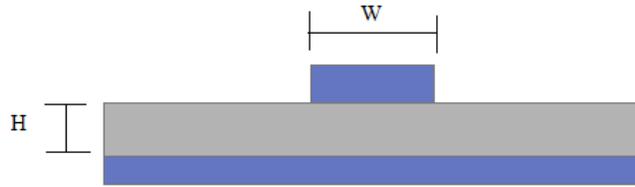


Figura 3.6 Formulación Diseño de Línea “Microstrip”.

- De acuerdo con la Tabla 3.1 dado: $Z_0 = 50 \Omega$, $\epsilon = 3.5$

$$\frac{W}{H} = 3$$

Donde:

Z_0 Impedancia característica de la línea “microstrip”

ϵ Constante dieléctrica del sustrato.

W Ancho la línea de Transmisión Figura 3.6.

H Altura del sustrato.

Dado el dato de Fabricante: $H = 0.01$ pulgadas, trazamos una línea horizontal paralela al eje x en el punto 50 ohms interceptando la curva característica de 3.5 como $W = 3 (H) = 3 (0.01) = 0.03$ pulgadas

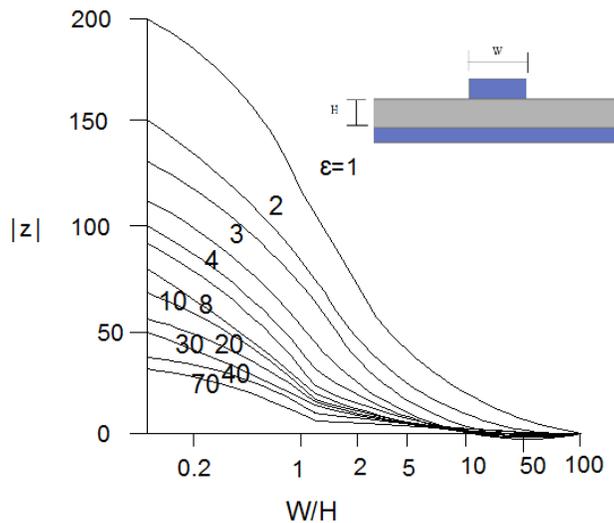


Figura 3.7 Impedancia característica de las líneas “Microstrip”

La grafica *Figura 3.7* ilustra el comportamiento de la Constante dieléctrica del sustrato en función de la altura H a una impedancia característica de 0 a 200Ω .

3.5. Implementación de la Herramienta para la adquisición de señales o datos en código ASCII y/o .txt por el Analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales AGILENT 4395.

La parte de adquisición de señales se desarrollo con NI LabVIEW versión 8.5. La herramienta permite adquirir los datos obtenidos por el Analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales AGILENT 4395 en cualquiera de sus modalidades de operación. Genera un archivo en código ASCII o .txt teniendo como variables de salida la frecuencia de excitación en el eje X y la magnitud de la impedancia $|Z|$, Y, L, C, Q, R, X, G, B, θ en el eje Y.

El programa realizado en lenguaje gráfico de programación LabVIEW adquiere la información en forma de arreglo n-dimensional reflejada en el WAVEFORM GRAPH Canal 1 y Canal 2 de la interfase grafica de usuario. El tamaño del arreglo de N columnas por M filas es de 2 por 1000 conteniendo N veces M elementos (figura 3.8). En las líneas de programación se añadió dimensiones al arreglo o indicador posicionando el cursor sobre el INDEX DISPLAY y arrastrándolo hacia abajo una posición o dimensión.

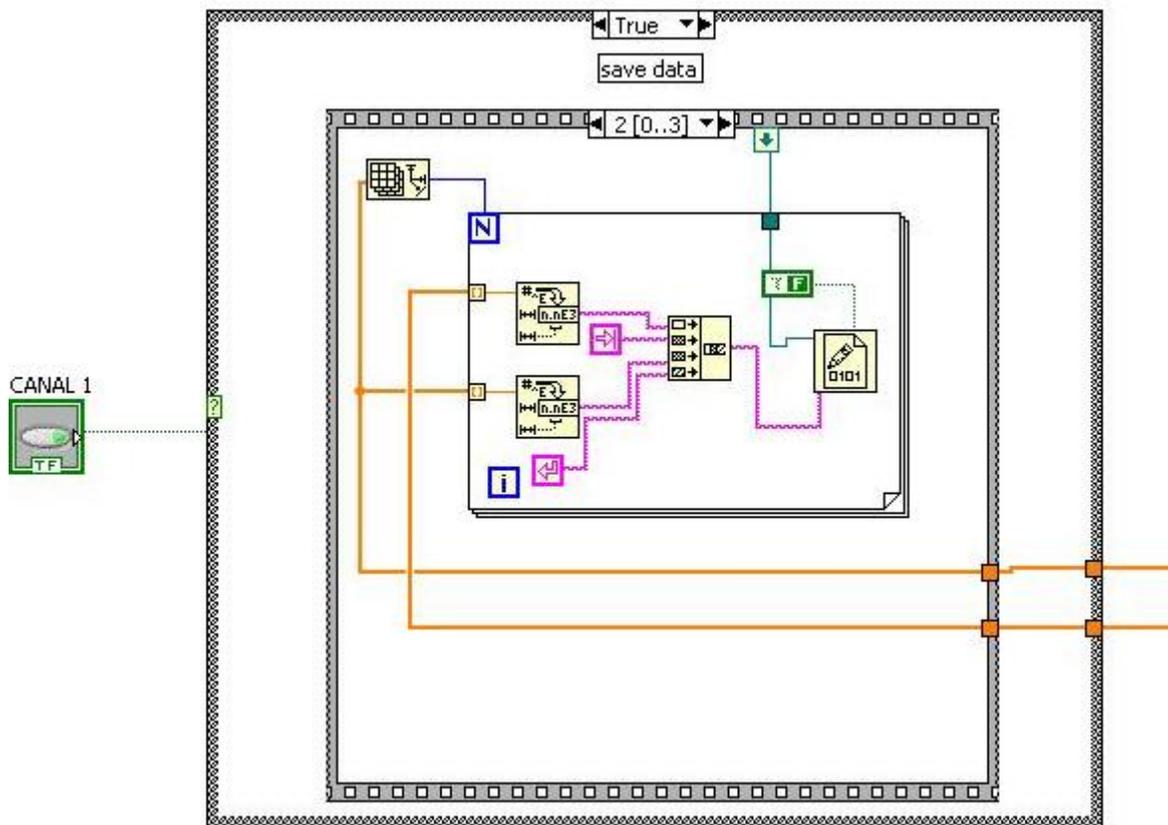


Figura 3.8 Bloque de programación Herramienta para la adquisición de señales o datos en código ASCII y/o .txt

3.7. Fuente de Alimentación de Corriente AC.

Especificaciones técnicas.

Fabricante: KEPCO BIPOLAR OPERATIONAL POWER SUPPLY/AMPLIFIER

Modelo: BOP 100-4M

Rango de Operación: 0 a 100 V.D.C., 0 a 4 A.D.C.

Por definición una fuente de corriente de C.D. se proporciona una corriente constante a la carga no importando que existan variaciones o sobre demandas.

Para el control de la fuente bipolar de corriente el fabricante propone que la comunicación se realice por medio de una tarjeta GPIB (General Purpose Interface) mas el módulo de conexión SNR 488-4 como elemento de conexión y la tarjeta SN 488-B/D KEPCO, elevando el costo del montaje considerablemente.

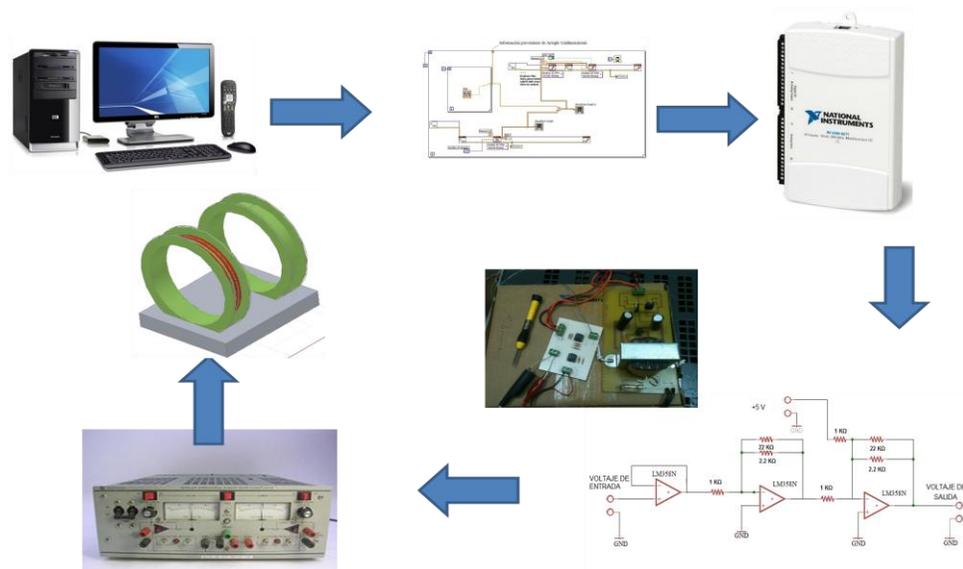


Figura 3.10 Diagrama esquemático para el control de la fuente de alimentación controlada por voltaje.

El control de la fuente de corriente se realiza por medio de una señal digital de voltaje generado por la tarjeta de Adquisición de Datos de National Instruments USB-6211 multifunción de la serie M de 16 bits, 250 kS/s, energizado por bus. La señal proveniente del pin 10 de la tarjeta de adquisición de datos TTL +5 Volts de corriente continua, es retroalimentada a la entrada analógica AI1 pin 17 de la tarjeta de adquisición de datos USD-6211. Ahí es procesada y convertida en una señal de control desplazando la referencia cero a -2.5 volts. La señal de control es ruteada o direccionada a la salida analógica AO0. La señal (controlable) de voltaje de salida analógica AO0 es amplificada en nivel analógico por medio de un circuito de acondicionamiento

(figura 3.10) con la finalidad de controlar el voltaje programable de entrada “VPI” (Voltage Program Input) a la fuente de alimentación bipolar KEPCO modelo BOP 100-4M. Esta configuración habilita el suministro de energía que actúa como un amplificador operacional de potencia con un rango de operación de -100 Volts a +100 Volts. Esto es una Fuente de alimentación de corriente controlada por voltaje. Este control permite el manejo de la corriente de salida a la carga (Bobina de Helmholtz).

3.8. Circuito de Acondicionamiento.

El uso de un equipo de acondicionamiento de señales mejora la calidad y las prestaciones de un sistema de control o adquisición de señales.[19] Las funciones de acondicionamiento que se usan generalmente para cualquier tipo de señal son amplificación, filtrado, aislamiento y acoplamiento de impedancias

- **Amplificación.**

Debido al bajo nivel de señal que suministran los transductores, el ruido puede jugar un papel importante en lo que error de medida de señal se refiere. Una amplificación fuera del gabinete de la PC y cerca de la fuente de origen de la señal nos puede incrementar la resolución de la medición y reducir el efecto del ruido sobre la señal deseada. Las tarjetas de adquisición de datos (DAQ) contiene un amplificador interno, sin embargo, el uso de este amplificador es más común para adaptar los márgenes dinámicos de la señal y la DAQ, así aumentar la resolución, que para disminuir la influencia del ruido en la señal.

- **Filtrado.**

El uso de filtros permite discriminar o rechazar un cierto margen de frecuencias indeseables. Es común emplear los filtros supresores de banda con frecuencia central de 50 Hz para eliminar el ruido de red procedente de cargas no lineales, fuentes de alimentación, etc. También son comunes los filtros de alta frecuencia o pasa altas, permiten que la señal que se va a muestrear pueda ser reconstruida perfectamente después de la adquisición. El ancho de banda de estos filtros debe coincidir con el ancho máximo de la señal objeto.

- **Aislamiento.**

Idealmente aislamiento es una relación no-recíproca entre dos o más subsistemas el cual no permite pérdidas como medio de unión (figura 3.11). La dirección de circulación de la señal puede ser reversible, por lo tanto el dispositivo puede ser usado como un cambiador operado electrónicamente.

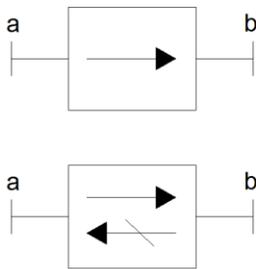


Figura 3.11 Etapa de aislamiento en un sistema electrónico convencional.

a y b ejemplifican la entrada y salida respectivamente del bloque.

3.9. Configuración del circuito de acondicionamiento.

3.9.1. Etapa 1: “Linear Buffer” Seguidor de Voltaje.

Se considero esta configuración del Amplificador Operacional LM 358N como seguidor de voltaje donde la señal de salida siga exactamente en amplitud a la señal de entrada proveniente de la tarjeta de Adquisición de Datos National Instruments USB-6211 multifunción de la serie M.[20]

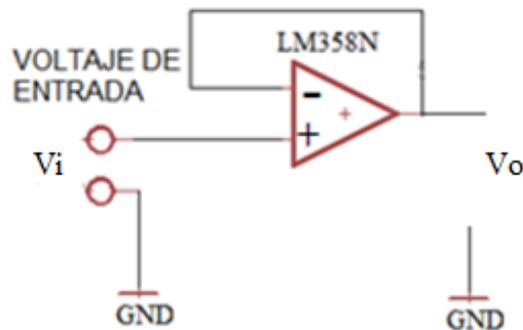


Figura 3.12 Amplificador operacional como “Linear Buffer”

$$V_i = V_o \quad 2.1$$

En esta configuración del amplificador operacional como “Linear Buffer” la resistencia de entrada V_i es muy Grande con el fin de no cargar la etapa anterior, con lo cual la señal proveniente de la tarjeta DAQ NI no se altera. La salida V_o se comporta como una fuente ideal de voltaje. (Figura 3.12)

3.9.2. Etapa 2: Circuito en configuración sumador-restador y amplificador

Se considera:

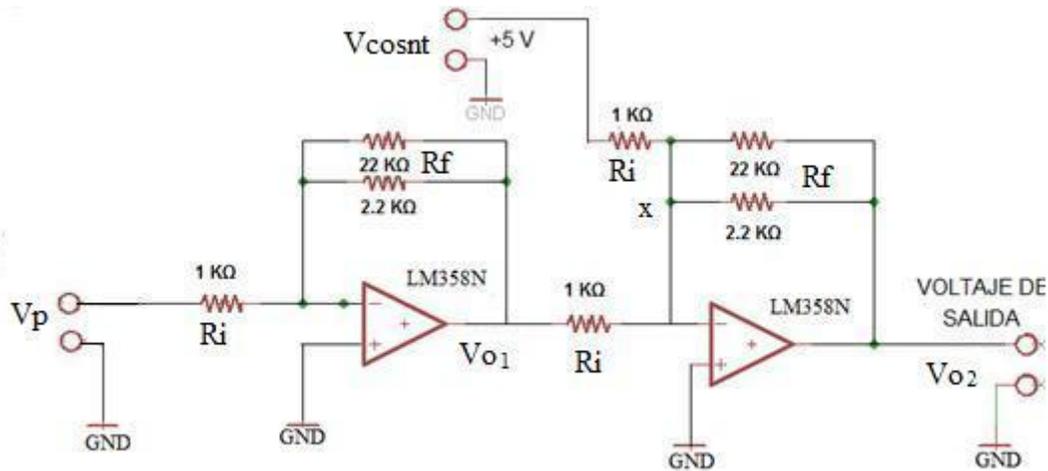


Figura 3.13 Diagrama esquemático Circuito de acondicionamiento.

