



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

**Determinación de la distribución de campo magnético
homogéneo en una bobina de Helmholtz mediante un sensor
diseñado a partir del fenómeno de Magnetoimpedancia.**

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

PRESENTA:
ING. JAIME SANCHEZ RODRIGUEZ.

TUTOR PRINCIPAL:
DRA. MA. HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ, CCADET-UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., ENERO 2017.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Kolokoltsev Flatov Oleg V.

Secretario: Dr. Guadarrama Santana Asur

Vocal: Dra. Montiel Sánchez María Herlinda

1 er. Suplente: Dr. Matatagui Cruz Daniel

2 do. Suplente: M. en I. Valera Orozco Benjamín

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS AL
DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET), UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DRA. MA. HERLINDA MONTIEL SÁNCHEZ

FIRMA

Agradecimientos.

Agradezco primeramente a Dios por darme la vida y salud, por haber cuidado de mí y darme lo necesario para terminar esta nueva etapa de mi vida.

Agradezco a mi esposa Coribeth por ser parte de mi vida y apoyarme a cada paso que doy y a mi hijo Eleazar por haberme brindado el tiempo necesario para cumplir con este proyecto.

Agradezco a mi mama Martha que siempre me dio ejemplo para seguir adelante y lograr lo que me proponga, a mi papá que, aunque desde yo era muy pequeño se tuvo que ir, siempre ha sido una inspiración para lograr las metas propuestas y más.

Agradezco a mis hermanos Carlos, Noemí, Lorena, Nelly, Betsabe, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional, en especial a mi hermano Héctor quien también hace dos años nos dejó, quien fue un apoyo en momentos de dificultad y quien espero sea ahora la inspiración para mi sobrina Zurisadai.

Agradezco a mis Profesores del CCADET en especial a mi tutora Herlinda Montiel y Benjamín Valera quienes siempre me han apoyado académicamente además de ser grandes amigos.

Agradezco al CONACYT por haberme apoyado con la beca durante el tiempo de estudio de la maestría.

Agradezco a COMSOL Multiphysics por el curso y la licencia de prueba para el desarrollo de las simulaciones.

RESUMEN.

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sensor magnético basado en el fenómeno de Magnetoimpedancia (MI), el transductor utilizado es un microhilo amorfo de composición FeCoBSi, con comportamiento ferromagnético suave.

La MI es un fenómeno físico que consiste en la variación de la impedancia de un material ferromagnético suave en presencia de un campo magnético DC externo. El origen de este fenómeno depende principalmente del efecto de penetración de piel. [1]

La MI ha tenido un gran impacto en la investigación de materiales ferromagnéticos suaves y en el desarrollo de nuevas tecnologías para el sensado magnético. La curva característica de MI permite establecer una correlación entre el campo magnético y la impedancia del material a una frecuencia constante, por lo que a partir de la curva de MI es posible elegir el intervalo de campo magnético que podrá detectar el sensor magnético, de tal forma es posible diseñar sensores para campos magnéticos muy pequeños del orden de mili Gauss hasta campos magnéticos en el rango de algunos cientos de Gauss. El objetivo particular de este trabajo es el de desarrollar un sensor magnético que se centre en los extremos de la curva de MI, es decir el rango de medición del sensor será de 100 Gauss hasta campos cercanos a 1 Gauss, y posteriormente comparar la sensibilidad con un sensor magnético comercial. Para un futuro próximo se pretende llegar a ser capaces de medir por debajo de los mGauss a temperatura ambiente.

El microhilo se caracterizó con la técnica de MI la cual consiste en medir la impedancia de un material ferromagnético suave en función de un campo magnético DC externo (H_{DC}) cuando circula en él una señal de AC a una frecuencia constante. Se realizó una serie de barridos de campo magnético a diferentes frecuencias para definir el mayor cambio de la impedancia en función del campo magnético para una frecuencia constante. Se desarrolló un sistema de adquisición de datos y un software para esta y futuras aplicaciones.

Con el sensor de MI construido se caracterizó el campo magnético en un plano horizontal de unas bobinas de Helmholtz con el fin de determinar el volumen de campo magnético homogéneo y se realizó una comparación de las mediciones del sensor de MI con la caracterización realizada con una punta Hall y posteriormente se compara de manera cualitativa con una simulación realizada en COMSOL.

Objetivos:

El principal objetivo de este trabajo es instrumentar un sensor magnético mediante un microhilo amorfo ferromagnético ultrasuave basado en el efecto de Magnetoimpedancia (MI), con la capacidad de medir campos magnéticos de 2 Oe a 200 Oe, establecer la resolución magnética espacial y la distribución de campo magnético de unas bobinas de Helmholtz. Se pretende determinar el volumen de campo homogéneo en unas bobinas de Helmholtz. Realizar una simulación de las líneas de campo magnético mediante COMSOL y compararlo con las mediciones hechas con el sensor comercial y el sensor de MI construido.

Objetivos particulares.

1. Caracterización de MI de un microhilo amorfo para establecer la frecuencia de trabajo apropiada para este proyecto.
2. Diseño de una tarjeta electrónica para medición de MI.
3. Diseño de un sistema de adquisición de datos y una interfaz con la PC.
4. Diseñar una base para realizar mediciones en unas bobinas de Helmholtz.
5. Medición espacial del campo magnético en unas bobinas de Helmholtz con un Gaussmetro.
6. Medición espacial del campo magnético en unas bobinas de Helmholtz con el sensor de MI propuesto y realizar una medición angular.
7. Realizar la simulación en COMSOL Multiphysics del campo magnético en unas bobinas de Helmholtz.
8. Determinar la resolución del sensor de MI.
9. Comparar los resultados obtenidos de las mediciones y la simulación para la determinación del campo homogéneo en las bobinas de Helmholtz.

Tabla de Contenidos.

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Materiales magnéticos.....	1
1.2 Orden magnético.....	3
1.3 Ciclo de Histéresis.....	9
1.4 Microhilos amorfos magnéticos ultrasuaves.....	10
1.5 Magnetoimpedancia.....	11
1.6 Sensores magnéticos.....	15
1.6.1 Reluctancia. Relación electricidad- magnetismo.....	17
1.6.2 Efecto Joule (Magnetoestricción).....	17
1.6.3 Efecto Hall.....	18
1.6.4 Efecto Josephson.....	18
1.6.5 Efecto GMR Magnetorresistencia Gigante.....	19
1.6.6 Efecto GMI Magnetoimpedancia gigante.....	19
1.6.7 Sensores magnetópticos, principio de funcionamiento por efecto Faraday y efecto Kerr.....	20
Capítulo 2. Diseño y construcción de un sensor de MI.....	22
2.1 Procedimiento de caracterización del microhilo amorfo con la técnica de MI.....	22
2.2 Caracterización de las bobinas de Helmholtz con punta Hall.....	25
2.3 Diseño y construcción del sensor de MI.....	25
2.4 Caracterización las bobinas de Helmholtz con el sensor de MI y punta Hall.....	30
2.5 Modelado del campo magnético de las Boninas de Helmholtz en COMSOL Multiphysics.....	32
Capítulo 3. Resultados y Discusión.....	36
3.1 Resultados de la caracterización de las bobinas de Helmholtz (relación corriente –campo magnético).....	36
3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.....	37
3.3 Caracterización del sensor de MI.....	46
3.4 Mapeo de la distribución del campo magnético de un arreglo de Bobinas de Helmholtz.....	48
3.5 Resultados de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.....	52
Capítulo 4. Conclusiones.....	57
Referencias.....	60

Lista de tablas

Tabla 1.1 Susceptibilidad magnética en los materiales.	2
Tabla 1.2 Temperatura de Curie y magnetización de saturación de materiales ferromagnéticos. [11]	7
Tabla 1.3 Clasificación de sensores magnéticos en base al año de descubrimiento del efecto.	15
Tabla 3.1 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con sensor de MI con 0.2 A, coordenadas en cm valores en Gauss.	48
Tabla 3.2 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con punta Hall con 0.2 A de alimentación, coordenadas en cm valores en Gauss.....	49
Tabla 3.3. Caracterización de Bobinas de Helmholtz con sensor de MI con 1 A, coordenadas en cm valores en Gauss.	50
Tabla 3.4 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con punta Hall a 1 A, coordenadas en cm valores en Gauss.....	51

Lista de figuras

Figura 1.1 Momento magnético total [7].	1
Figura 1.2 Susceptibilidad de masa magnética de los primeros 60 elementos de la tabla periódica. [9]	3
Figura 1.3 Momento magnético en materiales diamagnéticos.	4
Figura 1.4 Magnetización negativa en materiales diamagnéticos.	4
Figura 1.5 Momento magnético en materiales paramagnéticos.	5
Figura 1.6 Magnetización positiva y pequeña en materiales paramagnéticos.	5
Figura 1.7 Momento magnético en materiales ferromagnéticos.	6
Figura 1.8. Magnetización característica en materiales ferromagnéticos.	6
Figura 1.9 Momento magnético en materiales antiferromagnéticos.	7
Figura 1.10 Magnetización característica en materiales antiferromagnéticos.	8
Figura 1.11 Momento magnético en materiales ferrimagnéticos.	8
Figura 1.12. Magnetización característica en materiales ferrimagnéticos.	9
Figura 1.13 Ciclo de histéresis de un material ferromagnético.	9
Figura 1.14 Dominios magnéticos longitudinales y concéntricos en un microhilo ferromagnético amorfo. [13]	11
Figura 1.15. Un campo magnético <i>HDC</i> reduce la permeabilidad circular μ , e incrementa el efecto skin δ , por lo que se reduce la impedancia <i>Z</i> . [15]	12
Figura 1.16 Circuito básico para medición de Magnetoimpedancia. [13]	12
Figura 1.17 curva característica de Magnetoimpedancia.	13
Figura 1.18. Oscilador colpits aplicado a un sensor de MI. [16]	13
Figura 1.19 A) Rango de medición de algunos sensores magnéticos, B) Grado de desarrollo de sensores magnéticos. [18]	16
Figura 1.20 Sensores de reluctancia. [19]	17
Figura 1.21 Sensores por magnetoestricción. [20]	17
Figura 1.22 Efecto Hall. [17]	18
Figura 1.23 Efecto Josephson. [20]	19
Figura 1.24 Magnetorresistencia gigante aplicada a cabezas lectoras. [21]	19
Figura 1.25 Sensor de GMI. [22]	20
Figura 1.26 Sensor óptico de corriente, efecto Faraday. [24]	21
Figura 2.1 Línea microstrip.	22
Figura 2.2 Portamuestras construido para el microhilo amorfo.	23
Figura 2.3. Montaje experimental para caracterización de microhilo.	24
Figura 2.4 Curva de respuesta de MI a 10 MHz.	24
Figura 2.5 Respuesta de campo magnético en función del voltaje aplicado en el centro de las bobinas de Helmholtz y ajuste de respuesta.	25
Figura 2.6 Diagrama a bloques de un sensor de MI.	27
Figura 2.7 Fotografías de las formas de onda de las mediciones de MI sin campo (izquierda) y con campo magnético (derecha).	28
Figura 2.8 Circuito amplificador diferencial AD830 de alta velocidad en configuración de retroalimentación activa.	28
Figura 2.9 Esquemático completo del circuito propuesto para el sensor de MI.	29
Figura 2.10 Fotografía del circuito de acondicionamiento terminado y el transductor formado por el porta-muestras y el microhilo amorfo.	29

Figura 2.11 Panel frontal del sistema de adquisición de datos para medir MI.	30
Figura 2.13 Montaje experimental para mapeo de campo magnético en bobinas de Helmholtz y caracterización del sensor de MI.	31
Figura 2.14 Montaje experimental para mapeo con la punta Hall.	32
Figura 2.15 Parámetros de las bobinas de Helmholtz. [30]	33
Figura 2.16 Geometría de las bobinas de Helmholtz en COMSOL.	34
Figura 2.17 Simulación en COMSOL de las bobinas de Helmholtz	35
Figura 3.1 Grafica de respuesta de campo magnético respecto a la corriente aplicada a las bobinas de Helmholtz.	36
Figura 3.2. MI en microhilo amorfo de 100 a 900 kHz.	38
Figura 3.3 Porcentaje de cambio de MI de 100 a 900 kHz.	39
Figura 3.4. MI en microhilo amorfo de 1 a 10 MHz	40
Figura 3.5 Porcentaje de cambio de MI de 1 a 10 MHz.	41
Figura 3.6 MI en microhilo amorfo de 11 a 20 MHz.	42
Figura 3.7 Porcentaje de cambio de MI de 11 a 20 MHz.	43
Figura 3.8 Dependencia de la permeabilidad en un microhilo amorfo respecto a la frecuencia. [30]	44
Figura 3.9 Efecto piel en microhilo amorfo respecto a la frecuencia de excitación.	45
Figura 3.10 Zoom de respuesta de MI en algunas frecuencias.	45
Figura 3.11 Curva de respuesta del sensor de MI.	46
Figura 3.12 Caracterización angular del sensor de MI.	47
Figura 3.13 Geometría de la simulación de las bobinas de Helmholtz.	52
Figura 3.14 Simulación de campo magnético para I=0.2 A vista superior escalas iguales.	53
Figura 3.15 Simulación de campo magnético para I=0.2 A escala de flechas normalizadas.	53
Figura 3.16 Simulación de campo magnético para I=0.2 A vista 3D.	54
Figura 3.17 Simulación de campo magnético para I=1 A vista superior escalas iguales.	54
Figura 3.18 Simulación de campo magnético para I=1 A, vista superior flechas normalizadas.	55
Figura 3.19 Simulación de campo magnético para I=1 A vista 3D.	55
Figura 3.20 Campo magnético para I=0.2 A con valores limitados de 5.9 a 6.1 Gauss.	56
Figura 3.21 Campo magnético para I=1 A con valores limitados de 29.5 a 30.5 Gauss	56

Capítulo 1.

Introducción.

Se han reportado artículos sobre el efecto de Magnetoimpedancia (MI) en microhilos amorfos desde el año de 1993 [2] [3] y se han reportado sensores basados en un pulso de corriente, en el efecto de MI aplicado a microhilos amorfos y circuitos CMOS en el año de 1997 [4]. Se ha tenido gran interés en el desarrollo de esta tecnología debido a la capacidad de medir campos magnéticos pequeños con ultra alta sensibilidad con una resolución del orden de pico Teslas (10^{-8} Oe o 10^{-6} Gauss) sin tener la necesidad de realizar las mediciones a temperaturas criogénicas [5], por lo que se pueden encontrar una cantidad considerable de artículos donde se proponen los mejores materiales y condiciones para obtener un mayor porcentaje de cambio de la impedancia (Z) en función de un campo magnético, resultando en muchos estudios basados en materiales con aleaciones amorfas principalmente de Fe, Co, B y Si, ya sea en películas delgadas y microhilos amorfos, los cuales pueden trabajar principalmente en 3 rangos de frecuencias; kHz (magnetoinductancia), MHz (Magnetoimpedancia) y GHz (resonancia ferromagnética) [6].

Los microhilos ferromagnéticos amorfos utilizados tienen campos coercitivos pequeños por lo que se clasifican como ultrasuaves. Dimensionalmente son del orden de 30 Micras de diámetro y 6 mm de longitud, además de tener un arreglo atómico amorfo.

1.1 Materiales magnéticos.

El magnetismo es un efecto mecano-cuántico y relativista: los electrones presentan un momento magnético angular total J intrínseco (asociado a su spin) S, de valor de $\mu_B = e\hbar / 2mc$ (magnetón de Bohr), un $\mu_B = 9.27 \times 10^{-24}$ [J/T], además de la contribución orbital L, en otras palabras, el valor de J está dado por la suma de L y S, ecuación 1.1, de manera gráfica se puede apreciar mejor en la figura 1.1 [7]

$$J = L + S \dots\dots\dots 1.1$$

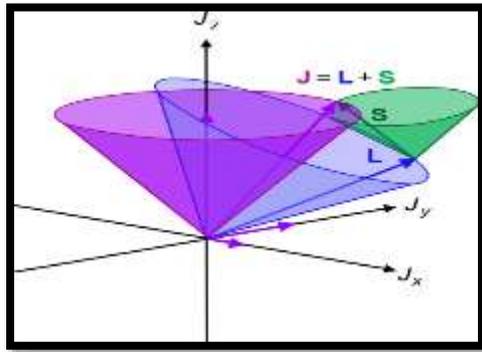


Figura. 1.1 Momento magnético total [7].

Susceptibilidad magnética.

El campo magnético espontaneo en un material está definido por la magnetización (M), cuando un material es colocado en un campo magnético externo (H), el campo magnético dentro del material es afectado y esta densidad de campo magnético será llamada inducción magnética (B) y estará dada por la siguiente expresión:

$$B = H + 4\pi M \dots\dots\dots 1. 2$$

M y H tienen unidades en el SI de Amper por metro (A/m) y en el sistema CGS el Oersted (Oe), la relación entre estas unidades es la siguiente: 1000 A/m = 12.54 Oe, y para B su unidad en el SI es el Tesla (T), en el sistema CGS es el Gauss (G) la relación entre estas dos unidades es la siguiente: 0.1 mT = 1 G.