La señal proveniente del Amplificador operacional en configuración “Linear Buffer” es conectada a la entrada V_p ilustrada en la figura 3.13. Nos enfocaremos al amplificador operacional uno ubicado en la izquierda del diagrama, esta configuración se denomina Amplificador operacional inversor con ganancia de voltaje. Como la terminal del amplificador operacional no inversora está conectada a tierra V_+ y considerando que la resistencia de entrada del amplificador operacional es muy grande, resulta que $I_i = I_f$, por lo cual

$$\frac{V_i}{R_i} = -\frac{V_0}{R_f} \quad 2.2$$

Por lo tanto

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_f}{R_i} \quad 2.3$$

Esto implica que la ganancia de voltaje de salida del amplificador está dada por la siguiente expresión:

$$V_{01} = -\frac{R_f}{R_i} V_i \quad 2.4$$

Si consideramos que $R_f = 2 \text{ k}\Omega$ y $R_i = 1 \text{ k}\Omega$ el voltaje de salida amplificador operacional inversor con ganancia de voltaje es $V_0 = -2 V_i$.

El amplificador operacional dos (derecha) en configuración sumador inversor efectúa una suma lineal entre V_{01} y V_{const} del diagrama esquemático de la figura 2.14. La señal de salida

proporcional a la suma de las entradas con una inversión de fase adicional de 180° de ahí el signo negativo de la expresión [21, 22].

El voltaje de salida V_{02} es igual a la suma algebraica de los voltajes o señales de entrada. La ganancia independiente para cada señal es la función de la razón $\frac{R_f}{R_i}$. La ganancia la determinan las resistencias de retroalimentación. En el modo de suma se efectúa una mezcla lineal de señales, sin que se produzca interacción de éstas con la entrada, lo que se debe a que en el nodo x representa cero volts o resistencia cero. Por lo tanto:

$$V_{02} = -\left(\frac{R_f}{R_i} + \frac{R_f}{R_i}\right)V_{01} \quad 2.5$$

DAQ	V_{01}	V_{02}
0	0	-10
0.5	-1	-8
1	-2	-6
1.5	-3	-4
2	-4	-2
2.5	-5	0
3	-6	2
3.5	-7	4
4	-8	6
4.5	-9	8
5	-10	10

Tabla 3.2 Relación de voltaje de salida (V_{02}) del arreglo amplificador operacional en configuración Sumador inversor.

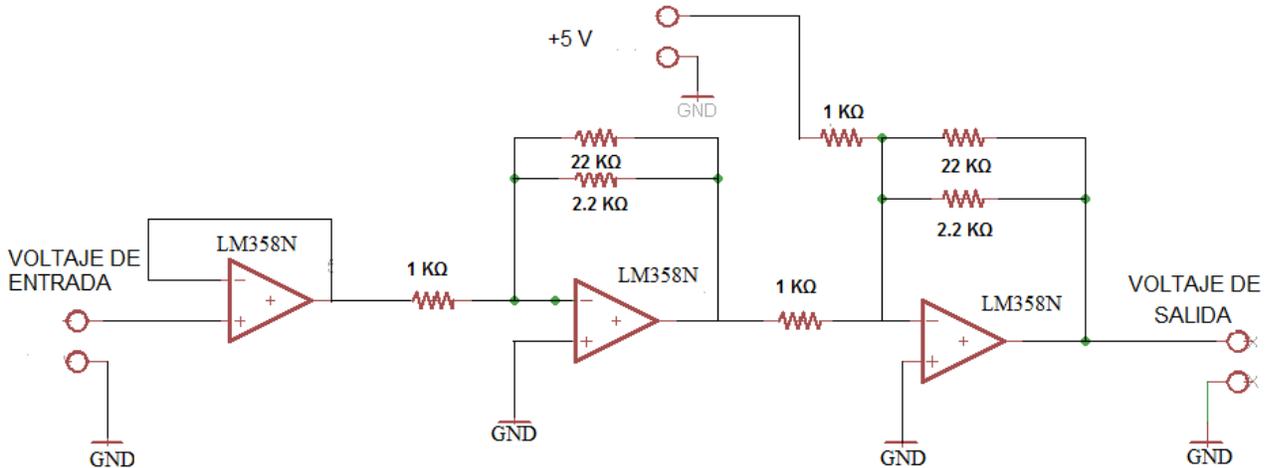


Figura 3.14 Diagrama esquemático Circuito de acondicionamiento completo.

3.10. Lista da componentes.

CI	Amplificador operacional LM358N	(2)
R	Resistor 2.2 kΩ, ¼ W	(2)
R	Resistor 22 kΩ, ¼ W	(2)
R	Resistor 1 kΩ, ¼ W	(3)
	Bornes de conexión para dos terminales.	(3)
	Bornes de conexión para tres terminales.	(2)
	Base para circuito integrado 8 pines	(2)
	Tablilla para circuito impreso 12X12 cm	(1)
	Brocas para metal	

3.11. Circuito electrónico para ensamble tarjeta PCB⁶.

La tarjeta de circuito impreso (figura 3.15) es un medio de ensamble para los componentes electrónicos del circuito de acondicionamiento de señales. En origen es una placa de baquelita con una capa delgada de cobre superficial (puede ser de una capa o multicapa) en el cual se plasma o diseña las líneas del circuito.

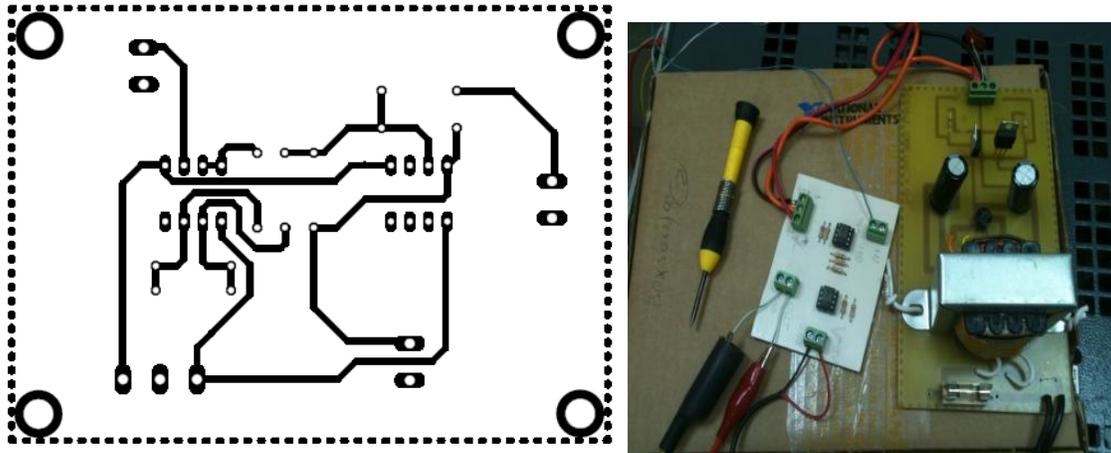


Figura 3.15 Circuito impreso del Circuito de acondicionamiento completo (PCB)

Las pistas tienen un grosor de 0.8128 milímetros con estilo continuo. El prototipo fue elaborado en “Easily Applicable Graphical Layout Editor” Versión 5.2.0 para Windows⁷.

⁶ PCB Por sus siglas en ingles Printed circuit Board

⁷ "www.cadsoft.de/freeware.htm"

3.12. INTERFASE GRAFICA DE USUARIO.

La interfaz de comunicación permite la interacción del usuario con las herramientas de adquisición integradas en NI LabVIEW versión 8.5. [23] El recuadro de color amarillo ilustrado en la figura 3.16, habilita la opción para el canal 1 y 2, genera un archivo con extensión .txt o en código ASCII en forma de una matriz de $M \times N$. El tamaño del arreglo de N columnas por M filas es de 2 por 1000 conteniendo N veces M elementos.

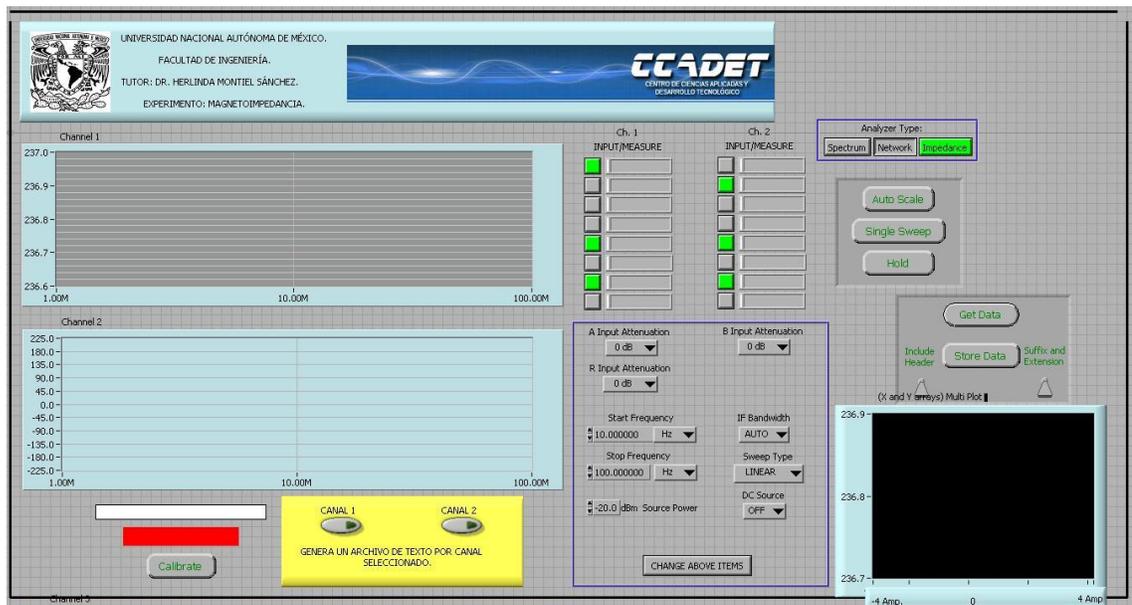


Figura 3.16 Interfase grafica de usuario para la medición de Magnetoimpedancia

El recuadro inferior derecho reporta la impedancia en función de la corriente para el caso de medición de Magnetoimpedancia, ordenada abscisa respectivamente. De igual forma genera un archivo con extensión .txt o en código ASCII en forma de una matriz de $M \times N$. El tamaño del arreglo de N columnas por M filas es de 2 por 1000 conteniendo N veces M elementos. Para esta medición se tiene que restringir el barrido de la señal de corriente alterna AC de baja intensidad y frecuencia constante. El “SETPOINT” o ajuste de la frecuencia de inicio y frecuencia final en la ventana de configuración son coincidentes.

Adicional a lo mencionado en el presente apartado dentro de la interfaz grafica de usuario del analizador AGILENT 4395A en sus tres modos de operación: analizador de Impedancias / Espectros / Redes Vectoriales se hicieron diversas modificaciones al programa base; para cada modo de operación o tipo de analizador modificamos las opciones a fin tener disponible solo las herramientas requeridas, en los “xy Graphs 1, xy Graphs 2” se habilitaron las opciones de auto escala con el propósito de tener una mejor vista de las señales adquiridas y programamos el “AUTOSCALE” previo a la opción de adquisición de señales.

Sistemas de Bus⁸.

En el mundo de la instrumentación virtual el bus GPIB es uno de los más utilizados para interconectar instrumentos de laboratorio entre sí o con sus correspondientes instrumentos virtuales. Cabe destacar que una buena comprensión del protocolo utilizado en el bus me ayudo a resolver los problemas que se presentaron en el desarrollo del Driver o programación para el control del proceso. Un sistema de computadora esta normalmente construido alrededor de una CPU (Unidad central de procesos) a la cual se conecta todas las unidades periféricas como lo muestra la figura 3.17. Esa configuración es ineficaz puesto que todos los datos deben pasar por la unidad central de procesos, aunque no los necesite, consumiendo tiempo de procesamiento.

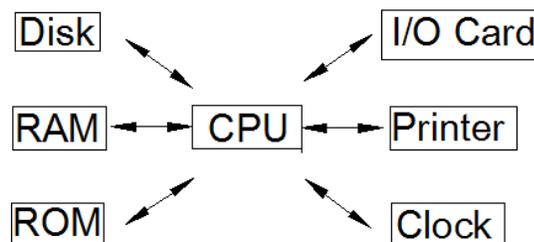
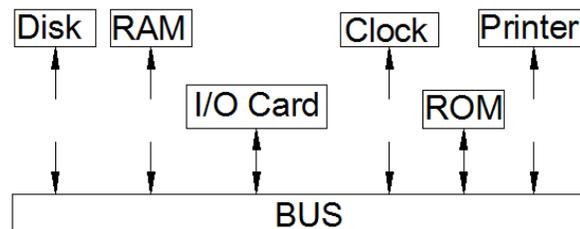


Figura 3.17 Conexión de los periféricos a la Unidad central de procesos (CPU).

Un sistema inteligente donde los periféricos puedan comunicarse entre sí e incluso tuvieran capacidad de decisión; esto es una conexión de periféricos en Bus (figura 3.18), siguiendo normas adecuadas de coordinación o protocolo en el intercambio de datos, se interconectan diferentes periféricos para realizar un proceso concreto. Así se desechó la idea de fabricar instrumentos programables para conectarlos directamente a una PC, y se buscó la forma de interconectarlos entre sí y a un controlador que los administre de forma apropiada.



⁸ La aplicación de computadoras para el control tuvo lugar en el año de 1965 cuando Digital Equipment Corporation (DEC) introdujo el procesador PDP-8 que se diferenciaba de las computadoras hasta entonces construidas por el hecho de que estaba basado en una arquitectura de bus abierta. Según esta arquitectura los clientes podrían seleccionar el Hardware más adecuado según sus necesidades e incluso diseñar sus propias interfaces de tarjetas basadas en las especificaciones de un bus. Para apreciar la innovación que supone un sistema de bus frente a la estructura convencional de las computadoras éstos pueden compararse entre sí.

Figura 3.18 *Conexión en Bus.*

Hewlett-Packard desarrollo el GPIB original, llamándolo HP-IB a fines de década de los sesenta, cuando aparecieron los primeros instrumentos controlables digitalmente y surgió la necesidad de estandarizar la comunicación entre ellos y el computador. Posteriormente, otros fabricantes estudiaron los aspectos básicos que habría que coordinar para asegurar la compatibilidad de la comunicación entre los diversos instrumentos. Así en 1975 el IEEE publico el estándar ANSI/IEEE 488 la cual contenía las normas a seguir por los fabricantes que deseaban utilizar el bus GPIB y donde se indicaban cuales eran las características eléctricas, mecánicas y funcionales del sistema de interfase. Esta primera norma no incluye indicaciones sobre la sintaxis o el formato de los comandos a usar.

La norma 488.2 incluía un mínimo conjunto de mensajes que debía atender un instrumento. En 1990 compañías de software desarrolló el SCPI o Standard Commands for Programmable Instrumentation, es un conjunto de comandos específicos a obedecer.

Norma IEEE-488.1 GPIB (General Porpouse Interface)

Sobre las normas que rigen el funcionamiento del bus GPIB me fue de utilidad la comprensión desde el punto de vista de reconocer cuál es la norma que verifica el instrumento que deseamos controlar, pues según sea la norma con la que se diseño, presentara un conjunto de comandos y una forma de ejecutarlos diferente.

Un bus se puede definir según dos conceptos: uno físico y otro lógico. Físicamente consiste en un conjunto de conductores transportado señales eléctricas en paralelo entre diferentes sistemas electrónicos. El concepto lógico se refleja en las normas y los formatos de intercambio de datos, en la sincronización, el protocolo y la temporización.

El bus transportara información en todas direcciones. Todos los instrumentos recibirán los mismos datos y deberán reconocer automáticamente que han sido direccionados.

Los parámetros más importantes que definen un bus son:

- Datos mecánicos y eléctricos: tipo de conector o tecnología a utilizar.
- Bus orientado a cierto procesador o independencia de él.
- Espacio de memoria direccionable o cantidad de instrumentos a direccionar.
- Ancho de datos.
- Tipo de transferencia de datos: síncrona o asíncrona.
- Existencia de multiplexación de datos o direcciones.
- Frecuencia de reloj.
- Velocidad máxima de transferencia de datos.
- Número de interrupciones y protocolo.
- Número de unidades master.

Entre otros, los objetivos de la norma IEEE-488.1 cuando fue creada eran:

- Crear un sistema de instrumentación donde los instrumentos estén próximos.
- Especificar los requisitos mecánicos, eléctricos y funcionales para poder interconectar instrumentos.
- Permitir la comunicación directa entre los instrumentos sin necesidad de que los datos pasen por el controlador.
- Definir un sistema que permita interconectar instrumentos de velocidades diferentes, fabricantes diferentes y capacidades diferentes.
- Definir un sistema que no introduzca restricciones sobre las características que tiene el instrumento.
- Sistema fácil de utilizar, de bajo costo, permitir comunicaciones asíncronas en un amplio margen de velocidades de transmisión de datos.

Especificaciones físicas, mecánicas y eléctricas

- El número máximo de dispositivos conectados al bus es 15, uno de ellos el controlador.
- Los instrumentos están interconectados por medio de cable en estrella o línea y la longitud del cable está limitada a 20 metros entre los 15 instrumentos, siendo la distancia máxima entre ellos 2 metros.
- Hay 16 líneas de señalización, 8 para datos y 8 para control.
- La transferencia de mensajes es asíncrona.
- La velocidad máxima de transferencia es de 1 Mbyte/seg para distancias muy cortas.
- En un sistema puede haber varios controllers aunque sólo podrá haber uno activo.

3.13. Zócalo de Montaje.

La base de montaje de los carretes aporta firmeza y facilidad para fijar la montura en el centro de las bobinas. Está fabricada en placa de Madera MDF (Medium density Fiberboard). La altura es de 45 mm y el largo de 340 mm por 290 mm de lado con dos ventanas para el montaje de los carretes de 184 X 60 mm como se muestra en la Figura 3.19. Se prestó interés en la simetría de las ventanas como se observa en la figura 3.20

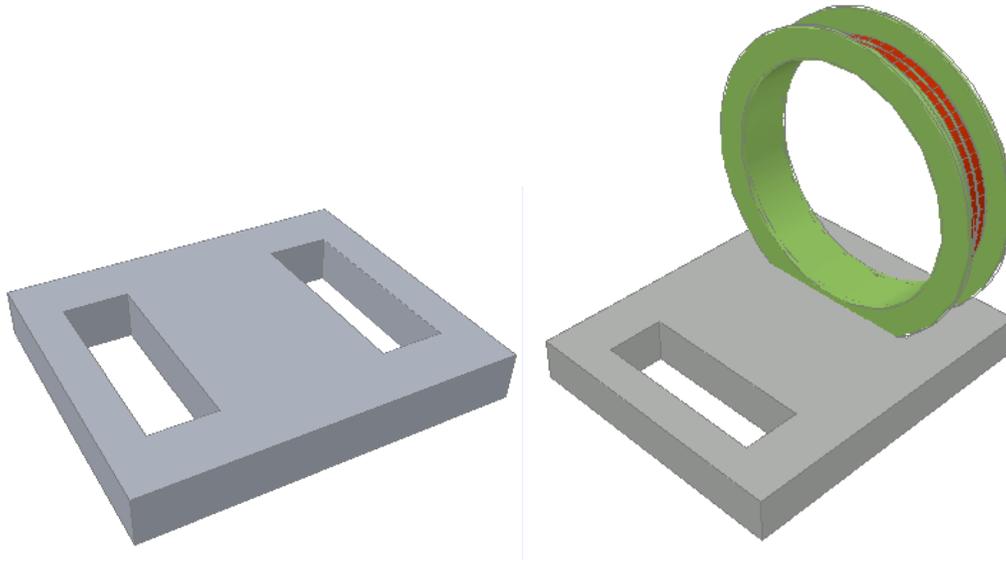


Figura 3.19 Base zócalo de montaje de bobinas.

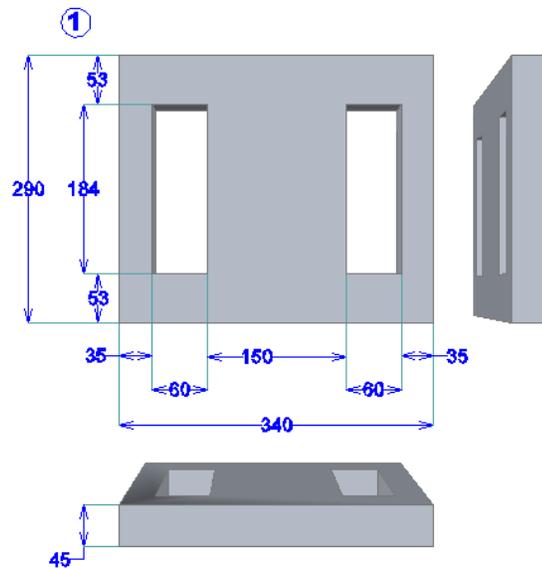


Figura 3.20 Base zócalo de montaje de bobinas y porta muestra. Todas las cotas están dadas en milímetros.

3.14. Porta muestras

En el proceso de caracterización de materiales ferromagnéticos suaves por medio de la técnica de Magnetoimpedancia se requiere colocar la muestra bajo estudio en el centro de las bobinas de Helmholtz con dos grados de libertad por lo que se maquinó un porta muestras que permita variar la altura en z y posición en el eje y . Con lo anterior se garantiza que la muestra bajo estudio sea colocada en el volumen crítico de las Bobinas de Helmholtz, donde se ubica la mayor

concentración de líneas de campo magnético en el interior de los carretes. Como se muestra en la figura 3.21.

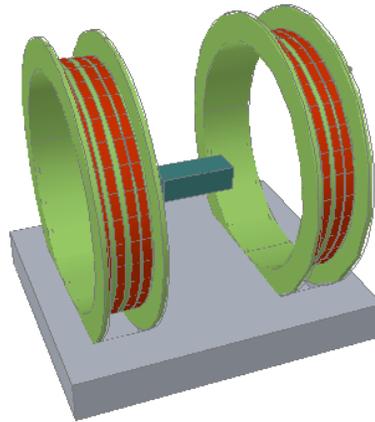


Figura 3.21 Ubicación de la muestra bajo prueba.

La montura está constituido por un poste fijo y un pivote ajustable, están fabricados con poliamida Nylomaq 901 resistente a la tensión y al impacto para su fácil maquinado, es un material no metálico, no conductor que no modifique la distribución de líneas de campo magnético. En la figura 3.22 se muestra una fotografía del porta muestras y en la figura 3.23 presenta un isométrico empleado para su maquinado en el taller del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM.



Figura 3.22 Vista de porta muestras con Nylomaq 90.

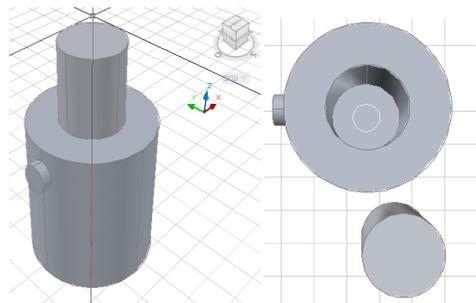


Figura 3.23 Isométrico de la montura para su maquinado.

Capítulo 4

Bobinas de Helmholtz

Una componente importante para la instrumentación de la técnica de medición de Magnetoimpedancia es la generación de un campo magnético uniforme, que pueda ser controlado a través de la corriente directa, con un intervalo de intensidad de campo magnético de 0 hasta 200 Oe y un volumen mínimo de estabilidad de 1 cm^3 . Las bobinas de Helmholtz es un arreglo que cumple con estas condiciones. A continuación se presenta, la forma en que se construye dichas bobinas.

En esta sección se presenta el principio de operación de una bobina, refiriendo al campo electromagnético generado por un conductor eléctrico circular por el cual circula una intensidad de corriente eléctrica, comenzando desde la descripción de intensidad y densidad de corriente hasta llegar a fuerza y campo magnético en materiales conductores. Se aborda la revisión actual de bobinas de Helmholtz comerciales, así como sus aplicaciones en la industria y en laboratorios de desarrollo.

Principio de operación Bobinas de Helmholtz.

El arreglo conocido como Bobinas de Helmholtz se obtiene con dos bobinas circulares concéntricas de Radio R , en serie con sus centros geométricos separados una distancia R a lo largo del eje de simetría (eje y) e igual al radio de una bobina o carrete, como se muestra en las figuras 4.1 y 4.2. Este arreglo permite obtener una zona de campo magnético uniforme alrededor del punto central O. La corriente eléctrica fluye en la misma dirección en cada bobina.

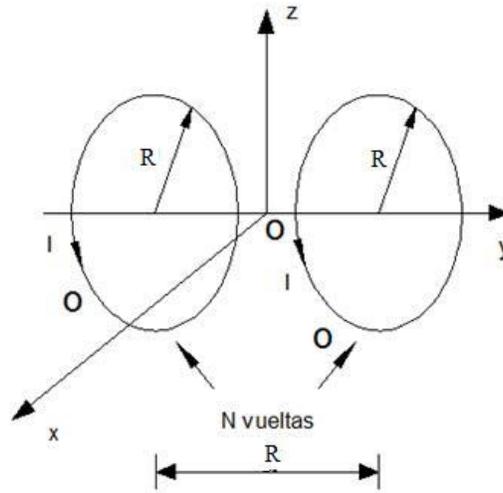


Figura 4.1. Vista 2D Geometría Helmholtz.

Este arreglo fue desarrollado por el físico alemán Hermann Von Helmholtz. La intensidad del campo magnético es proporcional al número de espiras y a la corriente eléctrica que circula por los embobinados [24]. El campo magnético uniforme dentro del cuerpo de la bobina es la suma de los campos magnéticos paralelos al eje y, y la diferencia de componentes de campo verticales. Las bobinas pueden ser operadas con fuentes de alimentación eléctrica de corriente alterna o corriente directa.

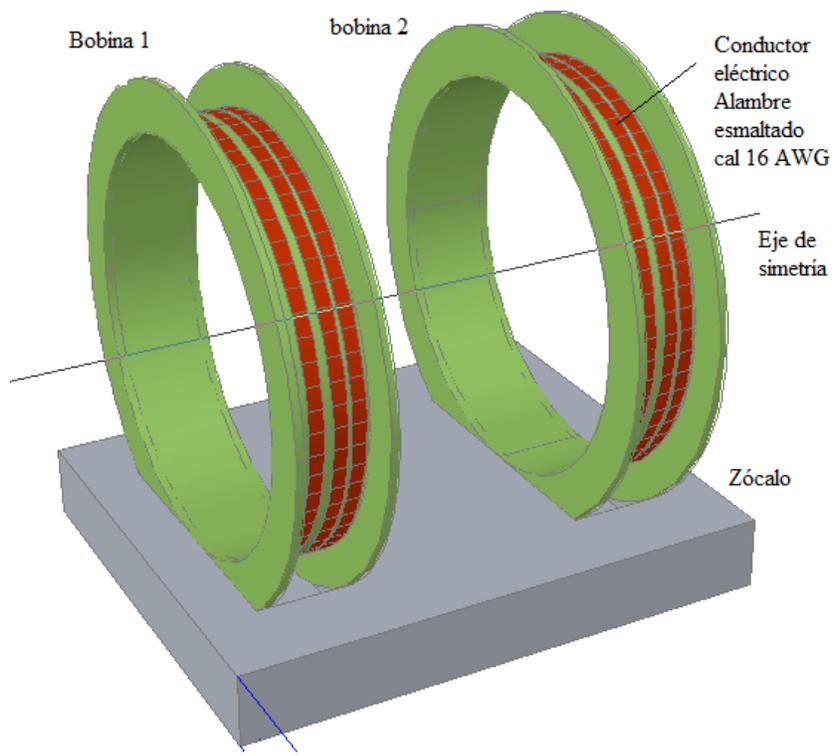


Figura 4.2 Vista 3D Geometría Helmholtz [27].

El diseño de la bobina de Helmholtz es simple, existen en el mercado disponibilidad de prototipos para todo tipo de aplicación. Además de los experimentos en Bioelectrónica y experimentos de susceptibilidad magnética, las bobinas de Helmholtz son típicamente empleadas en laboratorios de investigación así como en las siguientes aplicaciones.

- Medición del momento magnético permanente.
- Pruebas de susceptibilidad y compatibilidad de dispositivos electrónicos.
- Compensación del campo magnético terrestre.
- Aplicaciones biomédicas.