Se puede determinar la naturaleza magnética de un material si está inmerso en un campo magnético y se mide su magnetización. La susceptibilidad magnética (χ) determina la capacidad de un material a magnetizarse y se define como:

$$\chi = \frac{M}{H} \dots\dots\dots 1. 3$$

Si la magnetización *M* de la muestra refuerza el campo *H* la susceptibilidad magnética será positiva, y si se opone al campo la susceptibilidad magnética será negativa.

Podemos encontrar varios comportamientos magnéticos y los podemos clasificar de acuerdo a su susceptibilidad como se muestran en la tabla 1.1, en el SI la susceptibilidad es adimensional. [8]

Tabla 1.1 Susceptibilidad magnética en los materiales.

Comportamiento magnético.	Susceptibilidad magnética χ		
	Signo	X volumétrica (SI) adimensional.	X molar (CGS)
Diamagnético.	-	0- 10^{-5}	$10^{-6} cm^3 mol^{-1}$
Paramagnético.	+	$10^{-4} - 10^{-6}$	$0 - 10^{-4} cm^3 mol^{-1}$
Ferromagnético.	+	Hasta 10^6	$10^{-2} - 10^{-4} cm^3 mol^{-1}$
Antiferromagnético.	+	Hasta 10^6	$0 - 10^{-4} cm^3 mol^{-1}$

En la mayoría de los materiales los electrones de las últimas orbitas del átomo se encuentran por pares y en sentido de giro opuesto haciendo que su momento magnético se anule entre sí, este es el caso de los materiales diamagnéticos con una susceptibilidad negativa y por el contrario los materiales que tienen electrones desapareados tendrán una magnetización espontanea neta y responderán fácilmente a un campo magnético externo, este el caso de los materiales de orden magnético. En la figura 1.2 se muestra la susceptibilidad de los primeros 60 elementos de la tabla periódica, y su clasificación como materiales diamagnéticos, paramagnéticos y se muestran solo algunos ferromagnéticos, como Fe, Co y Ni, los cuales tienen magnetización espontanea en ausencia de un campo magnético externo. [9]

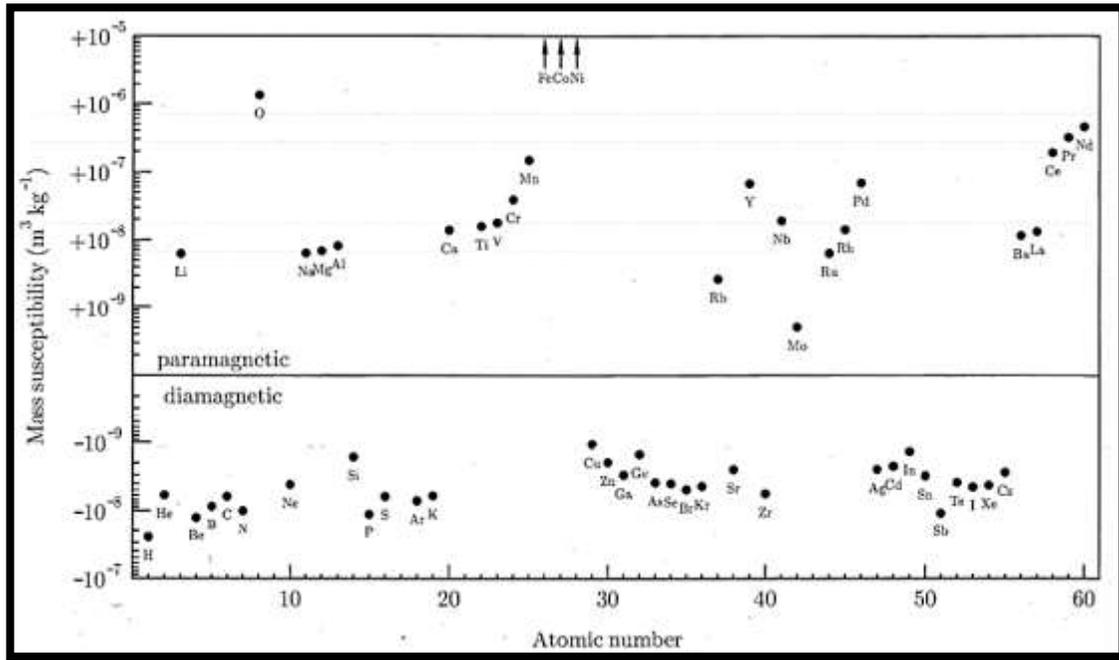


Figura 1.2 Susceptibilidad de masa magnética de los primeros 60 elementos de la tabla periódica. [9]

1.2 Orden magnético

La permeabilidad magnética (μ) está definida como la capacidad de un material para hacer pasar líneas de campo magnético, está dada por el cociente entre la inducción magnética (B) y la intensidad de campo magnético (H), la permeabilidad está dada por la ecuación 1.4.

$$\mu = \frac{B}{H} \dots\dots\dots 1.4$$

La permeabilidad en el vacío (μ_0) es considerada como una constante y tiene el valor de $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ en el SI y para comparar los materiales se utiliza la permeabilidad relativa (μ_r) que está dada por la ecuación 1.5.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \dots\dots\dots 1.5$$

En base a la permeabilidad relativa se pueden clasificar los materiales como materiales ferromagnéticos los que tienen una permeabilidad relativa muy superior a 1, paramagnéticos que tienen una permeabilidad relativa cercan a 1, diamagnéticos permeabilidad magnética relativa menor a 1.

Diamagnéticos.

Los materiales diamagnéticos tienen una susceptibilidad magnética pequeña y negativa, repelen el campo magnético y no conservan una magnetización espontánea y es independiente de

la temperatura, su momento angular total J está dada principalmente por L , debido a que los spines al estar apareados no aportan magnetización al anularse entre sí. [10]

En la figura 1.3 se representan los átomos por medio de esferas y no tienen un vector de magnetización preferencial debido a que se representa una magnetización neta igual a cero, en la figura 1.4 se representa la curva de magnetización característica en materiales diamagnéticos, se puede observar una magnetización neta en el material pequeña y negativa debido a que se crea un campo magnético de igual magnitud pero en sentido contrario, la pendiente nos muestra una susceptibilidad pequeña y negativa, algunos materiales diamagnéticos son el cobre, plata, mercurio, boro, silicio, entre otros.

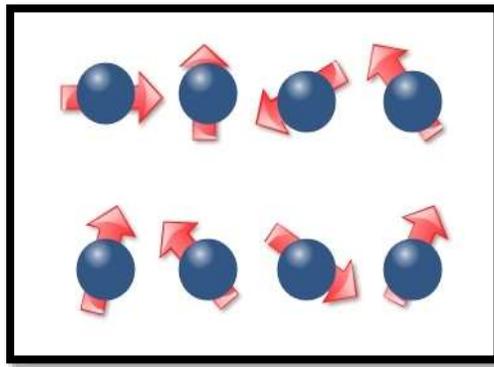


Figura 1.3 Momento magnético en materiales diamagnéticos.

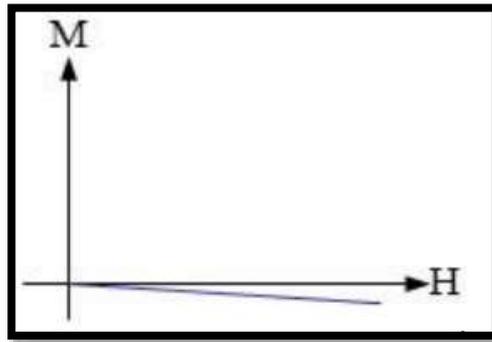


Figura 1.4 Magnetización negativa en materiales diamagnéticos.

Paramagnéticos.

En los materiales paramagnéticos se tienen electrones no apareados es decir spin fraccionario $S \neq 0$ o capas incompletas, la susceptibilidad es pequeña y positiva $\chi \cong 10e-4$ y $10 e-6$, se asocia a cada átomo un momento magnético debido al giro de los electrones, al aplicar un campo magnético los dipolos se alinean con el campo provocando una magnetización positiva, pero debido a que los dipolos no interactúan entre si se requiere campos magnéticos muy grandes para poder alinear todos los dipolos. [10]

En la figura 1.5 se representan los átomos de un material paramagnético, de igual manera que el diamagnético con vectores de magnetización sin una orientación preferencial, en la figura 1.6 se observa la representación de la curva de magnetización característica de materiales paramagnéticos y se puede observar que con un campo magnético (H) grande se genera una magnetización (M) pequeña en el material pero positiva a diferencia de los diamagnéticos, por lo que el valor de la susceptibilidad será pequeña pero positiva.

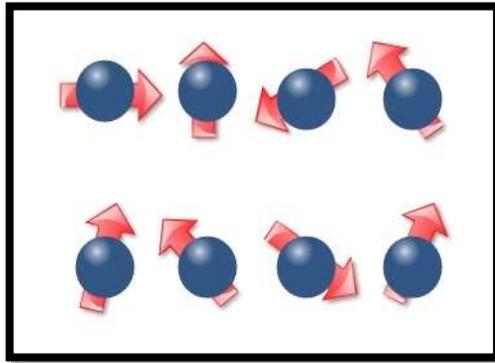


Figura 1.5 Momento magnético en materiales paramagnéticos.

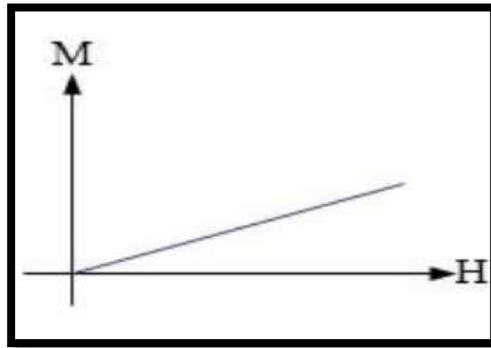


Figura 1.6 Magnetización positiva y pequeña en materiales paramagnéticos.

Ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos tienen niveles electrónicos parcialmente llenos en los orbitales 3d (metales de transición) y orbitales 4f (tierras raras), Tienen una magnetización espontánea natural $M > 0$ en ausencia de campo magnético externo, se obtiene grandes magnetizaciones incluso con campos magnéticos pequeños, susceptibilidad cercana a $\chi \cong 10^6$ y a una temperatura ambiente, esto originado por la Energía de intercambio consecuencia de la orientación paralela del spin de los electrones y a la energía de anisotropía es decir la interacción del spin-órbita con la estructura cristalina. [10]

Los principales materiales ferromagnéticos son el Fe, Ni y Co y algunas tierras raras ya que son susceptibles a las interacciones de intercambio por su forma y espines no apareados.

En la figura 1.7 se muestra la magnetización en un material ferromagnético en donde el espín de los electrones fácilmente se puede alinear en una dirección preferencial que también es dada por la estructura cristalina.

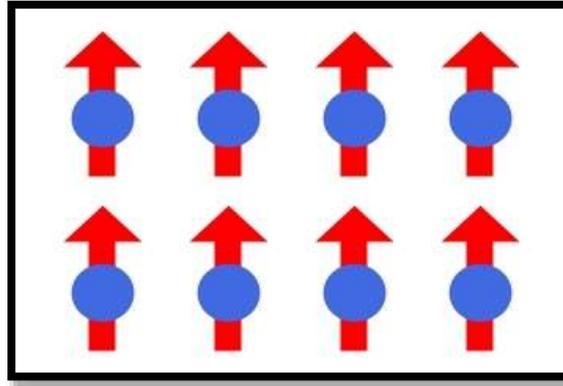


Figura 1.7 Momento magnético en materiales ferromagnéticos.

En la figura 1.8 se puede observar que la magnetización en materiales ferromagnéticos puede ser muy grande y positiva, ya que con un pequeño campo magnético (H) se puede obtener una magnetización (M) grande la cual aumenta hasta mantenerse casi constante pasando por el punto de saturación del material.

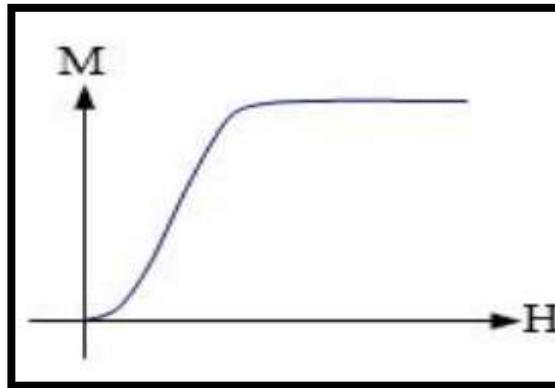


Figura 1.8. Magnetización característica en materiales ferromagnéticos.

Si un material ferromagnético fue magnetizado a temperatura ambiente mantendrá parte de su magnetización (magnetización de remanencia) a menos que se le aplique un campo magnético externo (H) en sentido contrario o si se le aplica energía en forma de calor provocando desorden térmico hasta un punto crítico llamado Temperatura de Curie que para cada material es distinta, presentando un estado paramagnético, en la tabla 2 se muestran algunos materiales ferromagnéticos y su temperatura crítica o de Curie y su magnetización de saturación. [10]

Tabla 1.2 Temperatura de Curie y magnetización de saturación de materiales ferromagnéticos. [11]

SELECTED FERROMAGNETS, WITH CRITICAL TEMPERATURES T_c AND SATURATION MAGNETIZATION M_0		
MATERIAL	T_c (K)	M_0 (gauss) ^a
Fe	1043	1752
Co	1388	1446
Ni	627	510
Gd	293	1980
Dy	85	3000
CrBr ₃	37	270
Au ₂ MnAl	200	323
Cu ₂ MnAl	630	726
Cu ₂ MnIn	500	613
EuO	77	1910
EuS	16.5	1184
MnAs	318	870
MnBi	670	675
GdCl ₃	2.2	550

Antiferromagnéticos.

El Antiferromagnetismo se presenta principalmente en materiales con enlaces covalentes, mediante la interacción de superintercambio la cual ocurre entre los cationes del metal de transición mediados por un oxígeno, en el puente creado por el enlace los momentos magnéticos tienen spines antiparalelos que se anulan entre sí, por lo que su magnetización neta es $M=0$, la susceptibilidad también es afectada por la temperatura, se comportan como paramagnéticos por debajo de la temperatura de Néel. [10]

En la figura 1.9 se muestra el momento magnético en los materiales antiferromagnéticos, el espín de los electrones es paralelo con respecto entre sí pero debido a la estructura cristalina la orientación es en oposición razón por lo que la magnetización neta en estos materiales es cero.

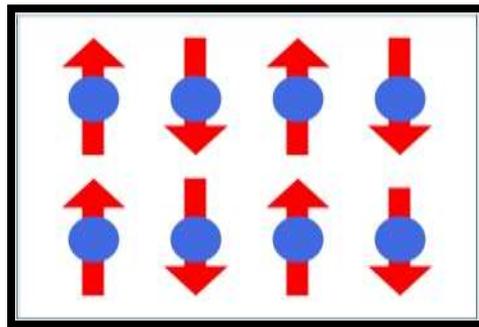


Figura 1.9 Momento magnético en materiales antiferromagnéticos.

En la figura 1.10 se muestra la respuesta de magnetización en materiales antiferromagnéticos y se observa que se requiere un campo magnético (H) grande para producir una pequeña magnetización (M) en el material debido a la orientación opuesta de los espines que se anulan entre sí.

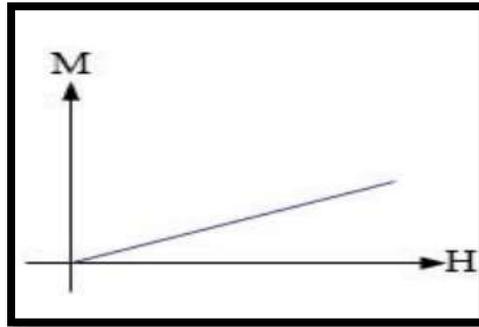


Figura 1.10 Magnetización característica en materiales antiferromagnéticos.

Ferrimagnéticos.

Los materiales ferrimagnéticos presentan comportamiento parecido a los antiferromagnéticos, la interacción entre espines vecinos también es opuesta pero de diferente magnitud por lo que se puede obtener una magnetización total $M \neq 0$, también tiene un comportamiento paramagnético a la temperatura de Curie, principalmente son materiales óxidos magnéticos como las ferritas, una de las ventajas es que muchos de estos materiales son malos conductores por lo que gran parte de las aplicaciones se enfocan en transformadores ya que de esta manera se evitan las corrientes de Eddy o parasitas en los núcleos de transformadores. [10]

En la figura 1.11 se muestra el momento magnético en materiales ferrimagnéticos, las estructuras formadas por los óxidos dan lugar a espines paralelos, pero en direcciones opuestas y con momento magnético distinto en ambas direcciones.

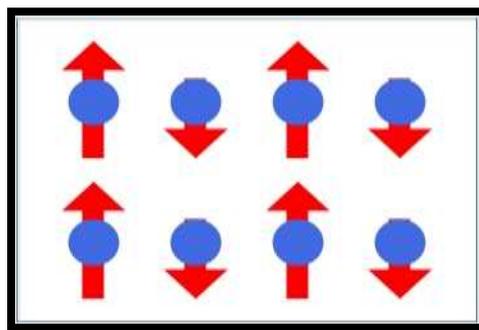


Figura 1.11 Momento magnético en materiales ferrimagnéticos.

En la figura 1.12 se muestra la respuesta característica de magnetización para materiales ferrimagnéticos, estos tienen una magnetización espontánea a diferencia de los antiferromagnéticos, y por lo general son materiales magnéticos suaves necesitando poco campo magnético H para lograr una magnetización de saturación.

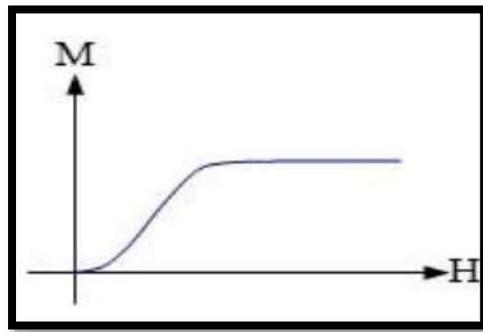


Figura 1.12. Magnetización característica en materiales ferrimagnéticos.

1.3 Ciclo de Histéresis.

El ciclo de histéresis permite determinar las propiedades estáticas de los materiales tales como magnetización de saturación (M_s), magnetización de remanencia (M_r) y campo coercitivo (H_c). Como se muestra en la figura 1.13 el ciclo de histéresis también conocido como curva de magnetización, es la variación de la magnetización (o inducción magnética) en función de un campo magnético aplicado (H) DC.

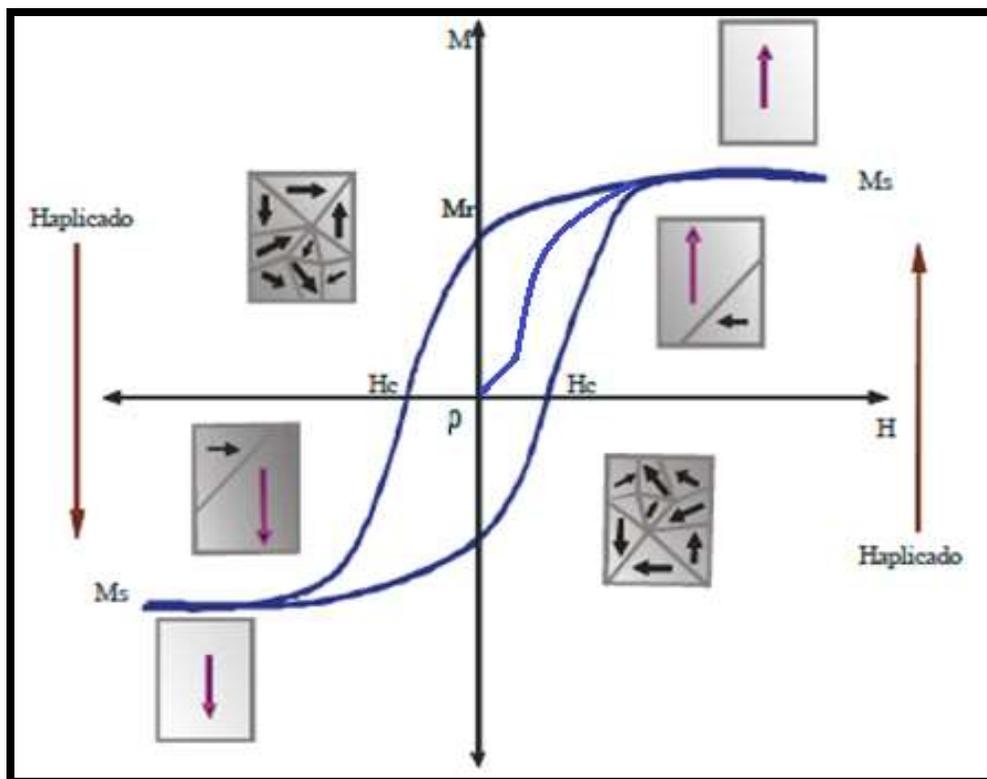


Figura 1.13 Ciclo de histéresis de un material ferromagnético.

1.4 Microhilos amorfos magnéticos ultrasuaves.

Los cambios de la magnetización en función del campo magnético permiten determinar el comportamiento magnético de los materiales, además en un material magnéticamente ordenado la magnetización corresponderá a ciertos procesos de magnetización originados por la estructura de dominios magnética.

Energía de anisotropía magnética.

La anisotropía magnética es determinada por el acoplamiento orbital con la estructura, un material isotrópico no tiene un eje de fácil magnetización, pero un material anisotrópico si tendrá por lo menos un eje de fácil magnetización, otros tipos de anisotropía magnéticas son:

Anisotropía de forma, el eje de fácil magnetización está dado por la forma no de la estructura cristalina si no de forma macro.

Anisotropía magnetoelástica, debido a esfuerzos ejercidos sobre el material.

Anisotropía magnética inducida, es un tratamiento térmico en donde se calienta el material magnético hasta antes de la temperatura de Curie, se induce un campo magnético grande y se deja enfriar gradualmente y por último se quita el campo magnético.

Energía de intercambio.

El gran campo molecular que mantiene los momentos de los átomos vecinos en los materiales ferromagnéticos paralelos entre sí, tiene su origen en las fuerzas de intercambio de la mecánica cuántica. Esta interacción de intercambio, que alinea los spines adyacentes se conoce como interacción spin-spin y depende críticamente de la distancia entre los átomos.

1.4 Microhilos amorfos magnéticos ultrasuaves.

La tendencia en la actualidad hacia la miniaturización ha fomentado el desarrollo de sensores cada vez más pequeños, este es el caso de sensores magnéticos para aplicaciones en brújulas digitales para celulares, sensores de proximidad, y muchos más.

Los materiales magnéticos con los que se construyen estos sensores se les pide sean funcionales y con propiedades magnéticas mejoradas, además materiales baratos con dimensiones pequeñas. Entre estos materiales se encuentran los microhilos ferromagnéticos amorfos ultrasuaves que han cobrado importancia en los últimos años. [12]

Los microhilos ferromagnéticos suaves combinan excelentes propiedades magnéticas como son campos coercitivos pequeños, además de tener magnetoestricción, son de dimensiones pequeñas que pueden ser de diámetros de 3 a 125 μm .

La anisotropía de forma juega un papel importante en la creación de dominios magnéticos en un microhilo ferromagnético suave, ya que en este caso se generan dominios longitudinales y concéntricos como se muestra en la figura 1.14.

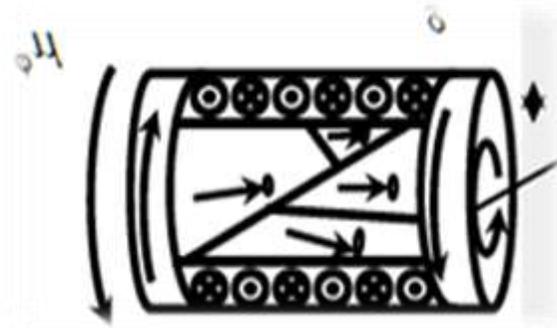


Figura 1.14 Dominios magnéticos longitudinales y concéntricos en un microhilo ferromagnético amorfo. [13]

De acuerdo a el ciclo de histéresis mostrado en la figura 1.13 los materiales se pueden clasificar como magnéticos duros con campos coercitivos mayores a 50 Gauss, suaves con campos coercitivos de 1 a 50 Gauss, y ultrasuaves menores a 1 Gauss, el microhilo con el cual se realizó el presente trabajo es ultrasuave y tiene un campo coercitivo aproximado de 0.5 Gauss.

Lo que implica que el microhilo sea ultrasuave es que tenga una mínima anisotropía magnetocristalina o en otras palabras que sea amorfo o con una estructura nanocristalina y además una mínima anisotropía magnetoelástica o una magnetostricción muy pequeña.

1.5 Magnetoimpedancia.

El estudio del fenómeno de Magnetoimpedancia (MI) recientemente ha sido un atractivo por su extrema sensibilidad a campos magnéticos del orden de nT o μG y se presenta en materiales ferromagnéticos amorfos suaves como lo son los microhilos, cintas delgadas y en películas delgadas. La MI es el cambio de la impedancia del material ferromagnético en presencia de un campo magnético dc a una frecuencia constante. El efecto de MI se origina por dos efectos principalmente: la dependencia de la permeabilidad del material y el efecto skin o piel, efecto que puede ser explicado por medio de electrodinámica clásica, esto significa que la corriente en el conductor ferromagnético (microhilo amorfo) no es homogénea a lo largo de la sección transversal pues tiende a centrarse cerca de la superficie (efecto piel), el decaimiento exponencial de la densidad de corriente en la superficie del conductor ferromagnético está dada por la ecuación 1.6 y expresado en mm. [14]

$$\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu} \dots\dots\dots 1.6$$

El efecto skin (δ) dependerá de una corriente de RF (ω), la resistividad (ρ) y la permeabilidad (μ), esto se puede visualizar mejor en la figura 1.15 donde la superficie pelicular cambiara de acuerdo al cambio de la permeabilidad en el microhilo provocado por el cambio del campo magnético externo aplicado H_{DC} .

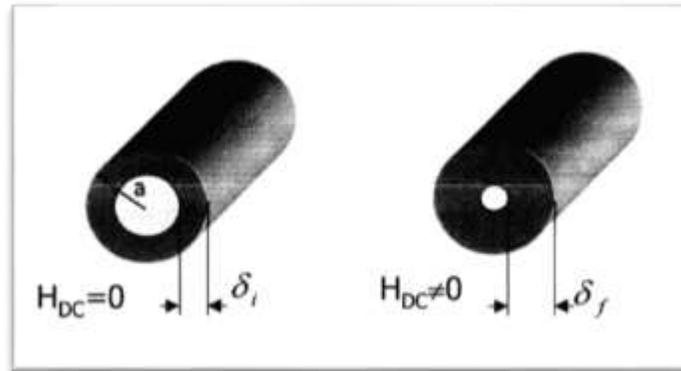


Figura 1.15. Un campo magnético H_{DC} reduce la permeabilidad circular μ , e incrementa el efecto skin δ , por lo que se reduce la impedancia Z . [15]

En la figura 1.16 se muestra el circuito básico para el estudio de MI en un elemento de Magnetoimpedancia gigante (MIG), el circuito es alimentado con una señal de AC que debe ser previamente caracterizada para saber a qué frecuencia se obtiene la mejor respuesta, se coloca en serie al elemento MIG una resistencia (R) para formar el divisor de tensión y para limitar la corriente del circuito, el voltaje o corriente medida en el microhilo será proporcional al campo magnético H_{DC} aplicado, el campo generado por la señal AC es concéntrico al microhilo, el campo magnético H_{DC} a medir, el cual debe ser perpendicular al campo AC para observar el fenómeno.

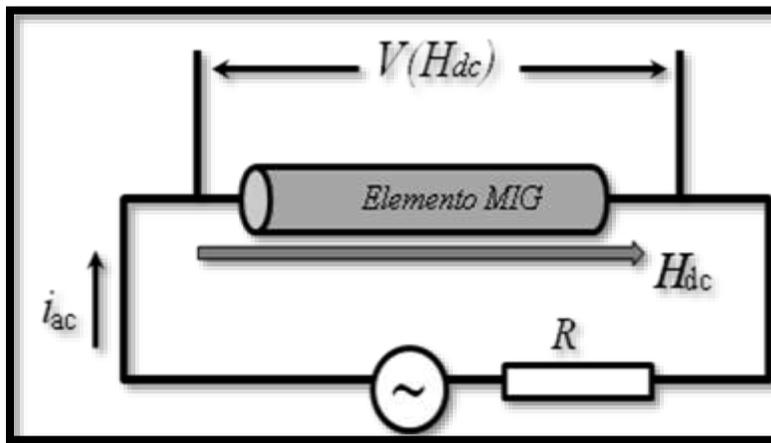


Figura 1.16 Circuito básico para medición de Magnetoimpedancia. [13]

La curva característica de Magnetoimpedancia mostrada en la figura 1.17 se obtuvo haciendo un barrido de campo magnético de DC (H_{DC}) a una frecuencia constante de alimentación y midiendo el voltaje en el microhilo ya amplificado, rectificado y filtrado, se pueden observar 2 picos los cuales dependen de la frecuencia con la cual se excite el microhilo amorfo.

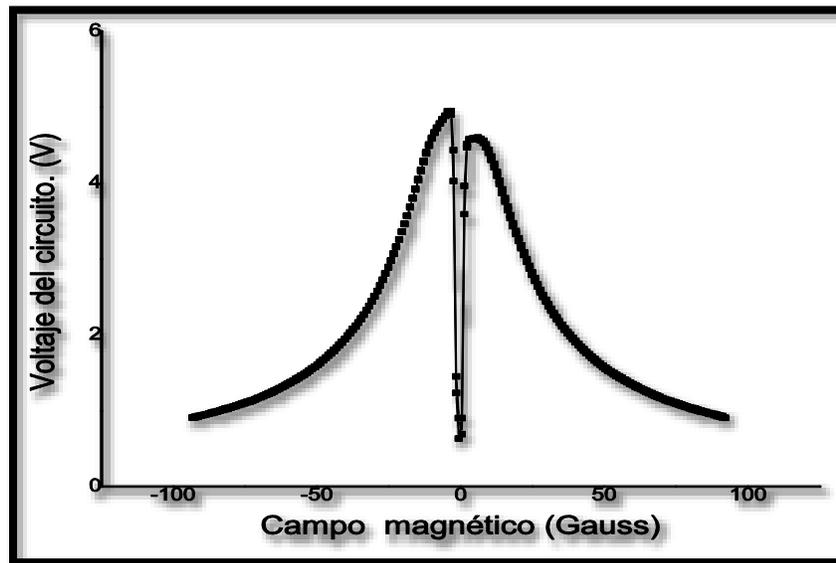


Figura 1.17 curva característica de Magnetoimpedancia.

Para conocer el porcentaje de variación de Magnetoimpedancia en una medición nos apoyamos en la expresión 1.7 en donde Z es el módulo de la impedancia, $|Z|^2 = R^2 + X^2$, se toma como referencia la impedancia obtenida al campo magnético máximo medido o campo magnético al cual se considera el material como magnéticamente saturado $Z(H_{max})$ y se compara con cada medición realizada. [16]

$$\Delta Z/Z (\%) = 100 | [Z(H) - Z(H_{max}) / Z(H_{max})] | \dots\dots\dots 1.7$$

Para el desarrollo de sensores de MI el reto es realizar una instrumentación a frecuencias de MHz, se han encontrado en la literatura algunas formas de realizar esta instrumentación en donde los diseños difieren del tipo de oscilador o el método para medir la señal de AC de salida. Un ejemplo de ellos es el uso del oscilador colpits con el microhilo como parte del oscilador como se muestra en la figura 1.18, la señal de AC entregada por el oscilador es rectificadora y filtrada obteniendo un voltaje de salida V_{out} de corriente directa. [17]

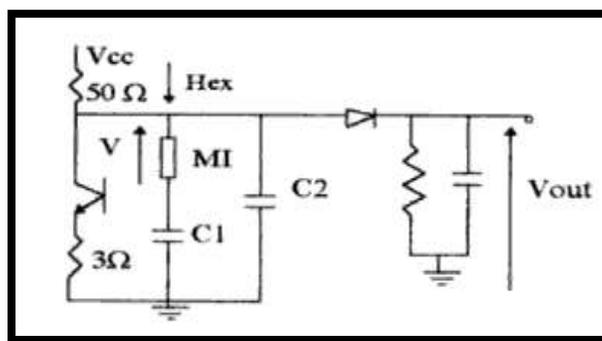


Figura 1.18. Oscilador colpits aplicado a un sensor de MI. [17]

1.5 Magnetoimpedancia.

Otro tipo de oscilador utilizado es el de compuertas inversoras con una red RC o como es el caso del oscilador elegido para este trabajo, empleando un oscilador tipo reloj para microcontroladores utilizando compuertas inversoras y un cristal principalmente que nos ayuda a mantener una frecuencia estable y del cual se habla un poco más a fondo en la siguiente sección.

En la etapa de amplificación se encontraron principalmente dos métodos; uno en donde se compara el voltaje de entrada con el voltaje del microhilo por medio de un amplificador diferencial obteniendo un voltaje AC en función de la Magnetoimpedancia. El otro método consiste en rectificar el voltaje en el microhilo y medir su valor RMS de tal manera que lo que se mide es un valor de voltaje DC en función de la MI.