Materiales no magnéticos.

En los materiales no magnéticos, las corrientes arbitrarias de los electrones de sus átomos prácticamente no se orientan en presencia de un campo magnético, sino que siguen girando en todas las direcciones posibles, de manera que cancelan sus efectos y no contribuyen al valor del campo magnético. Entre los innumerables materiales no magnéticos se encuentran la corteza terrestre, el aire, aislantes como polímeros, y los conductores como el cobre o el aluminio. Todos ellos tienen una susceptibilidad magnética despreciable y por tanto, una permeabilidad magnética μ prácticamente igual a la del vacío μ_0 .

4.1. Ecuaciones para la Bobina de Helmholtz

El campo electromagnético generado por un conductor eléctrico por el cual circula una intensidad de corriente eléctrica I , satisface las ecuaciones de Maxwell. El campo electromagnético generado por un espira circular de radio a puede ser determinado por teoría de circuitos eléctricos usando una corriente eléctrica uniforme como fuente para el potencial magnético vectorial.

Caso 1: La densidad de flujo magnético B en [Teslas] puede ser obtenida a partir del rotacional de potencial magnético. El Potencial magnético es dado por [25, 26]:

$$\vec{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l}}{\vec{r} - \vec{r}'} \quad 4.0.1$$

Donde:

A es el potencial magnético.

I corriente que circula a través de una espira.

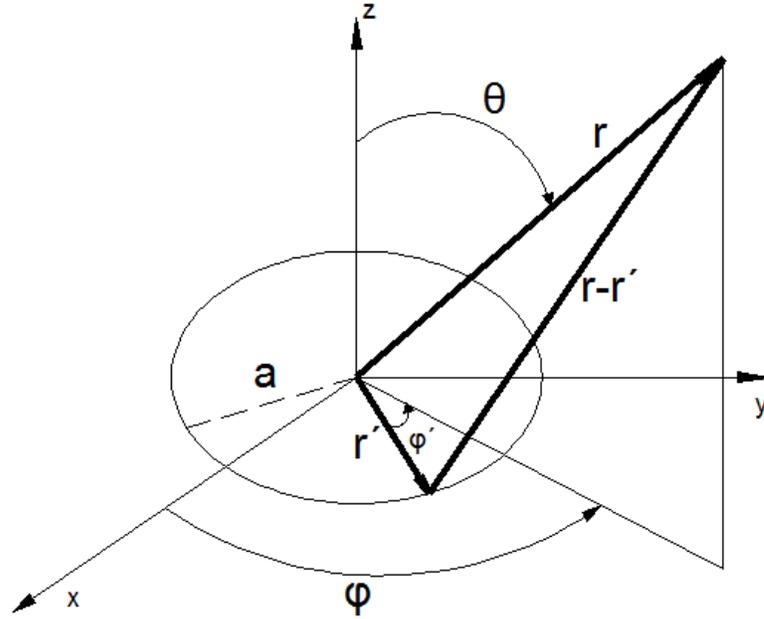


Figura 4.3. Descripción de componentes en una espira de conductor eléctrico.

Las siguientes expresiones pueden derivarse a partir de la figura 4.3. Haciendo $R = a$ [25]

$$d\vec{l} = (r \sin \phi', r \cos \phi', 0)d\phi$$

$$\vec{r} = (r \sin \theta, 0, r \cos \theta)$$

$$\vec{r}' = (a \cos \phi', a \sin \phi', 0)$$

Por el teorema de Pitágoras:

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{\vec{r}^2 + \vec{r}'^2}$$

Por lo tanto,

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(r \sin \theta - a \cos \phi')^2 + (-a \sin \phi')^2 + (r \cos \theta)^2}$$

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(r^2 \sin^2 \theta - 2r \sin \theta a \cos \phi' + a^2 \cos^2 \phi' - a^2 \sin^2 \phi' + r^2 \cos^2 \theta)}$$

Identidad trigonométrica $(\sin^2 u + \cos^2 u) = 1$

$$r^2(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = r^2$$

$$a^2(\sin^2 \phi' + \cos^2 \phi') = a^2$$

$$\vec{r} - \vec{r}' = \left| \sqrt{r^2 + a^2 - 2rasin \theta \cos \phi'} \right|$$

4.0.2

$$A_{\phi}(r, \theta) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\cos \phi'}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ra \sin \theta \cos \phi'}} d\phi \quad 4.0.3$$

Expresando la ecuación en forma cilíndrica:

$$r^2 = \rho^2 + a^2$$

$$\sin \theta = \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 + z^2}}$$

$$A_{\phi}(\rho, z) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\cos \phi'}{\sqrt{\rho^2 + a^2 + z^2 - 2a\rho \cos \phi'}} d\phi \quad 4.0.4$$

Haciendo un cambio de variable tal que $\cos \phi' = (2\sin^2 \phi' - 1)$

Así mismo, haciendo el límite superior de la integral $\frac{\pi}{2}$. La forma de la gráfica de la función $\cos \phi'$ en el intervalo $[0, \pi]$ es exactamente la misma que la función $2\sin^2 \phi' - 1$ en el intervalo $[0, \frac{\pi}{2}]$, por lo que el resultado en la integral no se altera si se realiza este cambio de variable, el área bajo la curva que describe la integral seguirá siendo la misma.

$$\sqrt{\rho^2 + a^2 + z^2 - 2a\rho \cos \phi'} = \sqrt{\rho^2 + a^2 + z^2 - 2a\rho(2\sin^2 \phi' - 1)}$$

$$\sqrt{\rho^2 + a^2 + z^2 - 4a\rho \sin^2 \phi' + 2a\rho}$$

$$\sqrt{\rho^2 + 2\rho a + a^2 + z^2 - 4a\rho \sin^2 \phi' + 2a\rho - 2\rho a}$$

$$\rho^2 + 2\rho a + a^2 = (\rho + a)^2 =$$

$$\sqrt{(\rho + a)^2 + z^2 - 4a\rho \sin^2 \phi'}$$

$$A_{\phi}(\rho, z) = \frac{\mu_0 IA}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(2\sin^2 \phi' - 1)}{\sqrt{(\rho + a)^2 + z^2 - 4a\rho \sin^2 \phi'}} d\phi \quad 4.0.5$$

Considerando:

$$k^2 = \frac{4a\rho}{(\rho + a)^2 + z^2}$$

Potencial vectorial en términos de integrales elípticas de primer y segundo orden.

$$A_\phi(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{a}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{1}{2} k^2\right) K(k) - E(k) \right] \quad 4.0.6$$

Donde

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{(1 - k^2 \sin^2 \phi')}} d\phi$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \phi') d\phi$$

El campo magnético de una sola espira está dado como el rotacional del potencial magnético A.

$$A = \nabla \times A$$

$$B_\rho(\rho, z) = -\frac{dA_\phi}{dz}, \quad B_z(\rho, z) = \frac{1}{\rho} \frac{d}{dz} (\rho A_\phi) \quad 4.0.7$$

$$B_\rho(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{z}{\rho \sqrt{(\rho + a)^2 + z^2}} \left[\frac{\rho^2 + a^2 + z^2}{(\rho - a)^2 + z^2} K(k) - E(k) \right] \quad 4.0.8$$

$$B_z(\rho, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{\rho \sqrt{(\rho + a)^2 + z^2}} \left[\frac{\rho^2 - a^2 - z^2}{(\rho - a)^2 + z^2} K(k) - E(k) \right] \quad 4.0.9$$

La ecuación 4.0.8 y 4.0.9 dan los componentes de ρ y z del campo magnético de una espira. Para la bobina de Helmholtz la expresión del campo magnético es la suma de los campos de espiras individuales.

En el eje de la espira no existe, por simetría, la componente B_ρ y según la primera expresión de 3.0.7, A no varía a lo largo de él, siendo nulo por anularse vectorialmente las contribuciones de todas las corrientes \vec{j} a lo largo de la espira.[28] La siguiente expresión da el campo magnético total en términos de la componente z. Los dos carretes están separadas por 2d. Por lo tanto:

$$B_z(\rho, z) = B_z(\rho, z + d) + B_z(\rho, z - d) \quad 4.0.10$$

La ecuación 4.0.10 está definida para la sumatoria del campo magnético para una espira individual.

La expresión para el campo magnético total, aplicando la regla de la cadena, la espira se convierte en:

$$B_z = \frac{\mu_0 a^2 I}{2(a^2 + z^2)^{3/2}}$$

El campo magnético a lo largo del eje debido a ambas bobinas es:

$$B_z = \frac{\mu_0 a^2 I}{2} \left[\frac{1}{(a^2 + (d - z)^2)^{3/2}} + \frac{1}{(a^2 + (d + z)^2)^{3/2}} \right]$$

Para la bobina tenemos N número de espiras la ecuación para la densidad de campo magnético es:

$$B_z = \frac{\mu_0 a^2 IN}{2} \left[\frac{1}{(a^2 + (d - z)^2)^{3/2}} + \frac{1}{(a^2 + (d + z)^2)^{3/2}} \right]$$

La ecuación se resuelve para $z=0$ al centro de los ejes entre dos bobinas.

$$B_0 = \frac{\mu_0 IN}{a} (0.8)^{3/2}$$

Caso 2: El eje espira es la única línea donde se puede calcular fácilmente \bar{B} por la ecuación de Biot-Savart, ya que fuera de él estas integrales son elípticas. En dicho eje no existe, por simetría, la componente B_r . La expresión que permite obtener el campo magnético \mathbf{B} en puntos sobre el eje y el cual pasa por los centros de las bobinas se define de la siguiente manera: Si $R = a$

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI a^2}{2} \left[\frac{1}{\left[\frac{5a^2}{4} + ay + y^2 \right]^{3/4}} + \frac{1}{\left[\frac{5a^2}{4} - ay + y^2 \right]^{3/4}} \right] \quad 4.1$$

Si $y = 0$, por lo tanto para B_0

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI a^2}{2} \left[\frac{1}{\left[\frac{5a^2}{4} \right]^{3/4}} + \frac{1}{\left[\frac{5a^2}{4} \right]^{3/4}} \right] \quad 4.2$$

Simplificando B_0

$$\frac{1}{\left[\frac{5a^2}{4} \right]^{3/4}} = \frac{1}{\frac{\sqrt[2]{(5a^2)^3}}{\sqrt[2]{4^3}}} =$$

$$\frac{1}{\frac{\sqrt[2]{(5^3 a^6)}}{\sqrt[2]{64}}} = \frac{1}{\frac{5^{3/2} a^3}{8}} = \frac{8}{5^{3/2} a^3}$$

$$\frac{8}{5^{3/2}a^3} + \frac{8}{5^{3/2}a^3} = \frac{16}{5^{3/2}a^3}$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I a^2}{2} \frac{16}{5^{3/2} a^3}$$

$$\text{Simplificando} \quad B_0 = \frac{\mu_0 N I}{a} \frac{8}{5^{3/2}} \quad 4.3$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{a} 0.8^{3/2} \quad 4.4$$

B_0 Densidad de Flujo magnético generado por N espiras en el punto medio del eje y [Teslas T]

μ_0 Permitividad en el espacio libre [$Wb/Amp \cdot m$]

N Número de vueltas en cada bobina.

I Flujo de corriente eléctrica a través de cada bobina [A]

a Radio medio de carrete

4.2. Construcción de Carretes.

Los carretes son el soporte que sostiene los embobinados del par Helmholtz, en la elección del material se toman las siguientes consideraciones:

- Excelentes propiedades mecánicas. (Dureza, resistencia y elasticidad)
- Buena resistencia térmica.
- Ligereza.
- Excelente relación costo beneficio.
- Facilidad de maquinado.
- Composición o material no ferroso.
- Soportar incrementos de temperatura de hasta 150° Celsius.

Para la estructura de los carretes se adquirió una placa cuadrada de Nylomaq 901 tipo M de 2.5"x24"x24" (espesor, lado, lado), el cual se obtiene mediante un proceso de vaciado desde su fabricación. Es un polímero modificado con lauril-lactama. Es un material duro resistente a la tensión y al impacto, aspectos favorables en el proceso de maquinado en maquina torno. En la figura 4.4 se muestran las dimensiones de la estructura de los carretes.

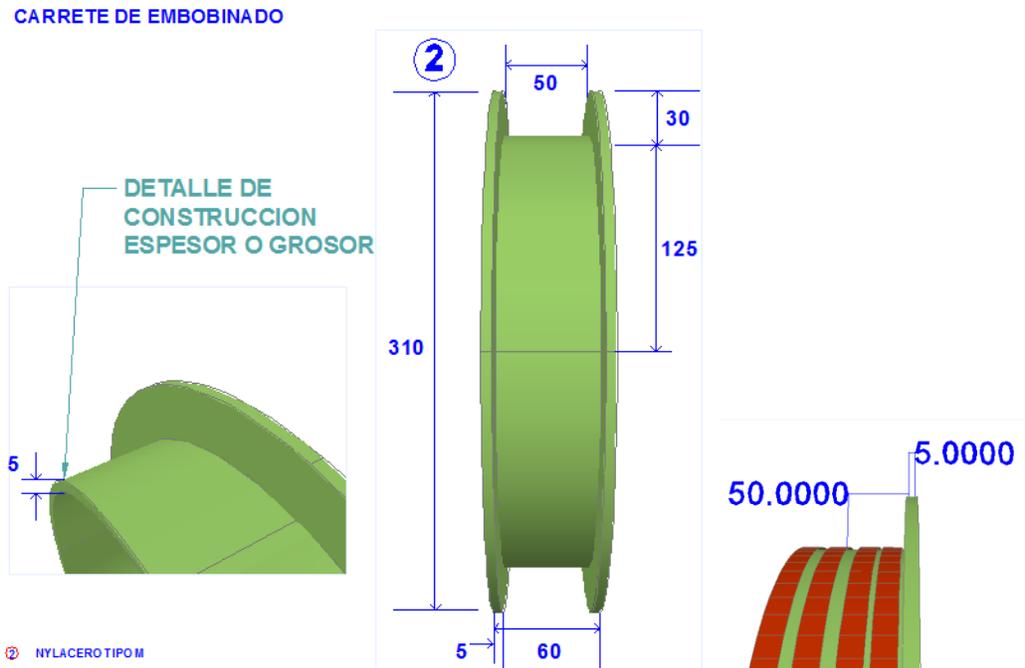


Figura 4.4 Vista 3D Isométrico. Carrete para bobina sin conductor eléctrico, todas las cotas están dadas en milímetros. [28][29]

En el proceso de maquinado de los carretes se realizó el corte de la placa por medio de una máquina de corte a chorro de agua cortando el diámetro exterior e interior de las circunferencias. El peralte se efectuó por medio de un torno tomando los detalles del isométrico de la figura 4.4 y 4.5.



Figura 4.5 Vista 3D Isométrico.

4.3. Conductor eléctrico de embobinado. Alambre esmaltado.

El arrollamiento de las bobinas está formado por m capas de n espiras de conductor eléctrico de cobre electrolítico (99 % cobre) con recubrimiento a base de poliuretanos modificados, el

conductor proporciona alta resistencia a la temperatura de 150° C, flexibilidad, adherencia y resistencia mecánica.

Para la elección del calibre del conductor eléctrico de cobre suave esmaltado⁹ se considera una carga máxima por carrete de 5 amperes de acuerdo a la tabla 3.2, el conductor eléctrico calibre 16 AWG con recubrimiento marca CONDUMEX es el ideal ya que conduce un máximo de 6 amperes nominales. Así mismo flexibiliza el embobinado de los devanados [31].

A continuación se enlista algunas aplicaciones del conductor eléctrico esmaltado:

- Devanado de transformadores tipo: instrumento, distribución o potencia.
- Motocompresoras herméticas.
- Bobinas en general.
- Inductancias para divers o fuentes conmutadas.

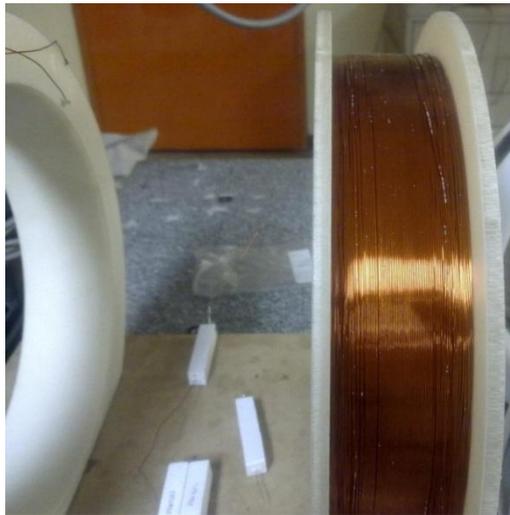


Figura 4.6 Proceso de embobinado.

En la figura 4.6 se observa las capas de alambre esmaltado acomodado en forma de capas o camas perfectamente distribuidas a lo ancho del cuerpo del peralte del carrete, el objetivo es que no se presentaran volúmenes de aire en el cuerpo del embobinado. La tabla 3.2 describe las dimensiones y tolerancias de fabricación del alambre esmaltado marca CONDUMEX calibre 16 AWG utilizado para los devanados de las bobina de HelmHoltz. El acomodo de los arrollamientos de realizó a mano.

⁹ Alambre esmaltado (magneto): Conductor eléctrico de cobre electrolítico, una vez devanado y energizado, genera y mantiene un campo magnético útil en el devanado de un equipo eléctrico o electrónico. [26]

Calibre	Diámetro del alambre esmaltado en [mm]		Diámetro del alambre esmaltado en [Pulgadas]		Carga máxima en [Amperes]
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	Amp.
16	1.313	1.349	0.0517	0.0531	6

Tabla 3.2 Dimensiones y carga máxima del alambre esmaltado seleccionado¹⁰.

4.4. Cálculo del número de espiras por carrete.

El campo magnético generado por N espiras en el punto medio del eje de simetría y *esta* dado por la siguiente expresión:

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{a} 0.8^{3/2}$$

Donde:

B_0 Densidad de Flujo magnético en el punto medio [eje y] entre bobinas [Teslas T]

$$[T = Wb/m^2 = N/A \cdot m]$$

Para obtener el número de vueltas por carrete en bobinas de Helmholtz despejamos N :

$$N = \frac{B_0 a}{\mu_0 I 0.8^{3/2}} \tag{4.5}$$

Sustituyendo valores para el cálculo del número de vueltas N

$$B_0 = 0.02 \quad [T = Wb/m^2 = N/A \cdot m]$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$$

$$I = 4 \text{ Amperes}$$

$$a = 0.14 \text{ m}$$

Por lo tanto:

¹⁰ NOM-002-SEDE-2005

$$N = \frac{B_0 a}{\mu_0 I 0.8^{3/2}} = 778.5 \text{ vultas por carrete}$$



Figura 4.7 Bobinas de Helmholtz maquinada y con carretes embobinados.

En la figura 4.7 se muestra las bobinas de Helmholtz como producto terminado.

Idealmente las bobinas de Helmholtz producirán una zona de campo magnético uniforme generado por 778.5 vultas por carrete de la siguiente manera:

$$B_0 = \frac{\mu_0 N I}{a} 0.8^{3/2}$$

$I = 4 \text{ Amperes}$ Limitado a 4 Amp de la fuente de alimentación de D.C.

$a = 0.14 \text{ m}$

$N = 778.5 \text{ vultas por carrete}$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$

$$B_0 = 0.0200 \text{ Teslas.}$$

Los carretes fueron embobinados a 902 vueltas acotadas al siguiente criterio:

- En experimentos posteriores se empleará una fuente de alimentación de corriente DC de mayor capacidad con el propósito de generar un campo magnético de mayor amplitud.
- Las bobinas de Helmholtz se pueden considerar semejantes a un transformador por lo que la curva de diseño debe estar al 80 % del máximo de la carga nominal disponible con el fin de no provocar sobrecalentamientos que repercutan fatiga en el recubrimiento

dieléctrico del material conductor de los carretes. Razonamiento por el cual se amplió el número de vueltas 20% por carrete a lo obtenido en el cálculo. [32]

- Además se aprovecho al máximo el peralte (área disponible) del carrete. Como se observa en la figura 4.6 la distribución del alambre coincide con la parte alta de la sección disponible. [33]
- En experimentos y mediciones realizadas con las bobinas de Helmholtz no se presento ningún calentamiento o sobrecalentamiento que pudiera poner en riesgo al usuario o al equipo. Se aplico una corriente igual a 4 Amperes.

4.5. Caracterización de la Bobina de Helmholtz.

En la figura 4.8 se observa la respuesta de la Bobina de Helmholtz, campo magnético en Oe (Oesters) en función de la Intensidad de corriente eléctrica dc aplicada en Amperes, limitada a la fuente de alimentación de corriente controlada por voltaje KEPCO, Modelo: BOP 100-4M. La curva tiene una respuesta lineal por lo tanto la intensidad de campo magnético resultante B es lineal a la corriente eléctrica dc aplicada, lo cual indica la estabilidad de la generación de campo magnético.

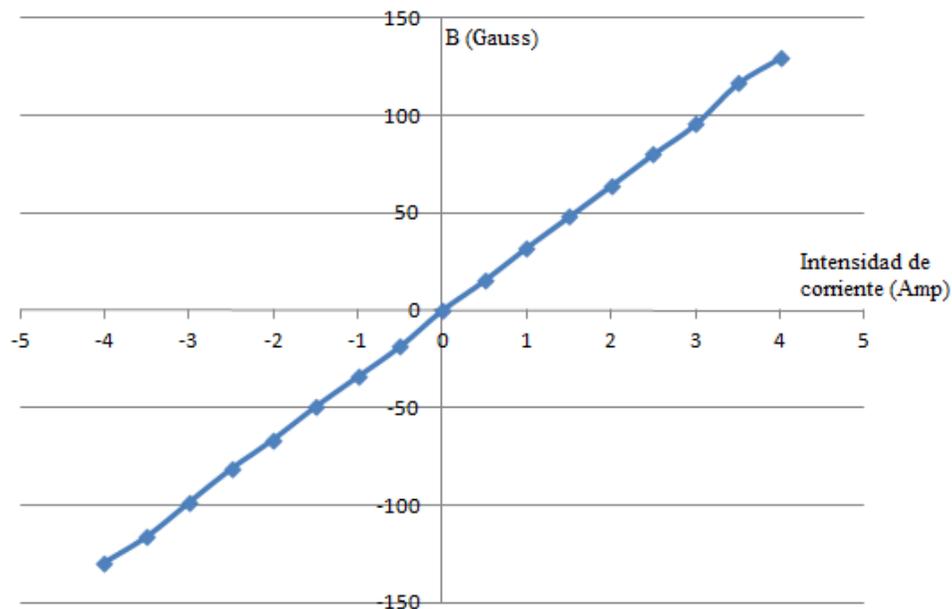


Figura 3.8 Medición de la respuesta de la Bobina de Helmholtz.

Conducción de carga a través de un sólido homogéneo.

Dado que los átomos de un sólido están fijos en la estructura del material, el flujo de carga o conducción a través de ellos es debido a electrones libres. Es por ello que un sólido conduce,

siempre y cuando existan electrones libres. La energía que puede poseer un electrón está cuantizada (toma valores discretos); a este conjunto de valores de energía se les denomina niveles energéticos del electrón o bandas, éstas están separadas debido a que existen rangos de valores de energía que el electrón no puede poseer; a tales rangos se les denomina zonas prohibidas. La figura 4.9 muestra las bandas para un material semiconductor separadas en dos grupos llamadas bandas de conducción y bandas de valencia

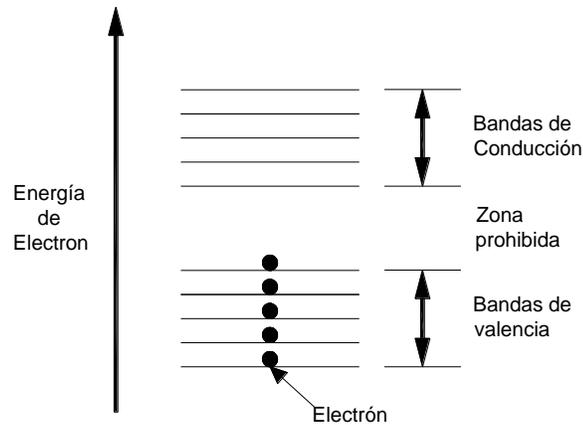


Figura 4.9 Esquema de las andas de energía para los electrones de un átomo

Las bandas de valencia representan los niveles de energía que poseen los electrones de los átomos o moléculas cuando el material no recibe energía externa. Las bandas de conducción representan los niveles que pueden tener el electrón cuando recibe energía adicional. La zona prohibida central, en términos de energía, representa la necesaria para que los electrones de la banda de valencia de mayor energía (exteriores), pasen a la banda de conducción de menor energía.

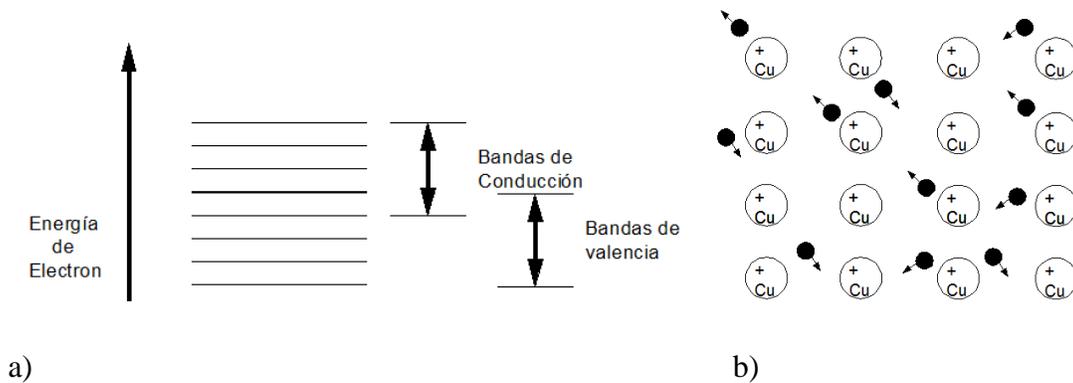


Figura 4.10 a) Representación esquemática de las bandas de energía

b) Estructura cristalina para el cobre.

En la figura 4.10 se observa las bandas están traslapadas, (bandas de energía de un metal) esto se debe a que el enlace metálico que existe entre los átomos implica la existencia de electrones libres (electrones en las bandas de conducción). Los electrones exteriores de los átomos de los metales son compartidos con los átomos vecinos, lo que da la rigidez a su estructura. Por lo anterior, no se requiere energía para liberar estos electrones de la influencia del núcleo, aun la aplicación de un campo eléctrico pequeño a estos materiales produce corriente eléctrica.

Variación de la Resistividad eléctrica.

Principio de conservación de la carga.

Se ha demostrado experimentalmente que la carga eléctrica en un sistema aislado se conserva por lo que si evaluamos el flujo del vector densidad de corriente \mathbf{J} a través de una superficie cerrada, obtenemos:

$$\phi_j = \oint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} = \frac{dq}{dt} = -\frac{dQ}{dt} \quad 4.6$$

Donde:

\mathbf{J} Densidad de corriente

q Carga neta que cruza la superficie considerada hacia afuera.

Q Carga contenida en el volumen encerrado por la superficie.

La expresión analítica que describe la resistividad de los materiales es:

El signo negativo al final de la expresión se demuestra de la forma siguiente:

$$Q(t) = Q_0 - q(t) \quad 4.7$$

Donde:

Q_0 es la carga inicial encerrada

Al derivar la ecuación 4.7 obtenemos la relación deseada:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{dq}{dt} \quad 4.8$$

Ley de Ohm para sólidos homogéneos.

Para efectos de simplificar nuestro estudio de movimiento de carga a través de la materia lo acotaremos a sólidos homogéneos. El movimiento de las partículas no es uniforme ya que chocan constantemente con la estructura del material debido a la agitación térmica, es posible

considerar que el campo eléctrico aplicado las desplaza a una velocidad constante, ésta es un promedio de la velocidad con la que se mueven las partículas cargadas en la línea de acción el campo eléctrico aplicado, para sustancias homogéneas es directamente proporcional al campo eléctrico aplicado, por lo tanto:

$$V_p \propto E$$

Donde:

V_p Promedio de la velocidad con la que se mueven las partículas cargadas en la línea de acción el campo eléctrico aplicado

E Campo eléctrico aplicado

La expresión anterior se puede expresar con una igualdad, introduciendo la constante de proporcionalidad requerida, por lo tanto:

$$V_p = \mu E \tag{4.9}$$

μ Permeabilidad eléctrica del material

Por otra parte la densidad de corriente J está definida por:

$$J = \rho_L V_p = n q V_p \tag{4.10}$$

Donde:

ρ_L Densidad de portadores de carga por unidad de volumen.

$$V_p$$

n Número de portadores por unidad de volumen en el material

q Carga de cada uno de los portadores por unidad de volumen.