1.6 Sensores magnéticos.

En esta sección se hace una revisión general sobre sensores magnéticos, la clasificación se realizó en base al año de descubrimiento como se muestra en la tabla 1.3 y el grado de desarrollo como se muestra en la figura 1.19, se clasifican como sensores magnéticos de primera generación todos aquellos que aparecieron antes de 1900 y la detección magnética se realiza por medio de bobinas y se caracterizan por ser capaces de medir como mínimo 1 Gauss con poca resolución, los sensores de segunda generación utilizan la tecnología de semiconductores como medio de detección, también pueden medir a partir de 1 Gauss pero con mayor resolución pues son más sensibles, por último se habla de los sensores de tercera generación en donde la sensibilidad que poseen los sensores pueden hacer que midan campos magnéticos del orden de 0.1 mGauss y con tamaños más pequeños pues se utiliza nanotecnología. [18]

Tabla 1.3 Clasificación de sensores magnéticos en base al año de descubrimiento del efecto.

Año	Efecto
1820	Reluctancia. Relación electricidad- magnetismo.
1842	Efecto Joule (Magnetoestricción).
1845	Efectos basados en la ley de Faraday.
1846	Cambio de módulo de Young
1847	Efecto mattecucci.
1856	Magnetorresistencia
1858	Efecto Wiedemann
1865	Efecto Villari
1879	Efecto Hall
1903	Efecto Skin o pelicular.
1931	Efecto Sixtus Tonks
1962	Efecto Josephson
1987	Efecto GMR Magnetorresistencia Gigante
1994	Efecto GMI Magnetoimpedancia gigante.

1.6 Sensores magnéticos.

Cuando comparamos diferentes sensores, podemos considerar para su estudio varios parámetros como pueden ser la sensibilidad, la linealidad, la respuesta en frecuencia, frecuencia de trabajo, en la figura 1.19 A) se muestra una revisión de sensores en base a al rango de medición, estos valores están mostrados en Gauss para el sistema CGS y Teslas para el sistema SI, ya que es muy común que se manejen estas dos unidades de medida para campos magnéticos, B) se muestra el grado de desarrollo de algunos sensores magnéticos en una línea de tiempo y el tipo de tecnología utilizada, también se realiza una clasificación por generación en base al tamaño del sensor mostrando y se muestra la sensibilidad para cada generación de sensores.

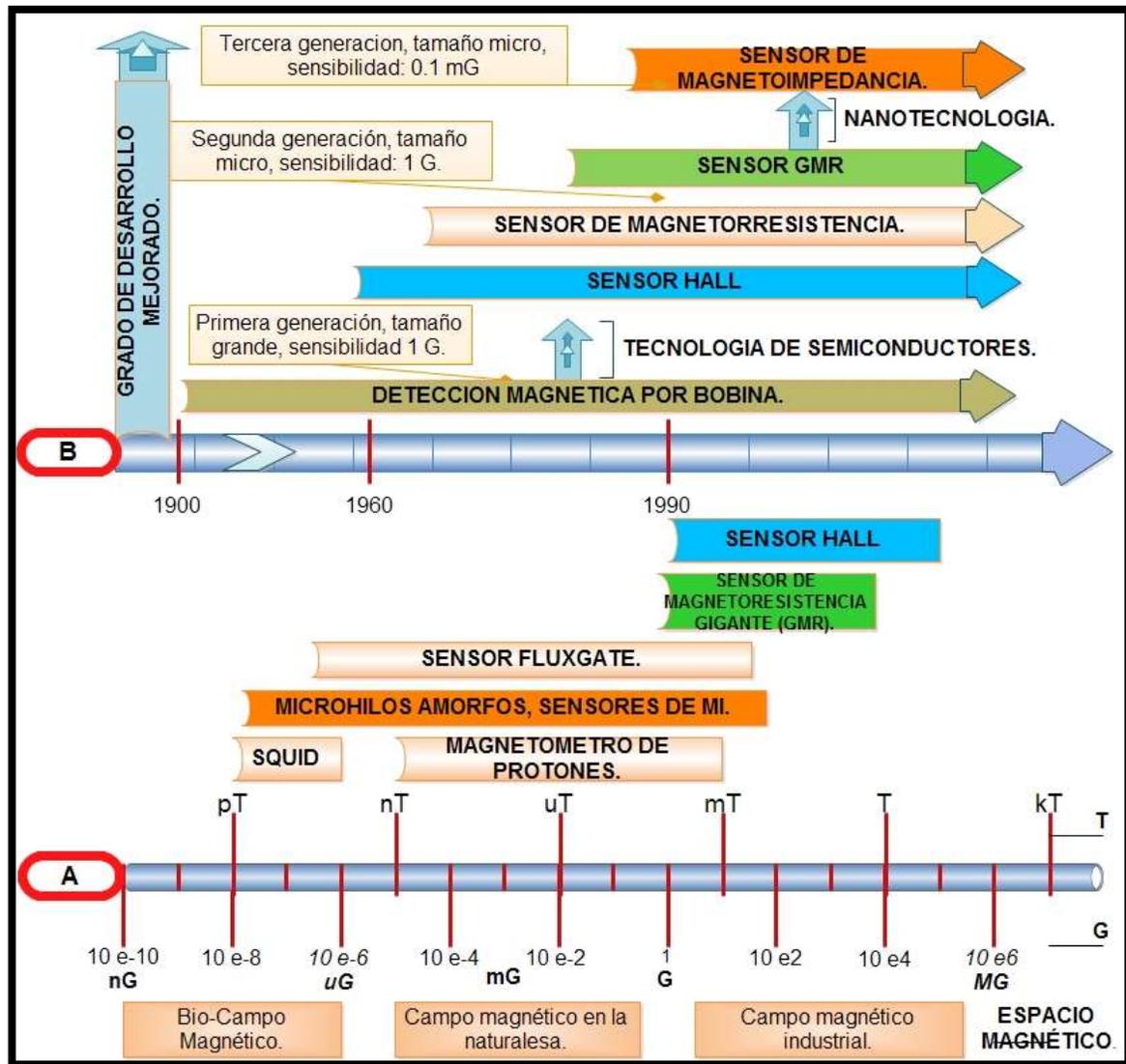


Figura 1.19 A) Rango de medición de algunos sensores magnéticos, B) Grado de desarrollo de sensores magnéticos. [19]

Se realizó una revisión de sensores magnéticos, a continuación, se mencionan algunos de los más relevantes:

1.6.1 Reluctancia. Relación electricidad- magnetismo.

Este dispositivo puede ser utilizado como sensor de desplazamiento longitudinal o transversal como se muestra en la figura 1.20, se hace circular una señal AC por las bobinas y al cambiar la reluctancia debido al desplazamiento del núcleo magnético cambia la inductancia.

La aplicación de una inductancia variable está sujeta a serias limitaciones: Los campos magnéticos parásitos afectan a la inductancia (L), la relación entre L y reluctancia (R) no es constante, sino que varía hacia los extremos del dispositivo pues el campo no es uniforme.

Entre las ventajas se cita: Les afecta poco la humedad ambiental y otros contaminantes, alta sensibilidad.

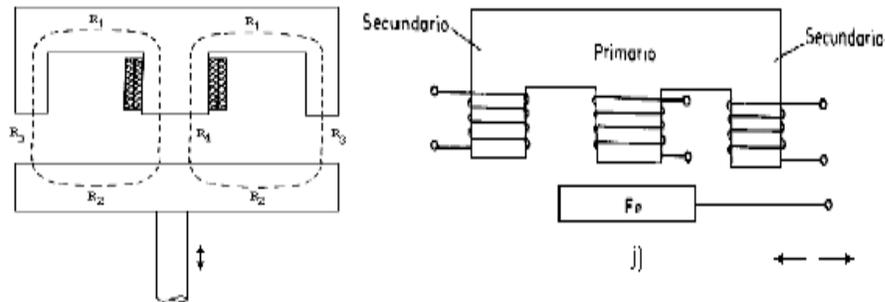


Figura 1.20 Sensores de reluctancia. [20]

1.6.2 Efecto Joule (Magnetoextricción).

La magnetoestricción es el cambio en la forma de un cuerpo ferromagnético en dirección al campo magnético aplicado.

- Técnica de uso: Por lo general se utiliza en combinación de elementos piezoeléctricos.
- Aplicaciones: magnetómetros.
- Efecto opuesto: Villari.

Cuando se aplica un campo magnético externo HDC a un material con magnetoestricción se pueden ver dos casos magnetoestricción positiva o negativa, es decir que los dipolos magnéticos se alinean haciendo que el material se expanda o se contraiga, estos cambios son pequeños por lo general es necesario valerse de algún otro método de detección de estos pequeños cambios que son proporcionales al campo magnético aplicado como se observa en la figura 1.21 en donde se muestra un arreglo de magnetoestricción por método óptico donde se hace pasar un haz laser en una fibra óptica, en el camino óptico se encuentra un material con magnetoestricción que obstruye el paso del haz laser y a la salida de la fibra óptica se mide la potencia del haz proporcional al campo magnético aplicado.

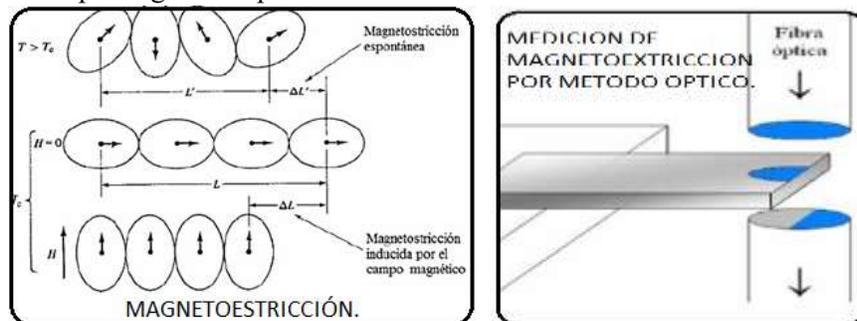


Figura 1.21 Sensores por magnetoestricción. [20]

1.6.3 Efecto Hall.

Cuando por una placa metálica circula una corriente eléctrica como la de la figura 1.22 y ésta se halla situada en un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente, se desarrolla en la placa un campo eléctrico transversal, es decir, perpendicular al sentido de la corriente. Este campo, denominado Campo de Hall, es la resultante de fuerzas ejercidas por el campo magnético sobre las partículas de la corriente eléctrica, sean positivas o negativas.

- Técnica de uso: Los sensores basados en efecto Hall suelen constar de un elemento conductor o semiconductor y un imán. Cuando un objeto ferromagnético se aproxima al sensor, el campo que provoca el imán en el elemento se debilita. Así se puede determinar la proximidad de un objeto, siempre que sea ferromagnético.
- Aplicaciones. Una de las aplicaciones de los sensores por efecto Hall que más se ha instalado en la industria, en especial en la automotriz, es como reemplazo del sensor inductivo o pickup magnético que se describió más arriba (basado en un imán permanente y una bobina). Dado que en este caso el sensor, por estar implementado por un semiconductor, tiene la capacidad de poseer electrónica integrada, la señal que sale de los sensores por efecto Hall para uso como detectores de proximidad por lo general ya está amplificada y condicionada, de modo que su utilización es mucho más directa, fácil y económica.
- Otra aplicación es la medición de la corriente que circula por un conductor.

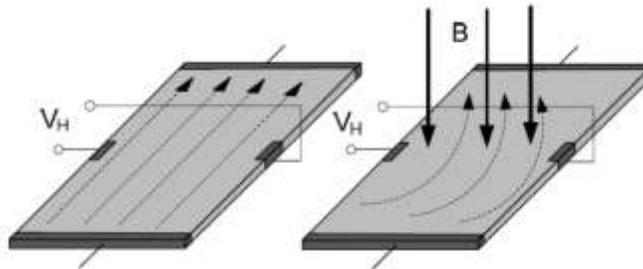


Figura 1.22 Efecto Hall. [17]

1.6.4 Efecto Josephson.

- Efecto túnel entre dos materiales superconductores con una capa de separación muy fina es un efecto cuántico, se muestra en la figura 1.23, la línea horizontal es el primer electrodo, mientras que la línea vertical es el segundo electrodo. El cuadrado que las separa es un aislante que tiene en el centro donde se encuentran los dos electrodos una pequeña apertura a través de la cual está la verdadera unión Josephson por donde pasan los pares de Cooper.
- Aplicaciones: el dispositivo se puede configurar como un magnetómetro muy sensible capaz de medir el umbral de un calamar ($10E-14$ T), campo magnético del corazón ($10E-10$ T), campo magnético del cerebro ($10E-13$ T), aunque la desventaja es que tiene que estar a temperaturas criogénicas.

1.6.5 Efecto GMR Magnetorresistencia Gigante, 1.6.6 Efecto GMI Magnetoimpedancia gigante.

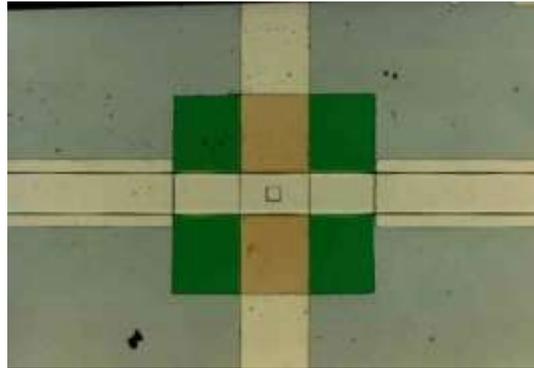


Figura 1.23 Efecto Josephson. [21]

1.6.5 Efecto GMR Magnetorresistencia Gigante.

Efecto mecánico cuántico que se observa en estructuras de película delgada compuestas de capas alternadas ferromagnéticas y no magnéticas. Se manifiesta en forma de una bajada significativa de la resistencia eléctrica (de hasta 100 veces) observada bajo la aplicación de un campo magnético externo.

- Aplicaciones: Cabezas lectoras para discos duros, en la figura 1.24 se muestra una cabeza lectora de un disco duro donde está presente una bobina encargada de grabar la información sobre el disco y el sensor magnetorresistivo encargado de leer cada bit.

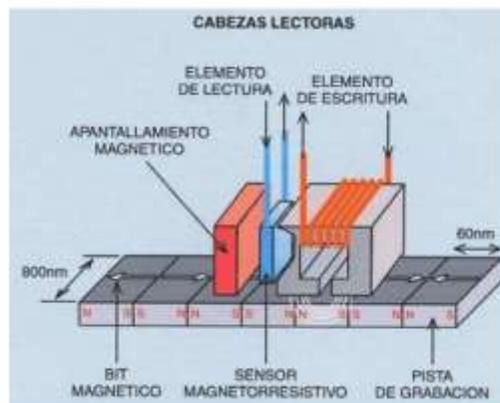


Figura 1.24 Magnetorresistencia gigante aplicada a cabezas lectoras. [22]

1.6.6 Efecto GMI Magnetoimpedancia gigante.

La Magnetoimpedancia gigante se puede definir como grandes variaciones de la impedancia eléctrica en algunos materiales ferromagnéticos sobre los cuales circula una señal AC debido a una exposición a un campo magnético externo.

- Aplicaciones: Sensores de campos magnéticos pequeños en conjunto con nano estructuras magnéticas (detección de células cancerígenas).

1.6.7 Sensores magnetópticos, principio de funcionamiento por efecto Faraday y efecto Kerr.

- En la figura 1.25 se observa un circuito utilizado para la detección de MI gigante, las compuertas inversoras forman la parte del oscilador, hay un diodo rectificador que en conjunto con el AD630 entregan a la salida ya una señal de VDC que ya es fácil de medir. [23]

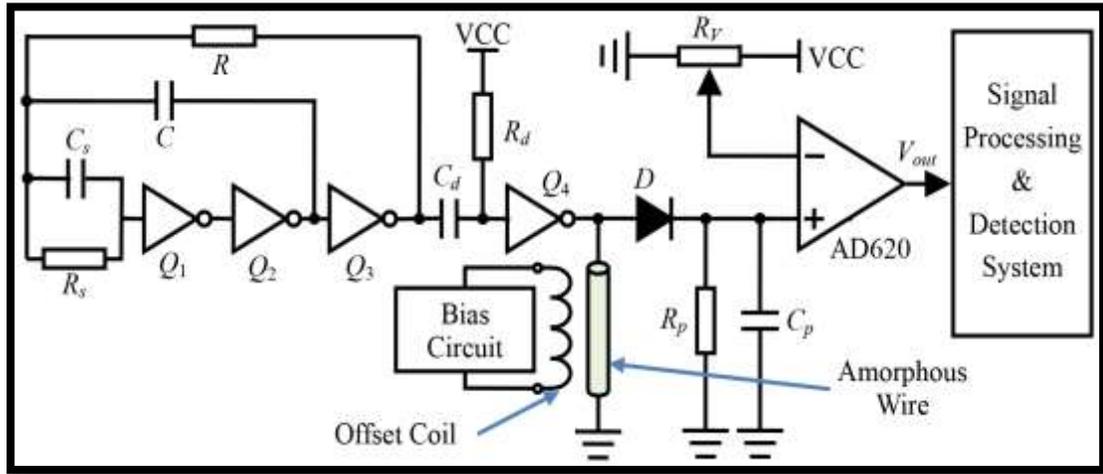


Figura 1.25 Sensor de GMI. [23]

1.6.7 Sensores magnetópticos, principio de funcionamiento por efecto Faraday y efecto Kerr.

Efecto Faraday

El Rotador de Faraday cambia la polarización de la luz cuando esta pasa a través del material magneto óptico por el cual está construido, en la figura 1.26 se muestra un ejemplo del efecto Faraday aplicado a un sensor de corriente eléctrica, al pasar la corriente por el conductor se genera un campo magnético que es sentido por el rotador de Faraday por el cual pasa un haz óptico y se crea un desfase del haz laser, la diferencia de fase entre la entrada y la salida es proporcional al campo magnético.