Si sustituimos en la ecuación 4.9 en la ecuación 4.10 obtenemos:

$$J = nq\mu E \tag{4.11}$$

Para los portadores en estudio la cantidad $nq\mu$ es una constante llamada conductividad y es representada por:

$$\sigma = nq\mu \tag{4.12}$$

Sus unidades son:

$$[\sigma]_u = \frac{1}{m^3} C \frac{C \cdot m}{N \cdot s}$$

$$\frac{C}{s} = A, \quad \frac{N \cdot m}{C} = V$$

$$[\sigma]_u = \frac{A}{V \cdot m}$$

Sustituyendo 3.12 en 3.11:

Expresión vectorial de la ley de Ohm.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

La resistividad es el recíproco de la conductividad y se expresa por:

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} = \frac{1}{\sigma}$$

La carga eléctrica se conserva, si una cierta cantidad de carga neta cruza la superficie hacia afuera, en esa misma cantidad debe disminuir la carga contenida en dicha superficie. [6]

$$\rho = \frac{1}{nq\mu}$$

$$\rho \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$$

$$n \text{ Número de portadores por unidad de volumen en el material} \quad \left[\frac{1}{m^3}\right]$$

$$q \text{ Carga eléctrica de cada uno de los portadores} \quad [C]$$

$$\mu \text{ Permeabilidad eléctrica del material} \quad \left[\frac{C \cdot m}{N \cdot s}\right]$$

$$\sigma = nq\mu \text{ Conductividad [Ro]} \quad \left[\frac{A}{V \cdot m}\right]$$

4.6. Efecto de la variación de la temperatura en la resistividad.

En los metales, el efecto de la temperatura se refleja fundamentalmente como un decremento de la movilidad μ de los electrones.

La energía en forma de calor que recibe el metal se traduce, desde el punto de vista macroscópico, en un incremento de temperatura y, desde el microscópico, en un incremento de la energía cinética de las partículas que lo constituyen. El movimiento de los electrones libres en un material es completamente aleatorio, chocan constantemente con la estructura del metal, cuando

se le aplica un campo eléctrico, dichos electrones conservan el movimiento aleatorio mencionado cambiando el sentido de colisión. Al aumentar la temperatura, aumenta la probabilidad de que los electrones choquen con la estructura del material y se reduzca así la movilidad. La resistividad de los metales aumenta al aumentar la temperatura. Para diversos metales el comportamiento de la resistividad es semejante. La resistividad puede ser representada por la serie de potencias de la ecuación 4.13.

$$\rho = \rho_0 + aT + bT^2 + cT^3 + \dots \quad 4.13$$

Donde el número de términos empleados depende de la aproximación requerida, y los valores de las constantes dependerán del metal seleccionado. Para la temperatura de interés, en la mayoría de los problemas en ingeniería la temperatura de operación varía de -50°C a 400°C aproximadamente, la función de resistividad de los metales y sus aleaciones tiene un comportamiento lineal. Podemos aproximar la función para el rango de temperaturas mencionado mediante una recta, simplificando la ecuación a:

$$\rho = \rho_0 + aT$$

Factorizando:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{a}{\rho_0} T \right)$$

A la expresión $\frac{a}{\rho_0}$ se le conoce como coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura para cero $^\circ\text{C}$, es representada por α_0 , por lo tanto:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha_0 T)$$

Por definición a una temperatura T_x , $\alpha_x = \frac{a}{\rho_x}$ $[\alpha]_u = \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Se conoce la resistividad y el coeficiente α de los materiales a temperatura ambiente. De la ecuación (4.13) las resistividades a las temperaturas T_1 y T_2 se obtiene como:

$$\rho_1 = \rho_0 (1 + \alpha_0 T_1)$$

$$\rho_2 = \rho_0 (1 + \alpha_0 T_2)$$

Igualando las ecuaciones anteriores:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1 + \alpha_0 T_1}{1 + \alpha_0 T_2}$$

En termino de α_1

Resistividad de los metales y aleaciones metálicas en función de la temperatura.

$$\rho_2 = \rho_1[1 + \alpha_1(T_2 - T_1)] \quad 4.14$$

Para ρ_1 y α_1 (Resistividad y el coeficiente de variación de resistividad a una temperatura de 20°C) es la siguiente:

$$\rho_1 = 1.72 \times 10^{-8} \quad \Omega \cdot m$$

$$\alpha_1 = 3.9 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{^\circ C}$$

Por lo tanto la resistividad de cobre electrolítico empleado para embobinar los carretes de la bobina de Helmholtz a 40 °C es:

$$\rho_2 = 63016E - 05 \quad \Omega \cdot m$$

Por lo tanto a 902 vueltas por bobina la resistividad por carrete es 1.63016E-05 $\Omega \cdot m$

Por otra parte, de acuerdo a la expresión 1.10 de la sección uno, las pérdidas por conducción por carrete de las bobinas de Helmholtz en operación normal se define de la siguiente manera:

Análisis para corriente directa V.D.C. **$\Omega/902$ vueltas.**

$$R = \rho \frac{L}{S} = 9.7 \Omega \text{ por } 902 \text{ vueltas por carrete}$$

Donde:

R : Resistencia eléctrica [Ω]

ρ : Resistividad del cobre a 23 °C. [$0.017 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$]

L : Longitud del material [metros]

Capítulo 5

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Arreglo experimental

La Magnetoimpedancia se define como el cambio en la impedancia eléctrica de corriente alterna en un conductor magnético suave, al cual se le aplica una corriente alterna de baja intensidad y frecuencia constante, con el propósito de inducir un campo alterno H_{ac} , en presencia un campo magnético H_{dc} externo; como se muestra en la figura 5.1. Los cambios en la impedancia son originados por la variación de la magnetización del material con el campo magnético H_{dc} y la excitación del campo magnético alterno afectando, así, los mecanismos conductivos. En consecuencia estos cambios en la impedancia reflejan modificaciones en la estructura magnética [34]. La dependencia de la impedancia con el campo magnético es inducida por la habilidad de los mecanismos de magnetización de responder al campo de corriente alterna H_{ac} . Por lo que el incremento en la impedancia es función de la permeabilidad eficaz del material en la dirección del campo producido por la corriente.

Para la implementación de la técnica de Magnetoimpedancia, se acoplaron todas las componentes:

- Puente de Impedancias.
- Bobina de Helmholtz.
- Fuente de alimentación de corriente eléctrica controlada por voltaje.
- Interfaz de Usuario.

Cada uno de estas componentes se han descrito en capítulos anteriores, que para su fácil manejo se separaron en bloques, en la figura 5.1 y 5.2 se observan dos diagramas esquemáticos del prototipo medición de Magnetoimpedancia.

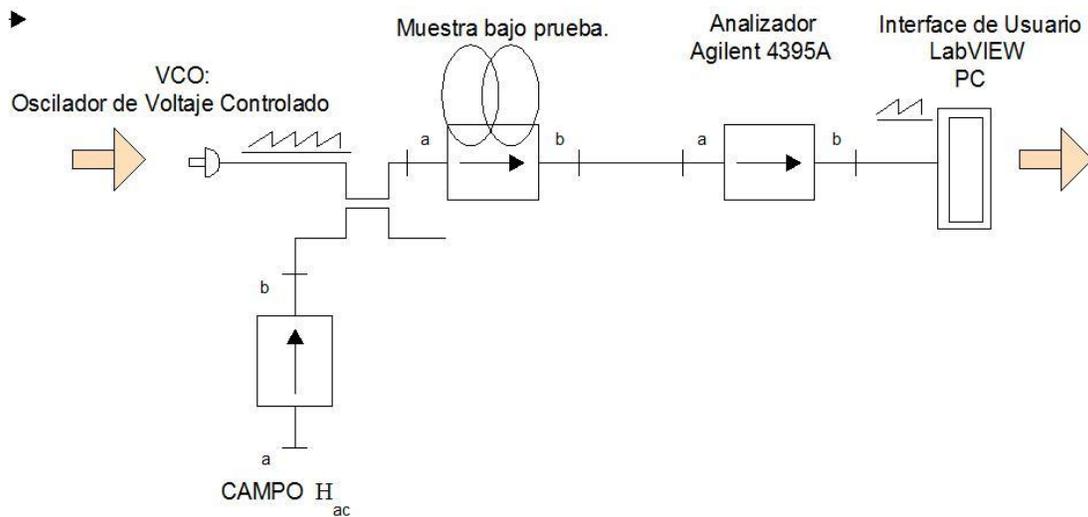


Figura 5.1 Arreglo experimental medición de Magnetoimpedancia

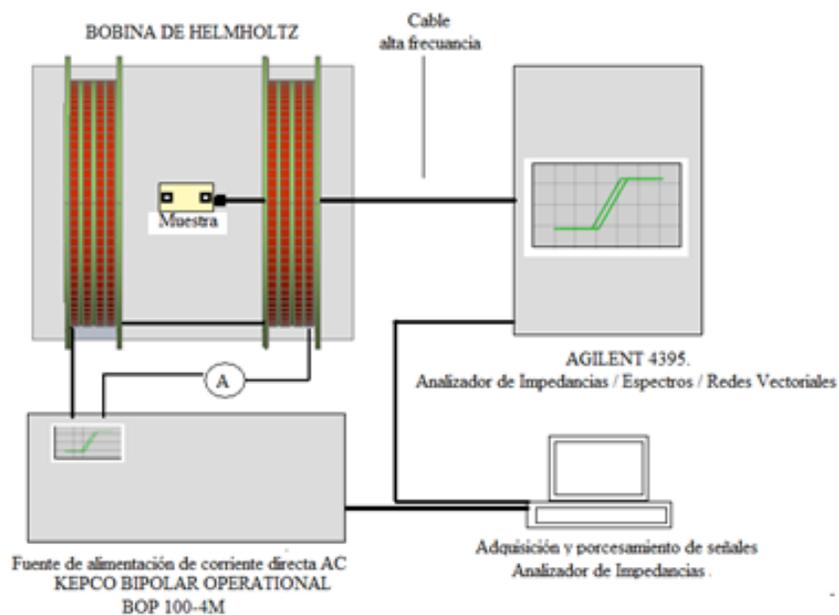


Figura 5.2 Arreglo de conexión básica para medición de Magnetoimpedancia

5.2. Curvas obtenidas a partir del parámetro de calibración para altas frecuencias línea “microstrip” colocado en el “Test fixtures” Accesorio de Pruebas.

Después de realizar el montaje de todas las componentes del sistema de medición de magnetoimpedancia, el siguiente paso fue calibrar el sistema con el kit de calibración comercial, para poder establecer una comparación con el patrón de línea “microstrip” diseñado y construido. Cabe recordar que la carga de prueba corresponde a una impedancia

de 50Ω que debe ser constante en todo el intervalo de frecuencia de la medición, esto es en el intervalo de 10 KHz a 500 MHz. En la figura 5.3 se muestra la respuesta del patrón de calibración en una línea “microstrip”. Se observa una respuesta lineal acorde al suministro de una señal de barrido de frecuencia de 10 KHz a 500 MHz, garantizando que el valor de la carga no presenta pérdidas y se puede considerar una constante. El error de medición se encuentra en un rango de 0.12Ω , el cual corresponde a un error muy pequeño con respecto al valor de cambio esperado para las mediciones de la magnetoimpedancia en muestras ferromagnéticas. En el eje “y” se gráfica el valor absoluto de la impedancia (en Ω), que directamente arroja el sistema, en el eje de las “x” se gráfica la frecuencia. Las mayores variaciones observadas se presentan a bajas frecuencias debido al tiempo de estabilización del equipo de medición.

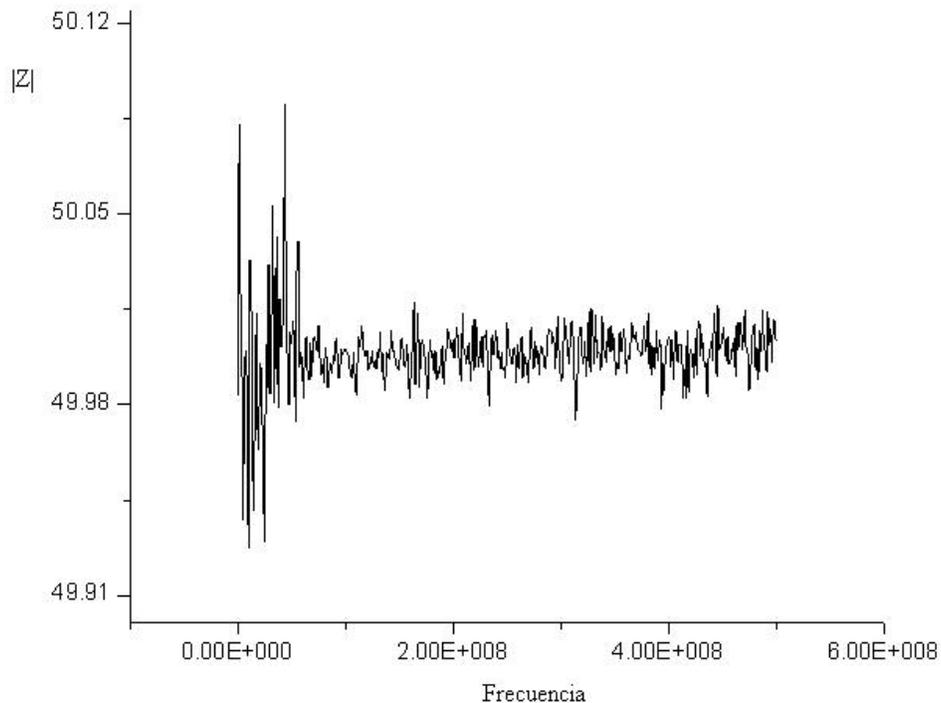


Figura 5.3. Curva de la medición del parámetro de calibración para altas frecuencias línea “microstrip”.

En la figura 5.4 se muestra la comparación de la respuesta de la impedancia característica en función de la frecuencia, así se observa la respuesta de la Línea “microstrip” Versus el Estándar de calibración Carga 50Ω , cabe mencionar que el estándar de calibración tiene conexiones del tipo APC-7 el cual es conectado al puerto de salida del “Impedance Test kit”, mientras que la línea “microstrip” es conectada con el accesorio de conexión 43961A, el cual consiste en un par de clips con electrodeposición de oro para disminuir las pérdidas óhmicas, por lo que las geometrías entre los patrones de calibración son diferentes. Haciendo la comparación de ambos patrones de calibración se observa (Figura 5.4) que ambos patrones tiene el mismo error, el comportamiento

de la impedancia en función de la frecuencia es muy parecido. La respuesta de la línea “microstrip” es muy sensible a la geometría de conexión por lo que presenta ciertos cambios abruptos en la impedancia alrededor de los 1×10^8 Hz, como se observa en la figura 5.3. Estos cambios son debidos a la diferencia entre las distancias de los contactos la cual no es constante y es difícil de controlar; y que por el hecho de trabajar a altas frecuencias se amplifican estas contribuciones a pesar que la variación en la posición es muy pequeña de alrededor de 0.1mm, estos cambios abruptos se encuentran dentro del límite del error.

Se requiere mejorar el control de la posición del patrón diseñado, pero para términos de la implementación de la técnica de magnetoimpedancia es adecuado.