- El ángulo de rotación es directamente proporcional a la densidad de flujo magnético, a longitud del medio magneto-óptico y a la constante de Verdet.
- Otra aplicación: aisladores ópticos. [24]

1.6.7 Sensores magnetópticos, principio de funcionamiento por efecto Faraday y efecto Kerr.

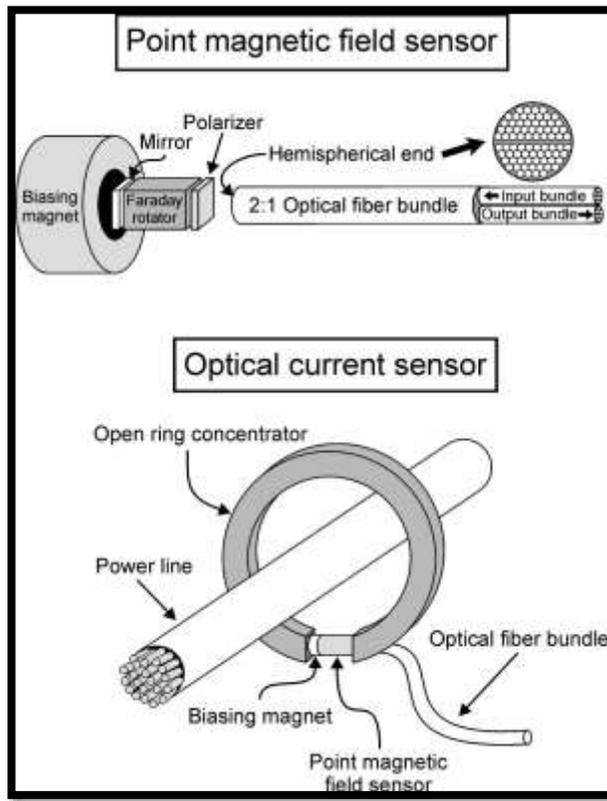


Figura 1.26 Sensor óptico de corriente, efecto Faraday. [25]

Efecto Kerr.

El efecto Kerr ocurre cuando la luz es reflejada por el material magnetóptico, mientras que el efecto Faraday es en transmisión, la luz debe atravesar la muestra. [26]

- LA luz pasa por un polarizador, la fibra es el transductor donde se produce el cambio de polarización, la luz pasa por un analizador que se encuentra a 45° del polarizador obteniendo en el sensor un cambio de intensidad.
- Ventajas: la fibra es aislante, puede estar en contacto con el conductor.
- Desventaja: se requieren muchas vueltas, al enrollar la fibra se produce una polarización circular sobre el núcleo de la fibra provocando birrefringencia.
- Materiales: de granate de hierro yterbio.

Capítulo 2.

Diseño y construcción de un sensor de MI.

El diseño y construcción del sensor de MI se realizó en tres etapas. La primera consiste en realizar la caracterización de Magnetoimpedancia del microhilo para determinar la frecuencia en donde la impedancia presenta el mayor cambio frente a un campo magnético. Lo cual incluye la caracterización de las bobinas de Helmholtz para comprobar su linealidad a la corriente aplicada y la construcción de un porta-muestras mediante una línea microstrip con una impedancia característica de 50Ω .

Como segundo paso se procedió a la selección y diseño de la parte electrónica del sensor y la selección del sistema de adquisición de datos, en esta etapa se analizaron algunas opciones para el diseño electrónico y adquisición de datos y posteriormente la calibración del sensor.

Por último, se realiza un mapeo de las bobinas de Helmholtz para determinar el campo homogéneo con el nuevo sensor y con uno comercial, y una comparación con una simulación realizada en COMSOL Multiphysics para diferentes valores de corriente, como validación del sensor construido.

2.1 Procedimiento de caracterización del microhilo amorfo con la técnica de MI.

Se utiliza un microhilo FeCoBSi de 2 mm de largo el cual se fija en un porta muestras diseñado como una línea de transmisión microstrip, el diseño tiene como objetivo obtener una impedancia característica $Z_0 = 50 \Omega$ a 20 MHz.

En la figura 2.1 podemos observar la línea de transmisión microstrip teórica en la que se basa el diseño del portamuestras y la expresión 2.1 nos define la impedancia de esta línea de transmisión, donde $H=1.6\text{mm}$ dado por el grosor de la fibra de vidrio de la placa fenólica, y $W = 3\text{mm}$ para obtener la impedancia deseada, l solo nos indica la longitud de la guía de onda, en la figura 2.2 podemos observar el portamuestras terminado con el microhilo.

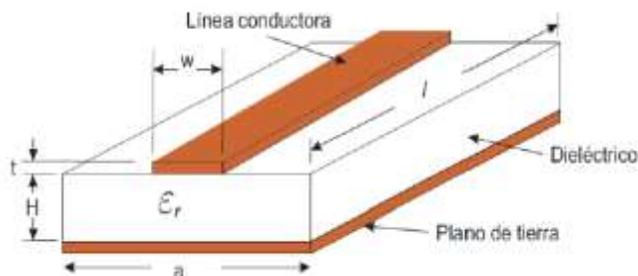


Figura 2.1 Línea microstrip.

2.1 Caracterización del microhilo amorfo con la técnica de MI.

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left[\frac{w}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{H} + 1.444 \right) \right]} \dots\dots\dots 2.1 [27]$$



Figura 2.2 Portamuestras construido para el microhilo amorfo.

La máxima transferencia de energía se da cuando la impedancia de la fuente es igual a la impedancia de la carga, la impedancia en la línea de transmisión está formada por una resistencia debido a la resistencia del conductor y una reactancia inductiva en serie a la carga, de igual manera debido a que el conductor asemeja dos placas en paralelo aislados por un dieléctrico, se tendrá una resistencia y una reactancia capacitiva en paralelo a la carga, en trabajos anteriores ya se ha realizado el análisis de impedancias de la línea de transmisión. [13]

El montaje experimental de la técnica de MI se muestra en la figura 2.3, donde se observa el analizador de redes Agilent, unas bobinas de Helmholtz, una fuente de alimentación y un sistema de control y adquisición de datos que trabaja por medio de un software instalado en una computadora y un sistema de comunicación por GPIB al analizador de redes.

Como primer paso el software calibra el sistema en circuito abierto, en corto circuito y con una carga de 50Ω .

Una vez calibrado el sistema hace un barrido en frecuencia y por último y se definen los parámetros a utilizar para la medición de MI. La técnica consiste en dejar una frecuencia fija mientras se realiza un barrido de campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz y estas a su vez generan un barrido en campo magnético, de esta manera se obtiene una curva de respuesta de MI proporcional al campo magnético en el cual está inmerso el microhilo amorfo.

Los parámetros programados al inicio de cada barrido de voltaje son:

Frecuencia de la señal de AC; la respuesta de Magnetoimpedancia de un microhilo amorfo es diferente para cada valor de frecuencia, para este trabajo estamos trabajando en el orden de MHz, por lo que el objetivo de la caracterización del microhilo es determinar a qué frecuencia se obtiene el mayor porcentaje de cambio de impedancia con una curva de respuesta más estable respecto al campo magnético.

2.1 Caracterización del microhilo amorfo con la técnica de MI.

El software genera un archivo en formato txt, en este archivo se guarda el valor de impedancia medido en el microhilo amorfo para cada valor de voltaje aplicado a las bobinas de Helmholtz, que a su vez corresponde a un valor de campo magnético.

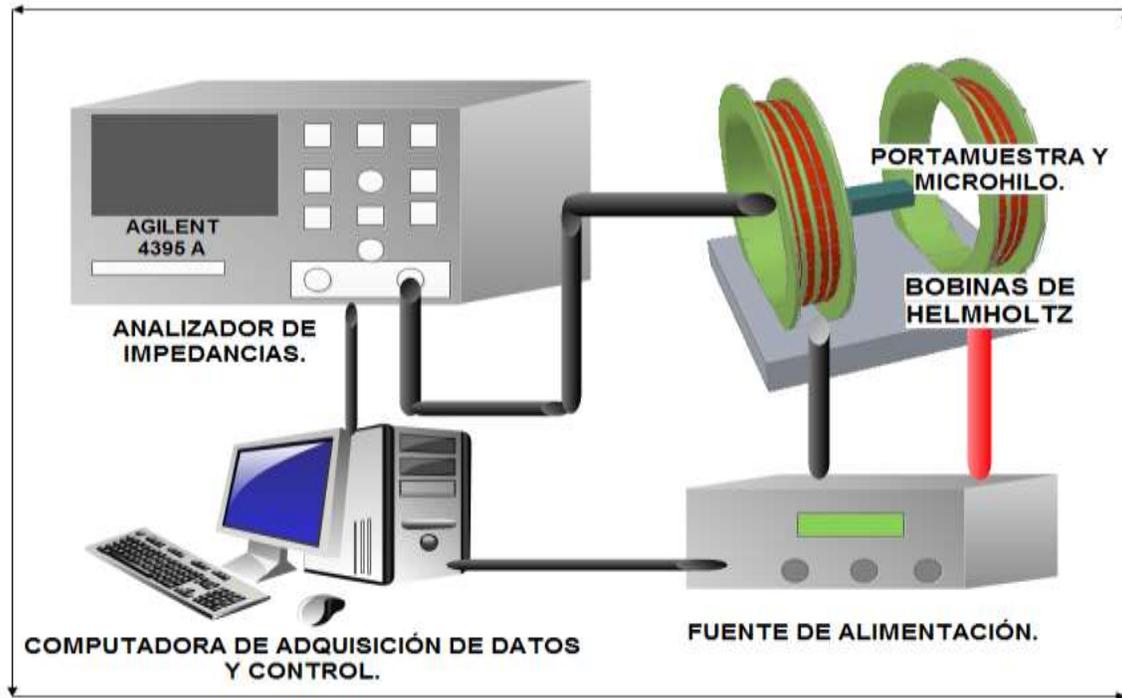


Figura 2.3. Montaje experimental para caracterización de microhilo.

La caracterización del microhilo amorfo con la técnica de MI se realiza para frecuencias desde 100 kHz hasta 1 MHz en pasos de 100 kHz y de 1 a 20 MHz en pasos de 1 MHz, en la figura 2.4 se muestra la respuesta a 10 MHz que es la frecuencia de trabajo elegida para el diseño del sensor, se pueden observar dos curvas esto debido a que el barrido se realizó de positivo a negativo y de regreso.

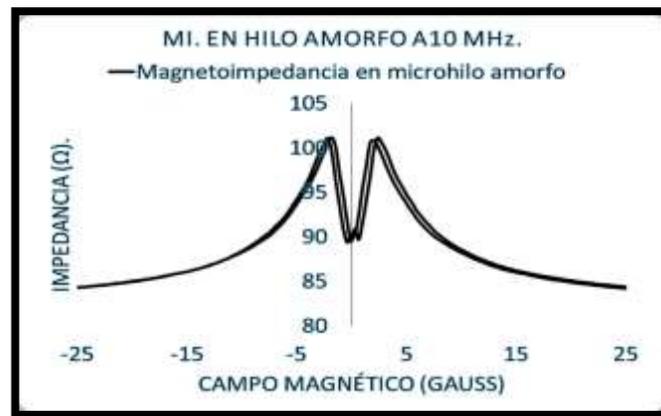


Figura 2.4 Curva de respuesta de MI a 10 MHz.

2.2 Caracterización de las bobinas de Helmholtz con punta Hall.

Las bobinas de Helmholtz se caracterizaron con una punta Hall para conocer el campo magnético generado en función de la corriente que circula por las bobinas o voltaje de alimentación, los resultados se muestran en la figura 2.5 donde también se realizó un análisis para obtener la ecuación de la recta para calcular los valores de campo magnético en las mediciones siguientes, ya que se observó que la respuesta del campo magnético generado en función del voltaje aplicado a las bobinas es lineal.

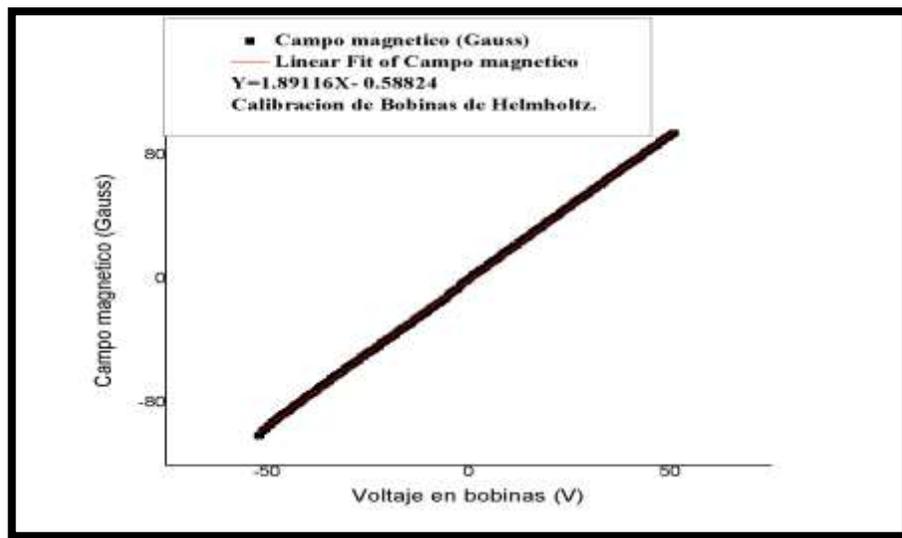


Figura 2.5 Respuesta de campo magnético en función del voltaje aplicado en el centro de las bobinas de Helmholtz y ajuste de respuesta.

2.3 Diseño y construcción del sensor de MI.

Se diseñó un circuito electrónico para el sensor MI y posteriormente se desarrollan una serie de experimentos para su caracterización.

Algunos conceptos para tener en cuenta:

- Instrumentación: Conjunto de dispositivos que de manera directa o indirecta se utilizan para medir o controlar una variable física.
- Resolución: Cantidad de divisiones que hay en un rango determinado.
- Exactitud: La cercanía de una lectura al valor real actual.
- Precisión: Oficialmente reemplazado por repetitividad, la habilidad de un transductor para producir lecturas de medición que se aplica en forma consecutiva bajo las mismas condiciones y misma dirección.
- Incertidumbre: Que tan lejos está una medición del valor real, se asocia al error.

Se hizo una revisión de sensores de MI en esta revisión se pudieron encontrar algunas configuraciones utilizadas para medir MI.

Una de las configuraciones encontradas implica una bobina alrededor del microhilo, un interruptor analógico controlado por el multivibrador de excitación y una amplificación con retroalimentación negativa, para esta configuración se reportan mediciones de 1×10^{-8} Gauss gracias a que el interruptor analógico se ajusta de tal manera que cierra el circuito para amplificación en la cresta de la forma de onda sinusoidal obteniendo solo un pico de voltaje a la salida y eliminando el ruido en la medición. [28]

Esta opción no se escogió para la construcción del sensor debido a la dificultad para construir el embobinado al redor del microhilo además de que se pretende realizar mediciones con campos magnéticos más grandes.

Otro método analizado fue utilizar un puente de wheatstone el cual es un método muy utilizado para determinar una resistencia o impedancia muy pequeña. Para poder utilizar el puente de wheatstone como sensor de MI, requiere que su análisis sea como puente de impedancias por lo que las dos mallas del puente deben contener el elemento de impedancia para obtener mediciones congruentes, esto implicaba colocar un microhilo como sensor y otro en el circuito electrónico, Sin embargo esta opción no fue la correcta debido a la sensibilidad del microhilo, prácticamente se emplearían dos sensores (microhilos) uno en el portamuestras y otro en la tarjeta electrónica, de este último no se tendría el control por que la tarjeta electrónica también sería susceptible a campos magnéticos. [29]

Por último, se realizaron pruebas con el circuito básico de MI que consiste en un divisor de tensión como se muestra en la figura 1.16, se obtuvieron buenos resultados por lo tanto este circuito fue la base para el diseño del sensor.

El circuito básico a bloques de MI se puede observar en la figura 2.6 en donde se tiene el oscilador encargado de generar un voltaje de AC que se hace pasar por el microhilo amorfo esta señal de AC.

Se configuro un arreglo de divisor de tensión para medir las variaciones de voltaje en función de la impedancia del microhilo amorfo, el voltaje es amplificado mediante un amplificador diferencial de alta frecuencia, tomando en cuenta que la señal de AC es del orden de decenas de MHz, la siguiente etapa es la rectificación en donde se obtiene un voltaje rms en DC.

La etapa de acondicionamiento consiste en el filtrado y amplificación del voltaje para obtener los valores medibles en la etapa de adquisición de datos, en este caso la señal se acondiciono de tal manera que se obtuvieran voltajes DC de 0 a 5V.



Figura 2.6 Diagrama a bloques de un sensor de MI.

El circuito se alimenta con 5V, disponible fácilmente en un puerto USB o baterías. Para poder trabajar con los amplificadores operacionales se utiliza una fuente de alimentación integrada con voltaje de entrada de 5V y salida simétrica de $\pm 9V$.

Se analizó la opción de utilizar un oscilador colpits, sin embargo, al conocer la frecuencia de trabajo del sensor después de la caracterización se optó por el uso de un oscilador compuesto por un cristal de 10 MHz, compuertas nand 74HC00 y algunos componentes pasivos, debido a que la frecuencia requerida es la misma de un cristal comercial, de esta manera se obtiene un oscilador más estable en frecuencia.

Para la etapa de amplificación y detección se utilizó un amplificador diferencial de video. Se seleccionó el AD830, para amplificar el voltaje en el microhilo, para el divisor de tensión se eligió un valor de resistencia en base a la corriente con la que mejor respuesta se obtiene en el microhilo que es alrededor de 10 mA a 30mA, en la figura 2.7 se muestra las capturas de la pantalla del osciloscopio, se aprecia el cambio de voltaje del microhilo a la salida del amplificador de video, los voltajes pico a pico observados uno sin campo magnético y otro con un campo magnético aleatorio son: 3.68Vpp y 1.28 Vpp, valores que fácilmente se pueden manipular.

2.3 Diseño y construcción del sensor de MI.

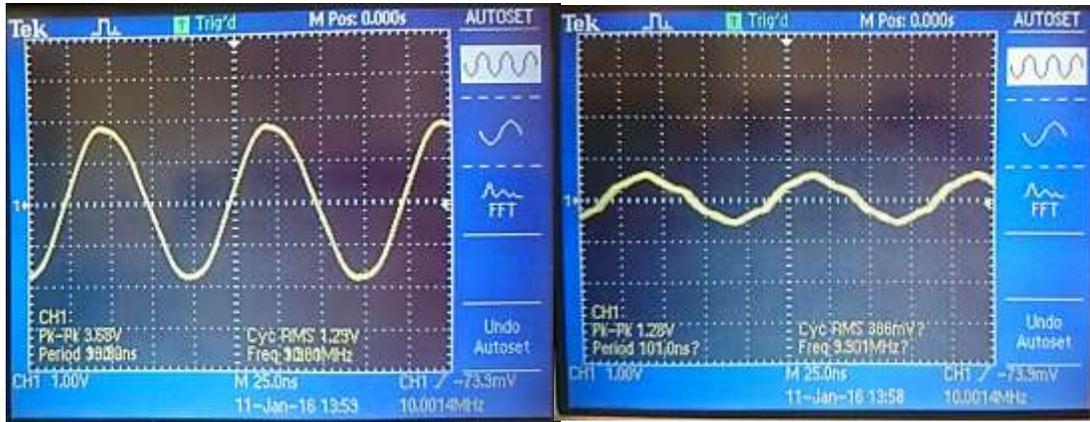


Figura 2.7 Fotografías de las formas de onda de las mediciones de MI sin campo (izquierda) y con campo magnético (derecha).

El AD830 es un amplificador diferencial de video de alta velocidad, en este proyecto se utiliza en una configuración de retroalimentación activa con una ganancia de 21. La configuración se muestra en la figura 2.8 [30]

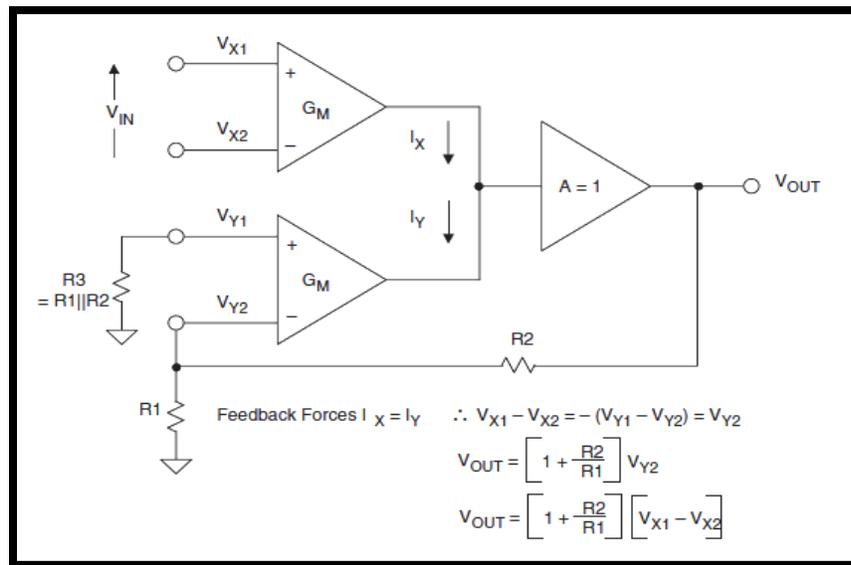


Figura 2.8 Circuito amplificador diferencial AD830 de alta velocidad en configuración de retroalimentación activa.

Para obtener el nivel de voltaje de directa de la señal se utiliza un rectificador de media onda y se filtra la señal obteniendo una señal rms de DC. Posteriormente la señal se hace pasar por un segundo amplificador operacional, el AD705 en configuración no inversor, con un ajuste a cero externo y una ganancia de 19, con lo cual queda el circuito calibrado para una respuesta de 0 a 5 V de salida. El esquemático completo del circuito se muestra en la figura 2.9.

2.3 Diseño y construcción del sensor de MI.

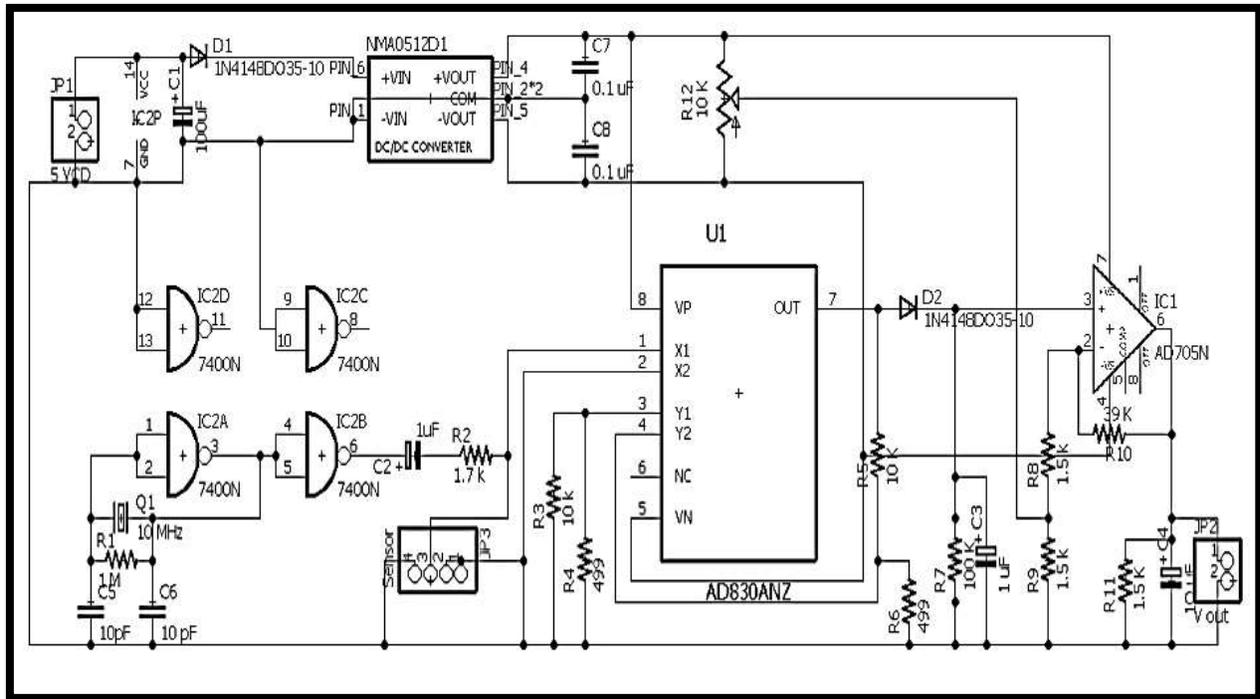


Figura 2.9 Esquemático completo del circuito propuesto para el sensor de MI.

El microhilo es conectado en el JP3 por medio de cable coaxial donde y forma el divisor de tensión con R2, el amplificador operacional mide el voltaje en las terminales del microhilo amorfo.

El circuito terminado proporciona un voltaje de salida de 0 a 5V con respecto al campo magnético DC aplicado de 0 a 93 Gauss. En la figura 2.10 se muestra una fotografía de la tarjeta pcb terminada junto con el transductor (el microhilo en el portamuestras) ya terminados.



Figura 2.10 Fotografía del circuito de acondicionamiento terminado y el transductor formado por el portamuestras y el microhilo amorfo.

2.4 Caracterización las bobinas de Helmholtz con el sensor de MI y punta Hall.

Una vez ensamblado y ajustado el sensor completo, el siguiente paso a realizar es la caracterización de este nuevo sensor y calibrarlo conforme a la referencia que se tiene que es la punta Hall, una vez calibrado el sensor de acuerdo al sensor comercial se comienza la caracterización del campo magnético de las bobinas de Helmholtz a una corriente constante.

Para la caracterización del sensor construido se utilizan las bobinas de Helmholtz como fuente de campo magnético HDc, una fuente de alimentación KEPCO para suministrar la corriente a las bobinas, una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6002 y una PC. Se desarrolla un software de adquisición de datos en LabView para automatizar estas mediciones, las bobinas de Helmholtz ya están previamente caracterizadas para conocer el campo magnético correspondiente a la corriente de alimentación. Se considera además que la impedancia de las bobinas para una corriente de alimentación DC es de 18.5Ω , en función del voltaje podemos conocer la corriente por ley de Ohm; $I=V/R$ por lo que el control de campo magnético se realiza mediante el voltaje de alimentación.

Se colocó el sensor de MI en la parte central de las bobinas de Helmholtz de tal manera que el campo magnético generado por la señal de AC sea perpendicular al campo homogéneo en las bobinas de Helmholtz, se realizaron barridos de voltaje que son proporcionales al campo magnético con lo que se obtuvo la curva de respuesta de voltaje- Campo magnético.

Se diseña un programa de adquisición de datos, en la figura 2.11 se muestra el panel frontal del programa utilizado con el sensor de MI y la tarjeta de NI, en la figura 2.12 se muestra el diagrama a bloques en donde se puede ajustar el paso de las mediciones en voltaje del barrido de la fuente de +50 a -50 V.

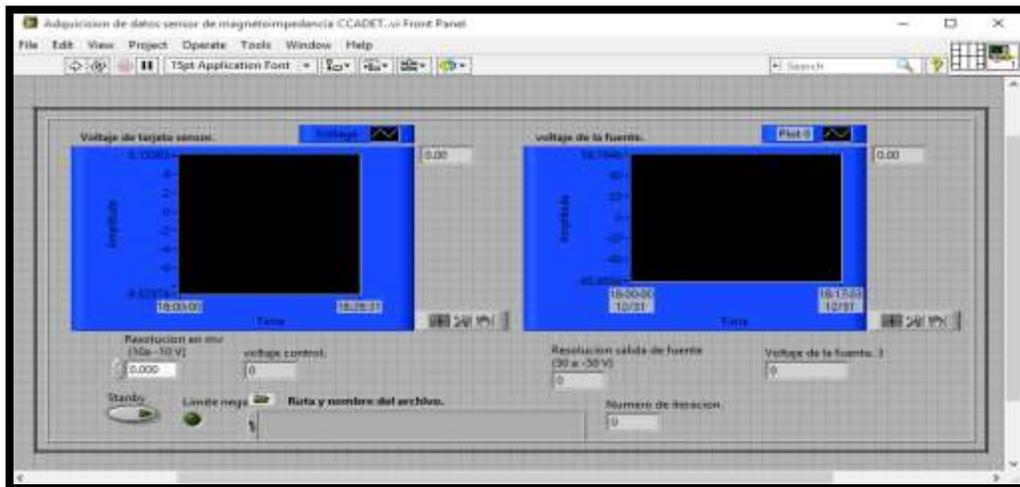


Figura 2.11 Panel frontal del sistema de adquisición de datos para medir MI.

2.5 Modelado del campo magnético de las Bobinas de Helmholtz en COMSOL Multiphysics.

Para tener un mapeo de referencia con el cual poder comparar las mediciones obtenidas con el sensor de MI, se realizó también un mapeo de campo magnético pero ahora con la punta Hall, el montaje experimental se presenta en la figura 2.14, donde ahora se coloca la punta Hall y el módulo de medición de la punta Hall.



Figura 2.14 Montaje experimental para mapeo con la punta Hall.

Adicionalmente se buscó realizar una simulación del campo magnético en las bobinas, la simulación se realizó en COMSOL, para tener la distribución de campo magnético a partir del modelo teórico.

2.5 Modelado del campo magnético de las Bobinas de Helmholtz en COMSOL Multiphysics.

Se realizó una simulación por software en COMSOL Multiphysics, para esto se hizo una revisión del principio de funcionamiento de las bobinas de Helmholtz, después se realizó el modelo de las bobinas utilizando las dimensiones reales y por último se ingresaron valores de corriente para obtener simulaciones con diferentes intensidades de campo magnético.

Es relativamente fácil construir las bobinas de Helmholtz en el software en COMSOL Multiphysics, si se toma en cuenta el esquema de la figura 2.15, donde las bobinas se construyen con un radio R y separadas por la misma distancia R , con un número de espiras cada una igual a N y una corriente I que fluye por ellas en el mismo sentido, con estas consideraciones tendremos en el centro de las bobinas un pequeño volumen de campo magnético homogéneo, el valor del campo magnético generado por las bobinas estará dado por la ecuación 2.2 en Teslas.

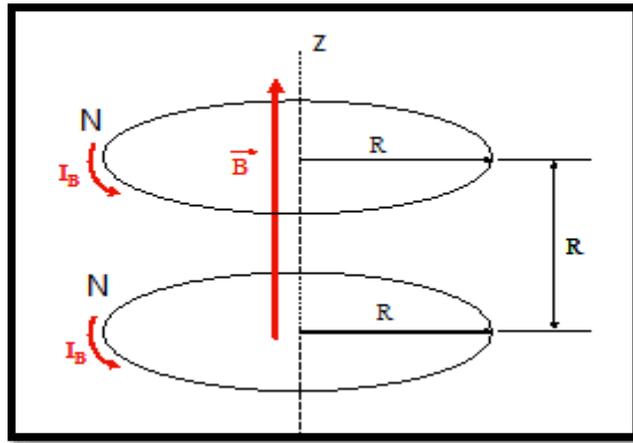


Figura 2.15 Parámetros de las bobinas de Helmholtz. [31]

$$B(z) = \mu_0 \frac{8}{\sqrt{125}} \frac{NI}{R} \dots\dots\dots 2.2.$$

El campo magnético creado en un circuito cerrado debido a una corriente I estará dado por la ecuación 2.3 que constituye la ley de Ampere- Laplace o de Biot- Savart.

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_C \frac{dl \times \hat{r}}{r^2} \dots\dots\dots 2.3.$$

Si se consideran puntos sobre el eje de simetría tendríamos la ecuación 2.4.

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{m}{(R^2 + z^2)^{3/2}} \dots\dots\dots 2.4$$

Y considerando que el momento magnético de la espira es:

$$m = i \cdot S \dots\dots\dots 2.5$$

Entonces el campo magnético creado en un punto a una distancia z de las bobinas sobre su eje de simetría será la ecuación 2.6.

$$B(z) = \frac{N\mu_0 i R^2}{2} \left[\frac{1}{(R^2 + z^2)^{3/2}} + \frac{1}{[R^2 + (R - z)^2]^{3/2}} \right] \dots\dots\dots 2.6$$

Para que dos bobinas que tienen la misma intensidad de campo magnético, separadas de manera equidistante de un punto z tal que la segunda derivada del campo magnético B se anule, solo se conseguirá para una separación igual a su radio R , para este caso en particular el campo magnético estará dado por la ecuación 2.7. [32] [33]

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{R} \frac{8}{5^{3/2}} \dots\dots\dots 2.7$$

2.5 Modelado del campo magnético de las Bobinas de Helmholtz en COMSOL Multiphysics.

Para el proceso de simulación de campo magnético en COMSOL: Primero se construyen las bobinas dibujando dos rectángulos con una separación entre ellos y el origen igual a R basados en la figura 2.16 y las bobinas físicas utilizadas, se asignan las coordenadas de los vértices de los rectángulos, se revoluciona el plano para crear las dos bobinas a las cuales se asignan número de vueltas y corriente que circula en ellas, se debe tener en consideración un límite espacial sobre el cual realizar el estudio por lo que se dibuja una esfera para limitar el volumen sobre el cual se realizan los cálculos, la geometría de la simulación se muestra en la figura 2.16, las dimensiones están en cm.