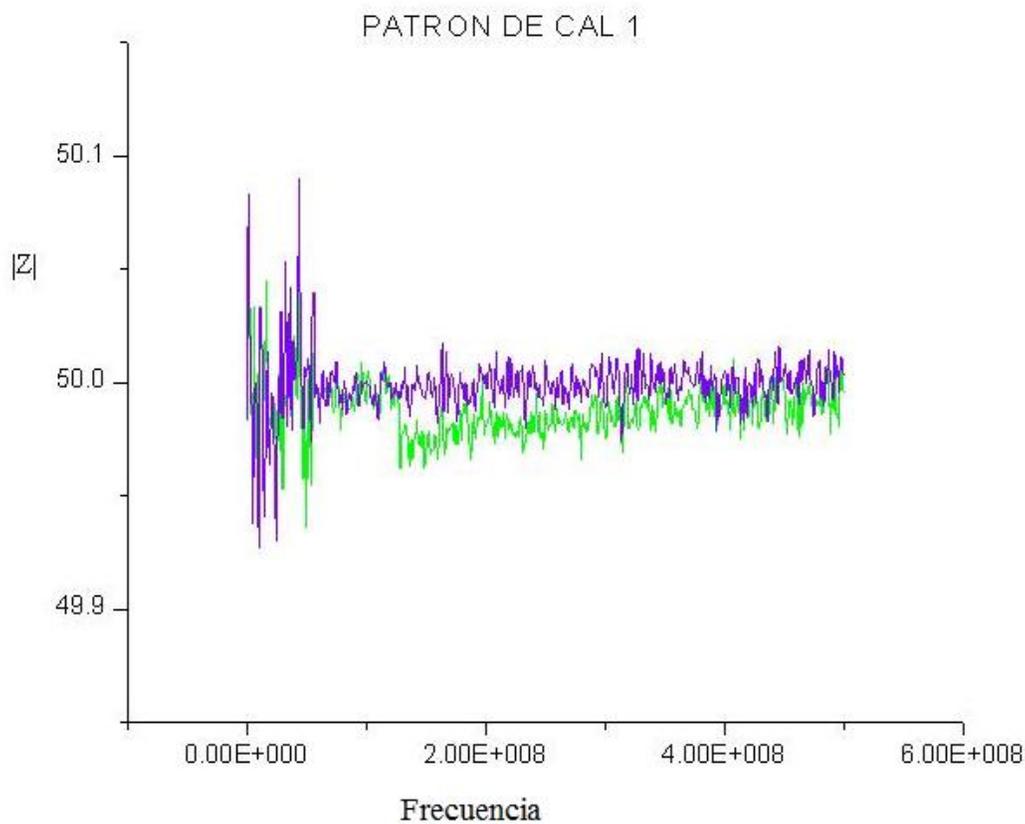


Figura 5.4 Medición del parámetro de calibración

Verde Línea “microstrip”

Azul Estándares de calibración Carga 50Ω conexión APC-7.

5.3. Mediciones de magnetoimpedancia.

Después de calibrar el sistema de medición se procedió a montar la muestra, la cual corresponde a un microhilo de composición de FeCoSiB de 30 micras de diámetro y 6 mm de longitud, el material presenta una alta inducción magnética 7000 Gauss y un campo coercitivo de 0.15 Oesterd, estas propiedades magnéticas corresponden aún material ferromagnético suave, en la figura 5.5 se observa la curva de histéresis del microhilo estudiado.

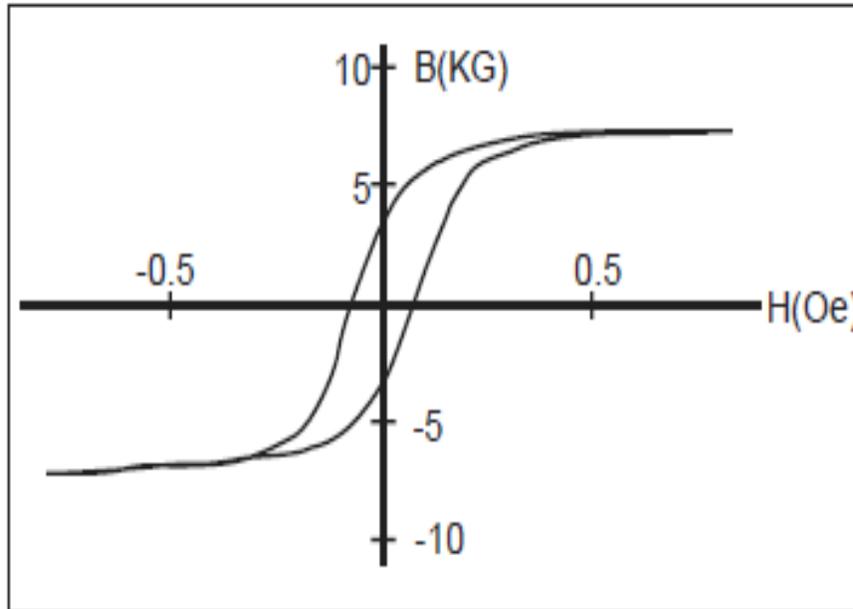


Figura 5.5 ciclo de histéresis de microhilo ferromagnético de composición FeCoSiB.

El material se coloca en un porta-muestras de tipo línea microstrip y se fija con pintura de plata de alta pureza. La muestra se coloca en el centro de las bobinas de Helmholtz.

Las mediciones de Magnetoimpedancia se realizaron en una simetría transversal, la cual consiste en aplicar un corriente AC directamente en la muestra induciéndose un campo H_{ac} transversal de acuerdo a la regla de la mano derecha.

La respuesta de Magnetoimpedancia está en función de la frecuencia y en general se puede dividir en tres regiones:

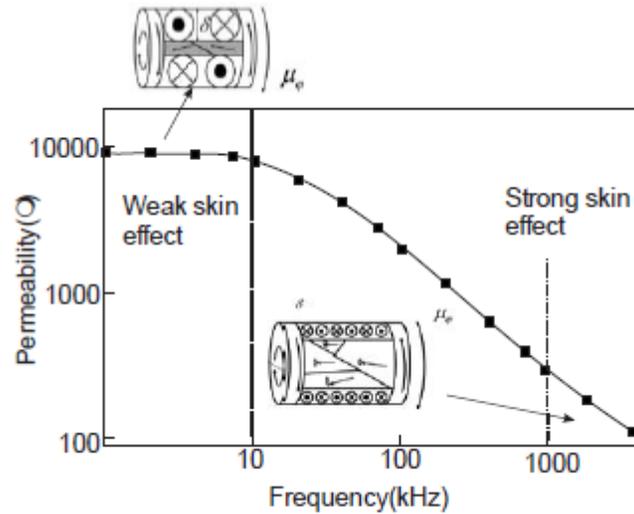
1. *Frecuencias muy bajas (del orden de 1- 10 kHz)* la dependencia de la impedancia con el campo H_{dc} es atribuida a la respuesta inductiva, la cual es proporcional a la permeabilidad circunferencial (o transversal) del material.

2. *Frecuencias bajas e Intermedias en el intervalo de algunos cientos MHz (radiofrecuencia)*, en este intervalo de frecuencias el efecto de piel es muy fuerte, el incremento de la impedancia es debido a rotaciones de espín que son excitados con el H_{ac} .
3. *Frecuencias Altas en la región de Microondas(GHz)*, en estas frecuencias la respuesta es superficial por la presencia constante del efecto de piel. En la actualidad se encuentra en discusión lo que sucede a estas frecuencias, existiendo dos puntos de vista.

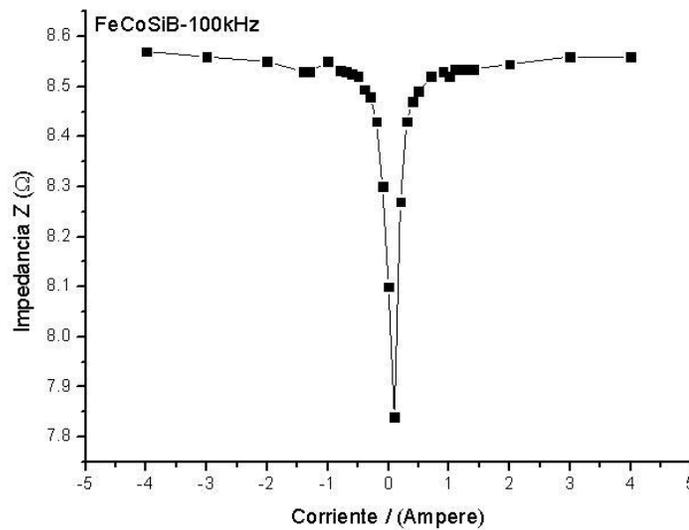
Las regiones de frecuencia en las que ocurren estos comportamientos dependen del material bajo estudio.

En particular las mediciones de magnetoimpedancia para el microhilo se realizaron en tres frecuencias diferentes a 100 KHz, 1 MHz y 5 MHz, con el objetivo de observar el cambio de la magnetoimpedancia en función de la frecuencia. Se eligieron estas frecuencias debido a la respuesta de la permeabilidad del microhilo en función de la frecuencia, como se observa en la figura 5.6a, donde la permeabilidad es constante a frecuencias menores de 10 kHz y decrece a frecuencias entre el intervalo de 10 a 1000 kHz, esto se explica en función de los procesos de magnetización asociados a la estructura de dominios magnéticos, para frecuencias mayores la permeabilidad adquiere su valor mínimo y se asocia a procesos de magnetización del espín.

En la figura 5.6b, se muestra la respuesta de la impedancia en función de la corriente aplicada a las bobinas de Helmholtz, a una frecuencia constante de 100kHz, esta gráfica corresponde a los datos crudos tal como se realiza la medición, donde falta calcular el porcentaje de cambio y pasar la corriente eléctrica a campo magnético. Sin embargo se puede apreciar el cambio del valor de la impedancia en función de la corriente (la cual es directamente proporcional al campo magnético), en este gráfico se observa como el valor de la impedancia comienza en 7.8Ω a $I=0$ A después se incrementa a un valor máximo de 8.55Ω y permanece constante, este comportamiento es debido a que la frecuencia corresponde precisamente a procesos de magnetización asociados a la estructura magnética y como puede apreciarse en la figura 5.6a) es la frecuencia donde el valor de la permeabilidad decrece, razón por la cual el cambio de la impedancia es muy pequeño y para valores de $I=4$ A, es constante.



a)



b)

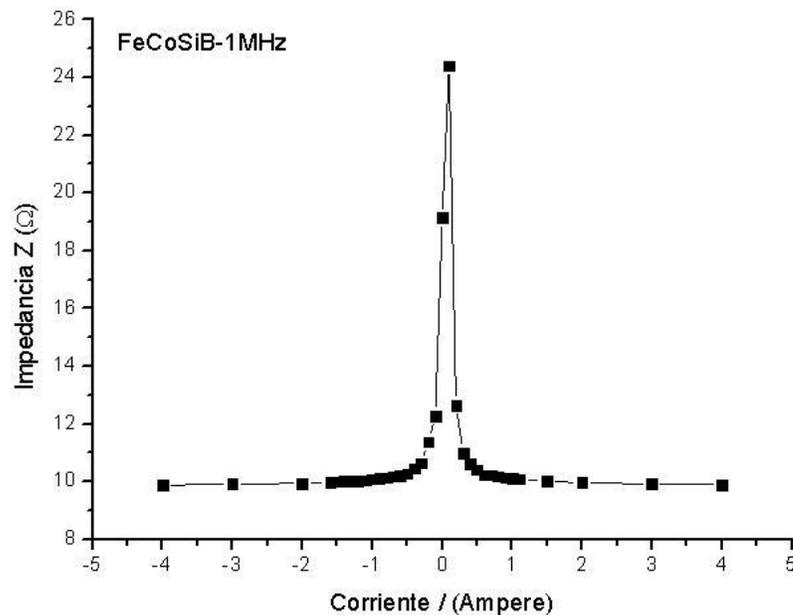
Figura 5.6 a) permeabilidad en función de la frecuencia y b) respuesta de la impedancia como función de la corriente aplicada a las bobinas de Helmholtz.

En la figura 5.7 se observa el comportamiento de la impedancia en función de la corriente para frecuencias de 1 y 5 MHz, las cuales corresponden a frecuencias donde la permeabilidad se debe exclusivamente a la rotación de espín que son excitados con el campo de corriente alterna H_{ac} . La medición obtenida corresponde a la curva característica de la medición de la magnetoimpedancia de un microhilo metálico amorfo con propiedades de un ferromagnético suave [34]. Donde puede observarse que para $I=\pm 4$ A corresponde al mínimo de la impedancia y

conforme disminuye la corriente se incrementa la impedancia hasta un valor de 26Ω para la $F=1 \text{ MHz}$ y 40Ω para 5MHz , como se esperaba la magnetoimpedancia es función de la frecuencia.

A la frecuencia de 5 MHz debería de observarse un doble pico el cual corresponde al valor de la anisotropía magnética, pero dado que el material es un ferromagnético ultra suave, es decir tiene un campo coercitivo de 0.15Oe y para valores de $I= 1\text{A}$, el material se encuentra saturado magnéticamente y se requiere de hacer barridos más finos en corriente, es decir se requiere aplicar campo magnético de menor intensidad para observar el doble pico característico en la cambio de la impedancia en función del campo magnético, en este sentido, la medición está limitada instrumentalmente debido a la sensibilidad de la fuente bipolar empleada para generar el campo magnético. Una de las problemáticas de esta técnica es la posibilidad de generar campos magnéticos muy pequeños y controlados, y esto a su vez requiere del uso fuentes de alimentación de al menos $\pm 5 \text{ A}$ y $\pm 10\text{V}$ con una precisión de 0.01mA , y fuentes con estas características son muy caras.

A pesar de la limitaciones en la sensibilidad de campo magnético es posible medir la magnetoimpedancia a 5MHz con una muy buena resolución, a frecuencias mayores se requiere tener una mayor sensibilidad en campo magnético debido a que aparece un nuevo fenómeno llamado resonancia Ferromagnética y que generalmente se traslapa con la Magnetoimpedancia, por lo que el sistema implementado permite determinar la magnetoimpedancia hasta la frecuencia de los 5 MHz .