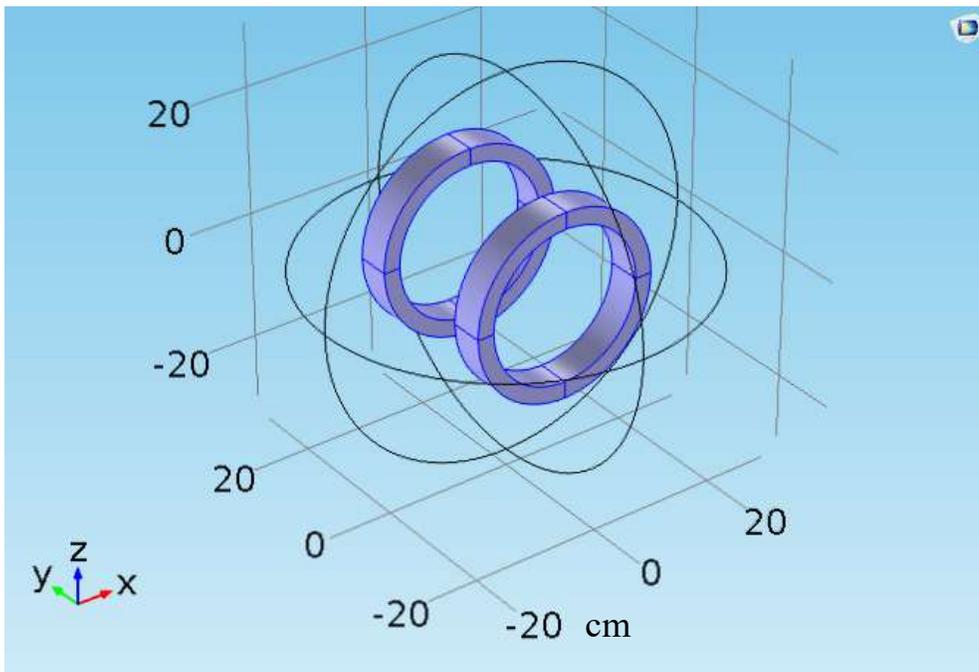


Figura 2.16 Geometría de las bobinas de Helmholtz en COMSOL.

Los valores utilizados en la simulación son:

- N (número de vueltas de la bobina) = 902.
- I (corriente) = dato de cada simulación.
- Radio de la bobina $R = 13.5$ cm.
- Separación entre bobinas de 20 cm tomando como referencia los puntos centrales de cada bobina.
- Diámetro del cable calibre 16 AWG.

Se creó un plano sobre el cual visualizar el campo magnético de las bobinas que es un corte horizontal de la esfera en el origen, se colocaron unas flechas como vectores del campo magnético, en la figura 2.17 se muestra una simulación terminada con el programa, el campo magnético está medido en Gauss y los planos de referencia en cm.

2.5 Modelado del campo magnético de las Bobinas de Helmholtz en COMSOL Multiphysics.

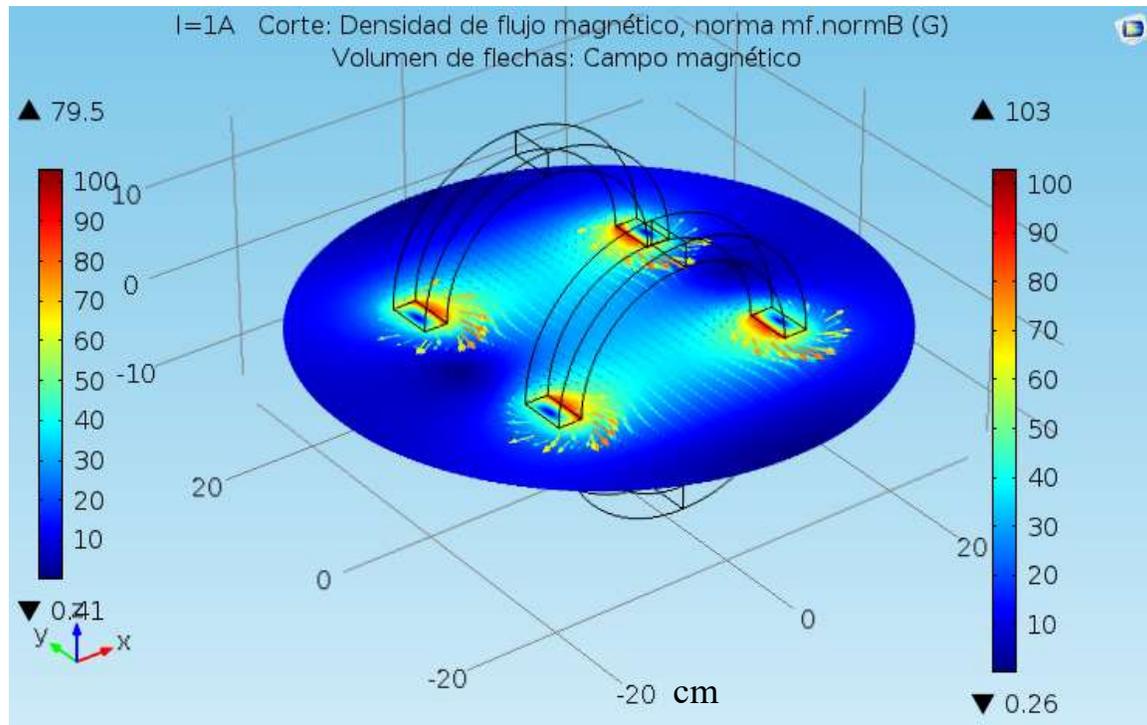


Figura 2,17 Simulación en COMSOL de las bobinas de Helmholtz

Capítulo 3. Resultados y Discusión.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de las bobinas de Helmholtz, del microhilo con MI y caracterización del sensor construido. Se comparan los resultados más relevantes de cada caracterización, la sección 3.1 y 3.2 fueron un medio para poder llegar a las mediciones mostradas en la sección 3.3 a 3.4 y adicionalmente la comparación teórica se presenta en la sección 3.5.

3.1 Resultados de la caracterización de las bobinas de Helmholtz (relación corriente –campo magnético).

Las primeras mediciones fueron realizadas con una punta Hall para verificar la linealidad del campo magnético generado en las bobinas de Helmholtz en base al voltaje de alimentación, en base a la caracterización en el punto 2.2 se calcularon los datos obtenidos que se presentan en la figura 3.1 donde se grafica el campo magnético medido con la punta Hall en Gauss en el eje “Y” y por otro lado en el eje “X” la corriente de alimentación aplicada a las bobinas de Helmholtz.

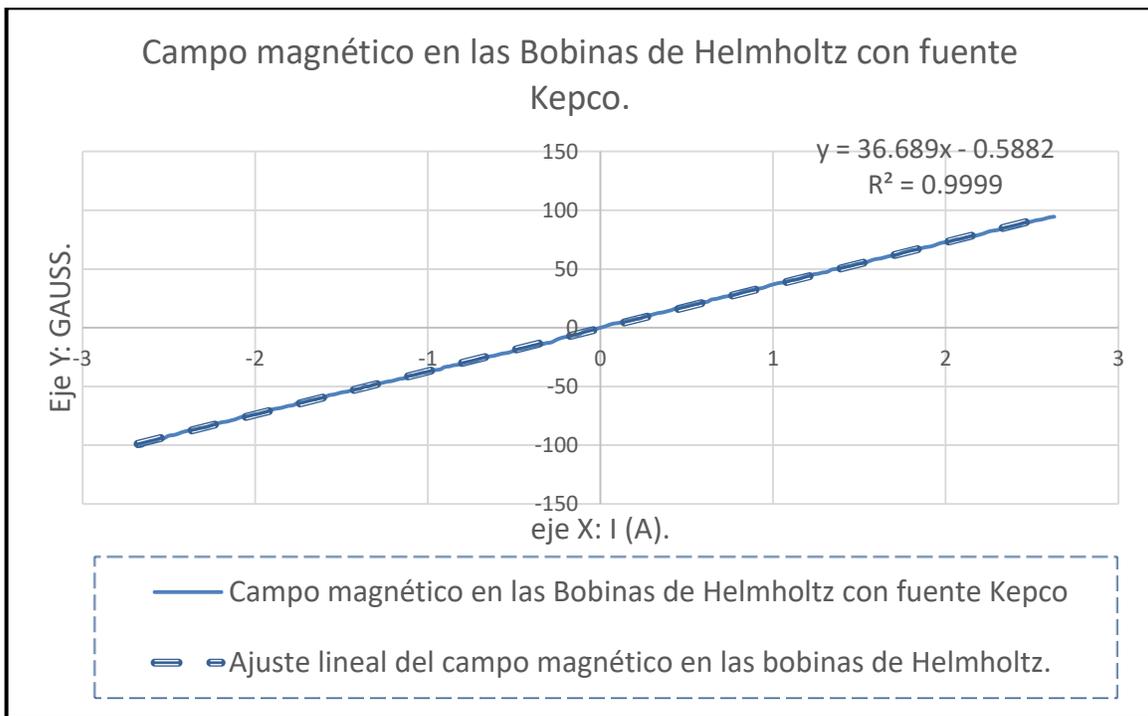


Figura 3.1 Grafica de respuesta de campo magnético respecto a la corriente aplicada a las bobinas de Helmholtz.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

También se realizó un ajuste lineal y se obtuvo la ecuación 3.1, esta ecuación nos ayuda a calcular el campo magnético generado en el centro de las bobinas de Helmholtz utilizadas en este proyecto, Y= campo magnético en Gauss y X= Corriente DC que circula por las bobinas en Amperes.

$$Y=36.689 X- 0.5882 \dots\dots\dots 3.1$$

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

La medición de Magnetoimpedancia se realiza a una frecuencia constante con un barrido de campo magnético por lo que se caracterizó el microhilo amorfo en un rango de frecuencia de 100 kHz a 20 MHz en un barrido de campo de ± 28 Gauss. Cabe mencionar que el microhilo amorfo es un material ferromagnético ultrasuave por lo que al aplicarle 28 Gauss se asegura que el material está muy cerca del punto de saturación magnética.

En la figura 3.2 se presentan los resultados de las mediciones de Magnetoimpedancia a frecuencias de 100 a 900 kHz con pasos de 100 kHz, se observa un porcentaje de cambio de impedancia de 4.5 % a 100 kHz y un máximo de 7.5 % a 900 kHz.

Los procesos de magnetización asociados a esta frecuencia incluyen los dominios magnéticos circunferenciales y los dominios magnéticos centrales que corresponde a una estructura magnética tipo bambú. Por lo que se observan tres picos, el pico central corresponde a los dominios magnéticos tipo bambú y los picos simétricos son respuesta de los dominios circunferenciales. Esta respuesta es característica a frecuencia menor de 1 MHz (figuras 3.2 y 3.3) dado que el efecto de piel comienza a restringir la penetración de la onda electromagnética por lo que para altas frecuencias solo contribuyen los dominios circunferenciales.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

Se diseñó una línea microstrip que minimiza el aporte imaginario a las frecuencias utilizadas en este proyecto, a pesar de esto el aporte de la MI es parte real e imaginaria razón por la que los resultados mostrados son valores absolutos de Z .

En la figura 3.2 se presentan los valores experimentales medidos de MI para frecuencias de 100 a 900 kHz, para campos de -25 a 28 Gauss.

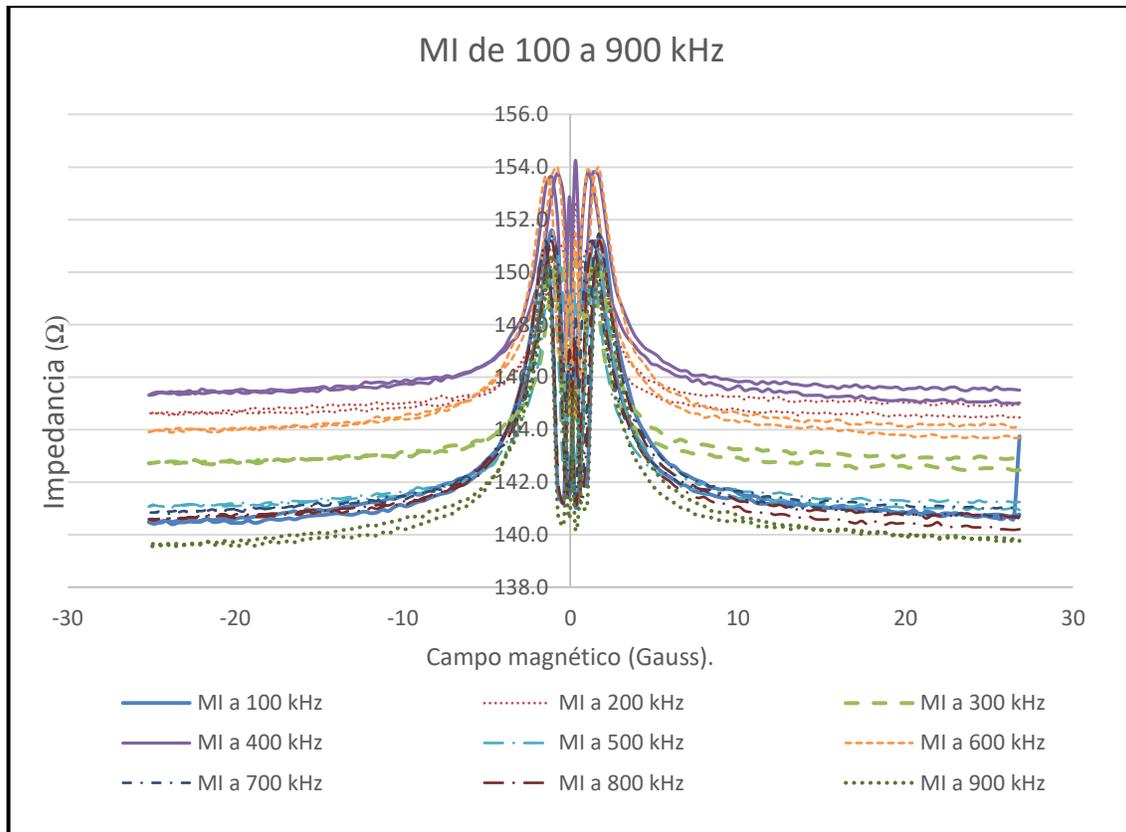


Figura 3.2. MI en microhilo amorfo de 100 a 900 kHz.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

A los valores experimentales obtenidos y mostrados en la figura 3.2 se aplicó la expresión 1.7 para determinar los valores de porcentaje de cambio de impedancia en función del campo magnético para cada medición y para cada frecuencia, estos valores obtenidos nos ayudan a determinar a qué frecuencia obtenemos el mayor cambio de impedancia tomando como referencia la impedancia obtenida con un campo aplicado máximo (H_{max}), con un mayor porcentaje de cambio de impedancia el microhilo tendrá una mayor sensibilidad a cambios de campo magnético.

En la figura 3.3 se muestran los valores calculados tomando como base los resultados expresados en la figura 3.2, donde se puede apreciar que hasta este punto conforme se aumenta la frecuencia de excitación del microhilo amorfo se obtiene una mayor respuesta de cambio de impedancia como es el caso de la curva de 900 kHz.