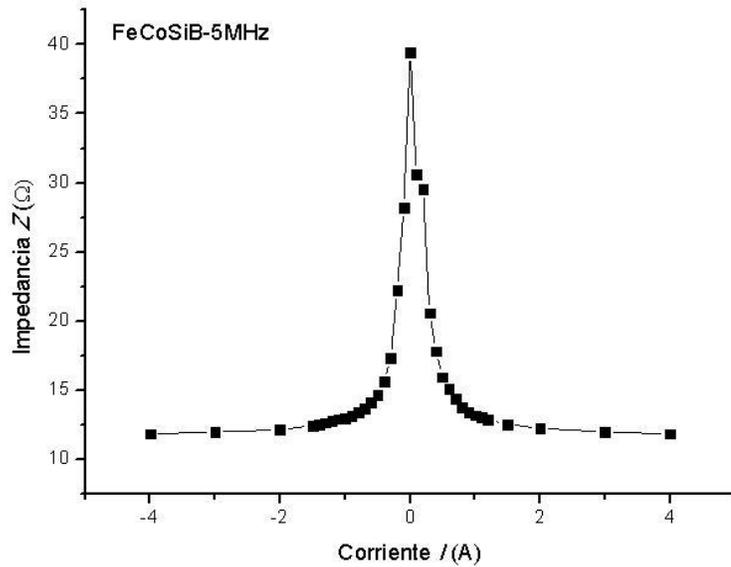


Figura 5.7 respuesta de la impedancia como función de la corriente aplicada a las bobinas de Helmholtz a diferentes frecuencias.

Para obtener las graficas típicas se transforma la corriente en campo magnético y el valor de la impedancia a porcentaje de cambio para esto se requiere calcular La razón de magnetoimpedancia (MIR).

La MIR se determina mediante la razón:

$$\Delta Z = 100 \times \frac{|Z(H_{dc}) - Z(H_s)|}{|Z(H_s)|} \quad (2.5)$$

Donde:

ΔZ Cuantificación de la Razón de Magnetoimpedancia definida para cualquier punto Z de la curva

$Z(H_s)$ Impedancia eléctrica de Saturación de la muestra bajo estudio

Magnetoimpedancia máxima que puede alcanzar para el máximo de campo magnético aplicado.

$Z(H_{dc})$ Impedancia eléctrica en función en presencia un campo magnético H_{dc} externo

En la figura 5.8 se muestran las graficas características de magnetoimpedancia donde se observa que el incremento de la impedancia es de 150 % para 1MHz y 250% para 5 MHz.

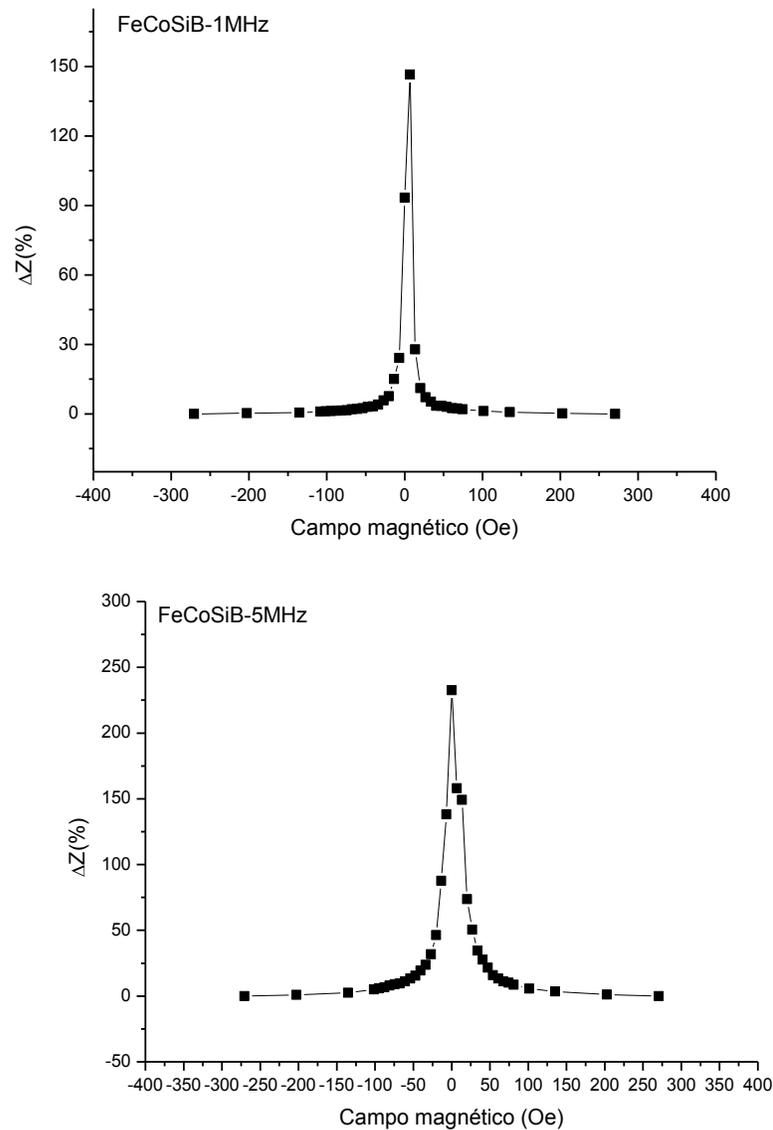


Figura 5.8. Cuantificación de la Razón de Magnetoimpedancia definida para cualquier punto Z de la curva.

5.4. Conclusiones.

El objetivo del presente trabajo de tesis fue el de implementar un sistema de control para medir y analizar el fenómeno de Magnetoimpedancia en materiales ferromagnéticos suaves como cintas, hilos y películas delgadas multicapa basado en la definición discutida en la sección 4 del presente trabajo de tesis. Las mediciones de magnetoimpedancia que se realizaron con el sistema implementado resultaron ser las esperadas y los valores de cambio de la impedancia coinciden con los reportados en la literatura. Por lo que se cumplió con el objetivo principal del trabajo.

Las conclusiones del trabajo se enlistan de acuerdo con el desarrollo de la implementación:

- ✓ Se construyeron las bobinas de Helmholtz, el trabajo se desarrollo desde la elección de los materiales para el maquinado de los carretes, cálculo y dimensionamiento del conductor eléctrico apropiado para el cuerpo de las bobinas, la base o zócalo de montaje la cual nos brinda un soporte mecánico para la montura y los carretes. Se realizo la búsqueda bibliográfica con la finalidad de dimensionar el cuerpo del embobinado de una forma correcta para que el producto terminado no sufriera calentamiento o pérdidas térmicas considerables. Así mismo se realizo el embobinado de los carretes con la ayuda de un torno.
- ✓ El patrón de calibración de línea “microstrip” diseñado para el puente de impedancia es montado en el Agilent “Test Fixture” o accesorio de prueba por medio de sus dos terminales (clips) para la sujeción de la muestra bajo prueba, fue construido tomando especial cuidado en los materiales y la geometría del “Test Fixture”. El resultado obtenido fue basado y siguió la técnica de elaboración de tarjetas de circuitos electrónicos PCB la cual se pensó como un medio de ensamble para la resistencia de montaje superficial. Los resultados del comportamiento lineal del parámetro de calibración es adecuado, y la respuesta en frecuencia es la esperada, sin embargo se requiere de un mayor trabajo para mejorar la respuesta de la impedancia en función de la frecuencia.
- ✓ En AutoCAD 2010 se dibujo para su maquinado de la montura del porta muestras, el cual coloca a la muestra bajo estudio en la región de campo magnético uniforme en el centro geométrico de las Bobinas de Helmholtz donde se ubica la mayor concentración de líneas de campo magnético en el interior de los carretes. En lo sucesivo este sistema se empleara en otros experimentos.
- ✓ Se construyo con electrónica analógica un circuito de acondicionamiento de señales para el control de la fuente de alimentación de corriente controlada por voltaje. Así mismo, se construyo una fuente confiable para alimentar la etapa de acondicionamiento de señales la cual proporciona dos señales de voltaje de corriente directa de $\pm 15\text{ Volts}$ pudiendo

conectar cargas de hasta 1 Ampere. El prototipo fue elaborado en “Easily Applicable Graphical Layout Editor” Versión 5.2.0 para Windows¹¹.

- ✓ Se implementó una interfaz de comunicación que permite la interacción del usuario con las herramientas de adquisición integradas en NI LabVIEW versión 8.5. Se realizó la programación con la tarjeta de adquisición de datos DAQ de National Instruments USB-6211 multifunción de la serie M de 16 bits, 250 kS/s, energizado por bus para el control de la fuente de corriente controlada por voltaje.

5.5. Trabajos a Futuro.

- ✓ Implementar un software de captura a fin de adquirir la curva Corriente aplicada contra Variación de la impedancia (Variación de la impedancia eléctrica (AC) en función de campo magnético H_{dc} externo) totalmente automática con el propósito de disminuir tiempo de captura de datos en la caracterización de materiales. El tiempo promedio de captura para obtener la curva de Magnetoimpedancia es de 5 minutos a una frecuencia de excitación de corriente alterna constante.
- ✓ Caracterización de materiales para la implementación de sensores magnéticos, transductores de respuesta magnética de una muestra ferromagnética en una señal eléctrica.
- ✓ Espectroscopia de impedancias. A partir de la medición de la reactancia capacitiva determinar la Permitividad eléctrica de materiales dieléctricos.
- ✓ Espectroscopia de inductancias. Obtener la permeabilidad magnética de los materiales en función de la frecuencia. Medición de la reactancia inductiva a partir de la cual se obtiene la permeabilidad eléctrica de materiales.
- ✓ Medición de la Magnetoimpedancia en películas delgadas, sistemas tricapas metálicos, e hilos amorfos. Obtener información a cerca de la estructura magnética de materiales.

¹¹ "www.cadsoft.de/freeware.htm"

REFERENCIAS.

- [1] Rosales-Rivera A., Jaither Melo J., Velásquez A., ***Comportamiento Magnético Y Propiedades De Magneto-Transporte De Cintas Magnéticas Blandas Basadas En Cobalto***, Revista Colombiana de Física, Volumen 42, No. 3, 2010
- [2] de Cos David, García-Arribas Alfredo, Barandiaran José Manuel, **High Frequency magnetoimpedance in aorphous materials**, Transworld Research Network.
- [3] Hecht Eugene, **Óptica**, Tercera edición, Eddison wesley, Madrid, 2000
- [4] Scott A., **Understanding Microwaves**, Primera Edición, New Jersey: Wiley-Interscience, 1993.
- [5] García-Ochoa Francisco, **Problemas de campos electromagnéticos**, Madrid, Publicaciones de la Universidad Pontificia de Comillas, 2002, 832 páginas.
- [6] Jaramillo Gabriel A, Alvarado Alfonso A., **Eléctricidad y Magnetismo**, Primera edición, Trillas, 2008
- [7] Ulaby F.T., **Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo**, Quinta edición, Prentice-Hall, 2007
- [8] Brown Theodore L. et Al, **Química. La Ciencia Central**, Quinta Edición, México, Prentice-Hall, 1991
- [9] Cos Elices de David, **Tesis: Magnetoimpedancia de muestras planas de alta frecuencia**, Universidad del país vasco, Departamento de Electricidad y electrónica, 2006.
- [10] Mohri K., **Magneto-Inductive Element**, IEEE, Transactions on magnetics, Vol. 29, No. 2, 1993
- [11] Vázquez Manuel, **Giant Magneto-impedance and Applications, Institute for materials science CSIC, Madrid Spain.**
- [12] Mahdi A.E., Panina L., Mapps D., **Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials**, ELSEVIER, Sensors and Actuators, 2003
- [13] Agilent technologies, **Impedance Measurement Handbook**, Cuarta edición. E.U., 2003
- [14] Bryant G.H., **Principles of Microwave Measurements**, , London, P. Peregrinus on ehalf of the institution of electrical engineers, 1988, 377 páginas.
- [15] Somlo P.I., Hunter J.D. , **Microwave Impedance Measurement**, London, P. Peregrinus on ehalf of the institution of electrical engineers, 1985, IEE Electrical Measurement Series:2, 213 páginas.
- [16] Sander K.F., **Microwave Components and Systems**, Addison-Wesley Publishers Ltd, 1987, 388 páginas.
- [17] TACONIC, Data sheet, **ORCER RF-35**,
- [18] Mihura Bruce, **LabVIEW for data adquisition**, Prentice Hall PTR, c2001., Boston, Massachusetts: Safari Books Online.

- [19] Maxfield Clive, Bird John, et Al, **Electrical Engineering**, Amsterdam, Newnes/Know it all Series, 1105 páginas
- [20] Forcada Julio G., **El amplificador operacional**, México, Alfaomega, 305 páginas.
- [21] García Burciaga de Cepeda Margarita, Cepeda Salinas Arturo, **Amplificador operacional y sus aplicaciones**, México, IPN, 1998, 405 páginas.
- [22] Bolestad Robert L, **Introducción al análisis de circuitos**, 12ª Edición, Pearson Educación de México, 2011, 928 páginas.
- [23] Lázaro Antoni Manuel, Del Rio Fernández Joaquín, **LabVIEW 7.1 Programación grafica para el control de instrumentos**, Madrid, Ediciones Paraninfo, 2005, 344 páginas
- [24] Torres Javier Ignacio, Cruz Muñoz Beatriz, Marin Ramírez William, Artículo: **Caracterización y calibración automática de Bobinas de Helmholtz en CD**, Universidad tecnológica de Pereira, Scientia et technical Año XIII, No 34, 2007.
- [25] Gyawali shashi Raj, Design and Construction of Helmholtz boil for Biomagnetic Studies on Soybean, Missouri-columbia University, 2008
- [26] Theodore Anderson, Design of a Helmholtz coil for susceptibility testing using variational calculus and experimental verification, Electromagnetic Compability 1999 IEEE Symposium
- [27] Head George O, et AL, **The autocad 3D book**, Chapel hill, north carolina Ventana, c1989, 319 páginas.
- [28] Lagriffoul Genevieve Lucet, **AutoCAD 2D**, Guía y textos de computo, clasificación T385 L34.
- [29] Rodríguez Vega Jorge, **Autocad 2000 Guía practica para usuarios**, Madrid, Anaya Multimedia, 1999, 352 páginas.
- [30] Gómez González Sergio, **SolidWorks**, Barcelona: Marcombo, México: Alfaomega, 2008, 698 páginas.
- [31] Grupo Condumex, **Manual para el manejo de del alambre magneto**, www.condumex.com
- [32] Gourishankar Vembu, **Conversión de energía electromecánica**, Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. México, 1975, 638 páginas.
- [33] CONDUCTORES MEXICANOS ELÉCTRICOS Y DE TELECOMUNICACIONES, S.A. DE C.V. Enero 2011 Poniente 140 No. 720, Col. Industrial Vallejo, Azcapotzalco, México, D.F., C.P. 02300.
- [34] Montiel Sánchez Ma. Herlinda, **Tesis de doctorado: “Nanocrystalización y Estudio a frecuencia de Microondas en Aleaciones Amorfas Ricas en Co”**, Posgrado en ciencia e ingeniería de materiales del Instituto de Investigaciones en materiales de la UNAM; México, D.F. 2004.