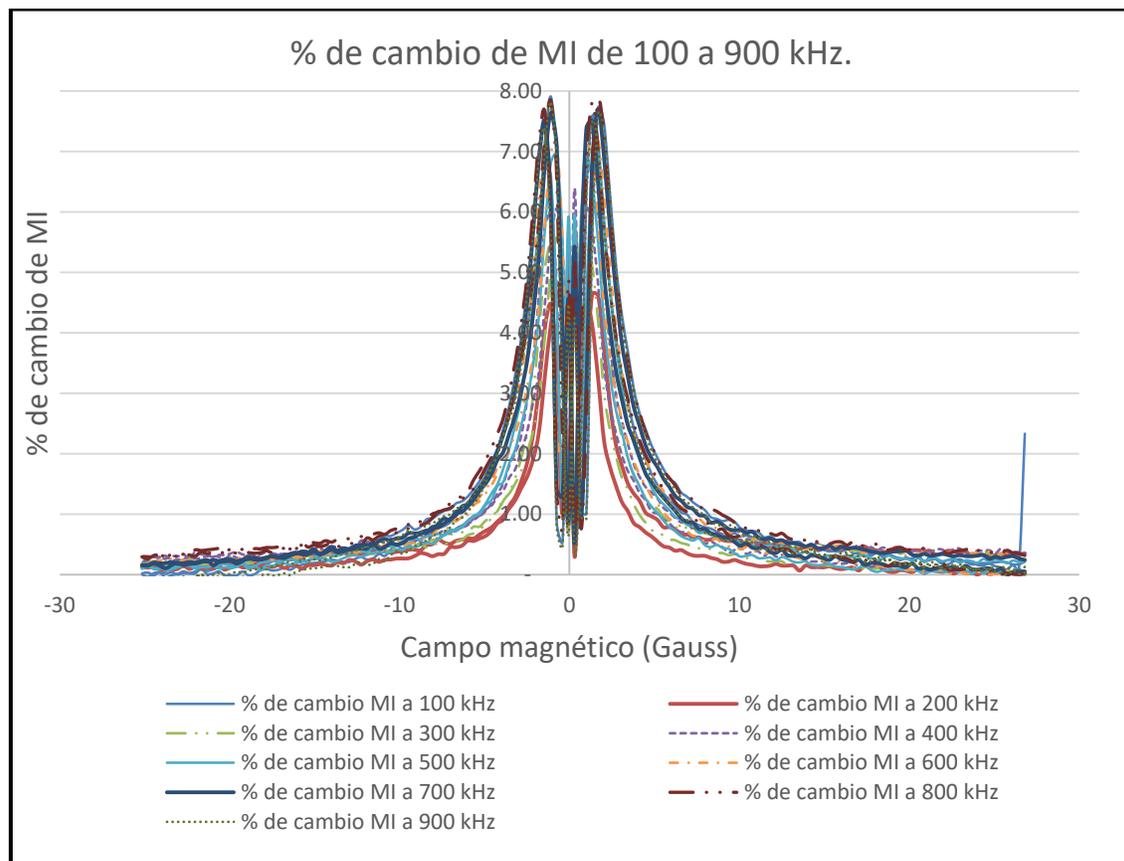


Figura 3.3 Porcentaje de cambio de MI de 100 a 900 kHz.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

En la figura 3.4 se presentan los resultados de las mediciones de Magnetoimpedancia a frecuencias de 1 a 10 MHz con pasos de 1 MHz, de igual manera de -25 a 28 Gauss.

Para estas frecuencias la contribución de los dominios magnéticos centrales disminuye drásticamente por el efecto de piel que es función de la frecuencia por lo que se observa que el pico central de la respuesta de MI es muy pequeña, siendo casi exclusivamente la respuesta de MI originada por los dominios circunferenciales, observándose los dos picos simétricos en todo el rango de frecuencia, además que se observa un incremento de la variación de la impedancia en función de la frecuencia.

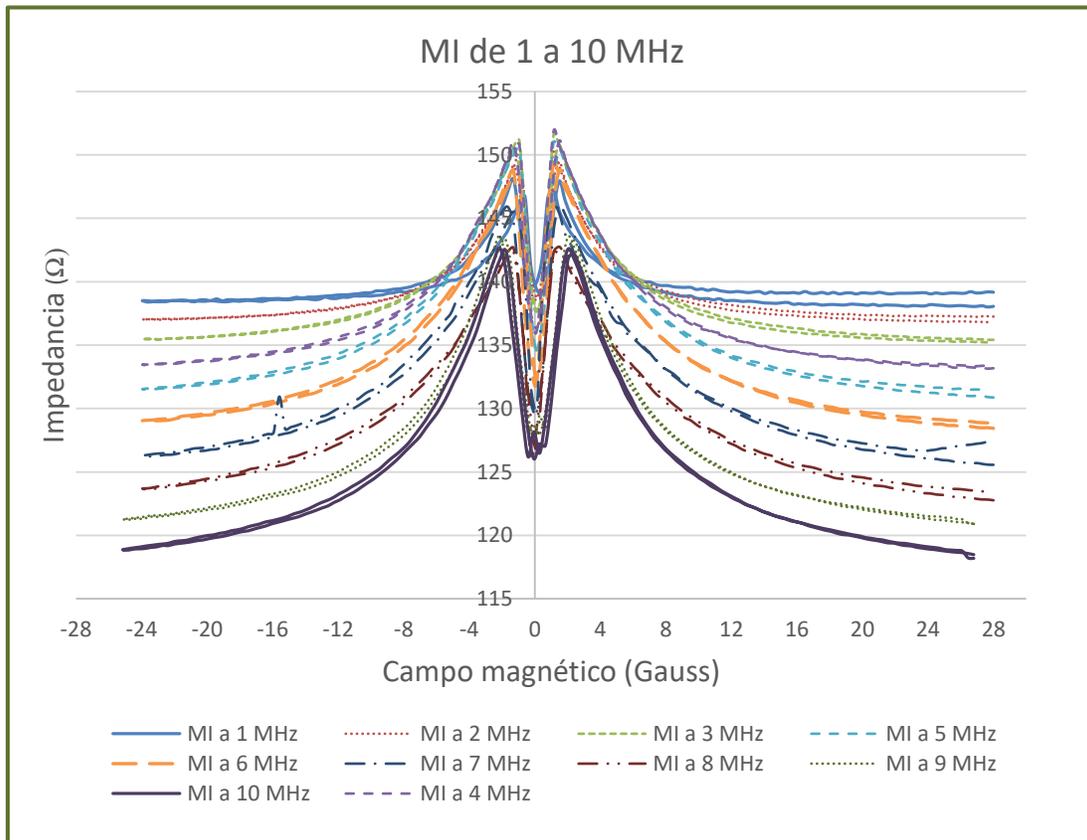


Figura 3.4. MI en microhilo amorfo de 1 a 10 MHz

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

También se calcularon los valores de porcentaje de cambio de impedancia en función del campo magnético y se presenta la de impedancia absoluta a una frecuencia constante, esto se muestra en la figura 3.5, se observa un porcentaje de cambio de impedancia de 7.3 % en 1 MHz y un máximo de 20.9 % a 10 MHz.

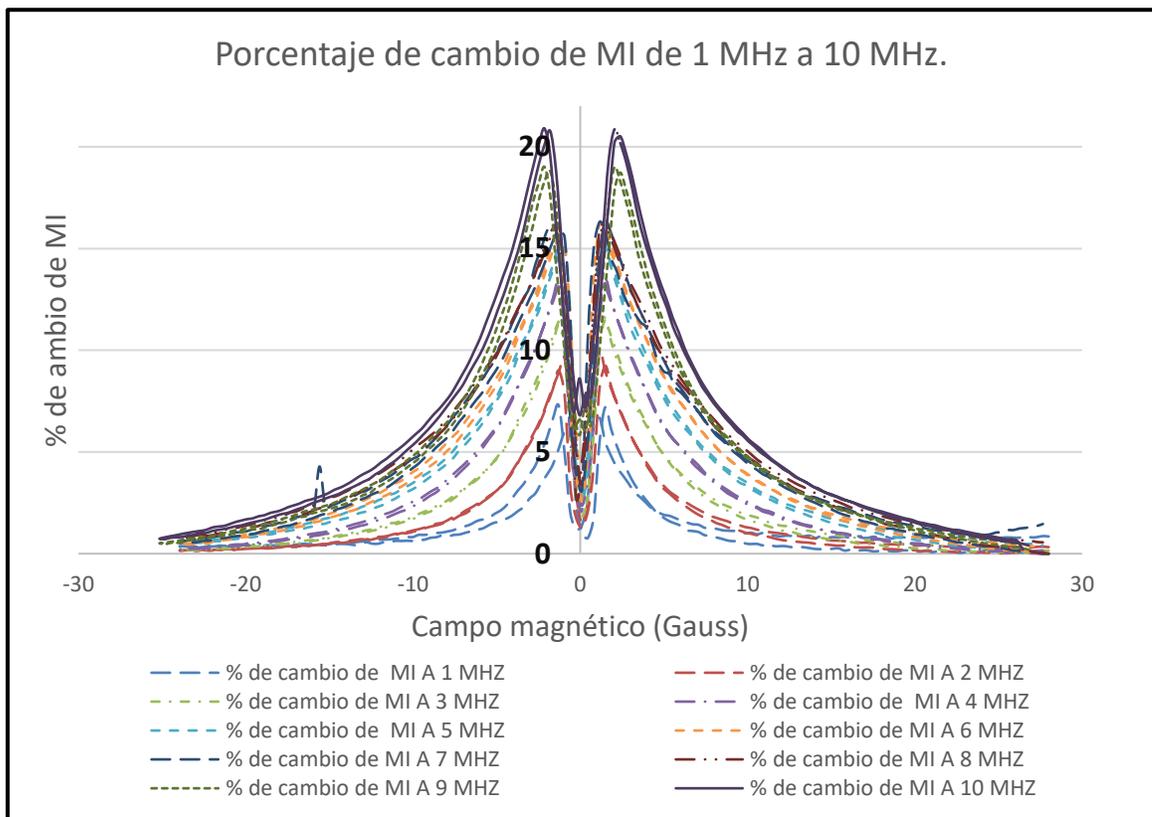


Figura 3.5 Porcentaje de cambio de MI de 1 a 10 MHz.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

En la figura 3.6 se presentan los resultados de las mediciones de Magnetoimpedancia a frecuencias de 11 a 20 MHz con pasos de 1 MHz de -25 a 28 Gauss.

Para esta región de frecuencia la respuesta de MI es exclusivamente de los dominios circunferenciales por lo se observa para frecuencias mayores a 1 MHz solo dos picos simétricos, y una muy pequeña contribución de los dominios de bambú.

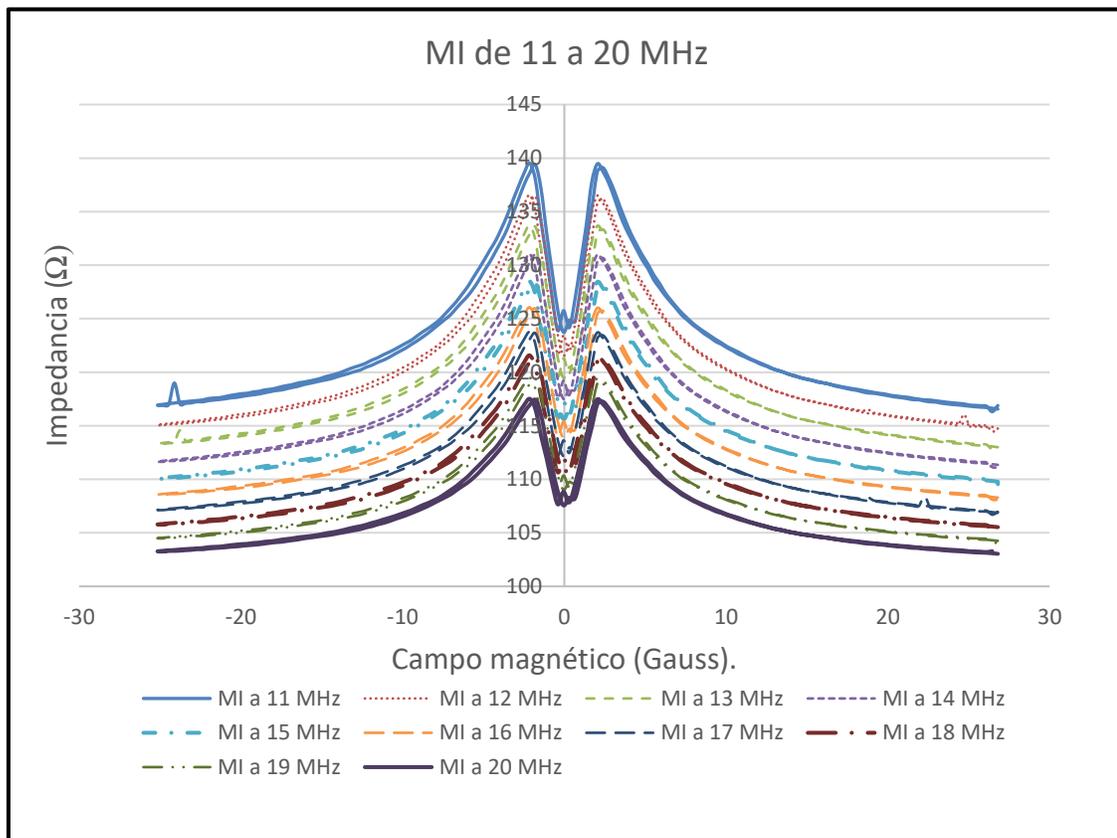


Figura 3.6 MI en microhilo amorfo de 11 a 20 MHz.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

En la figura 3.7 Se muestran los valores calculados de porcentaje de cambio de impedancia de las mediciones de 11 a 20 MHz, se puede observar que el pico central prácticamente ha desaparecido quedando solo los picos característicos de la MI, se observa una disminución en el porcentaje de cambio de impedancia ya con valores por debajo de 20% hasta 14%.

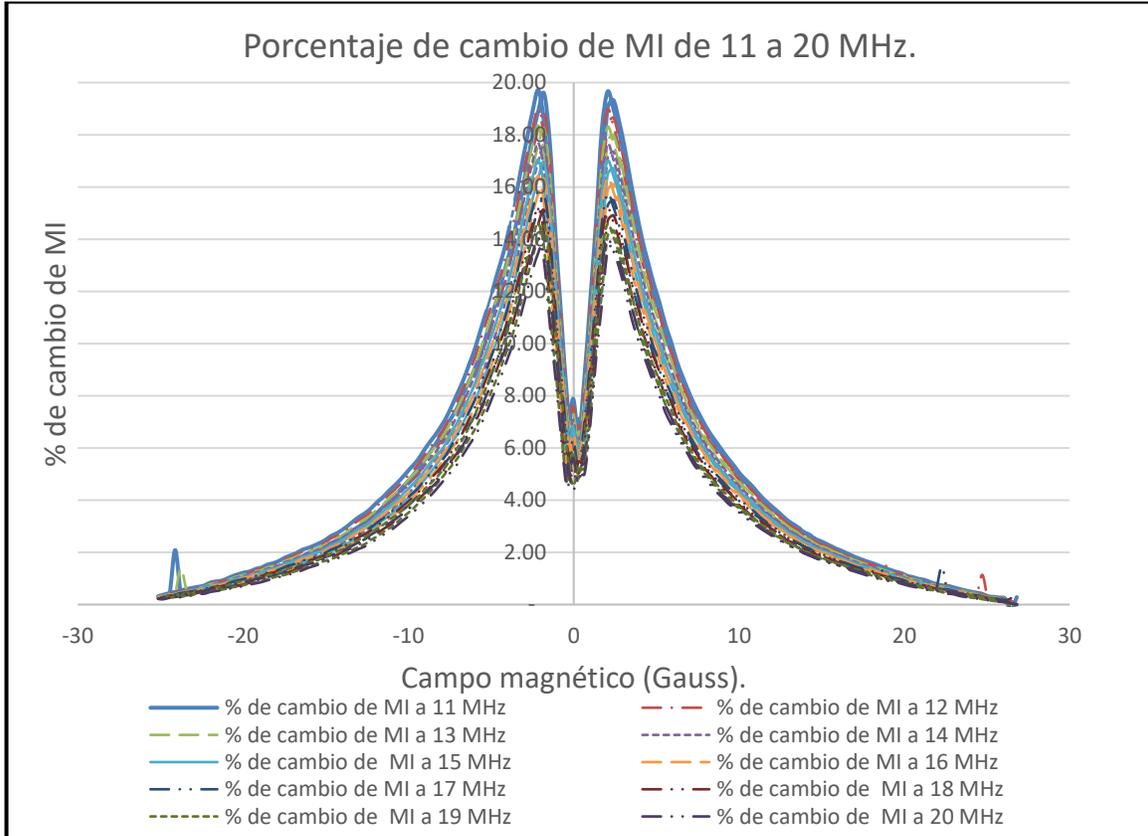


Figura 3.7 Porcentaje de cambio de MI de 11 a 20 MHz.

Por lo tanto, el efecto de piel, origina que los dominios circunferenciales sean casi exclusivamente los únicos que aporten a la variación de la impedancia, tomando como referencia la expresión 1.6 y reduciéndola obtenemos la siguiente expresión:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \dots \dots \dots 3.2$$

Donde podemos observar que la penetración de piel dependerá de la resistividad del microhilo (ρ) que es una constante y se mide en $\mu\Omega\text{cm}$, de la frecuencia que es una constante para cada medición de MI y de la permeabilidad que es una variable dependiente del campo magnético externo H_{DC} y la señal AC, por lo que ante cualquier incremento de resistividad, permeabilidad o frecuencia del campo magnético AC, el campo electromagnético tiende a concentrarse en la superficie del microhilo, el valor de del efecto piel estaría dado en mm.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

En la figura 3.8 se muestra la dependencia de la permeabilidad respecto al incremento de la señal de AC, se observa que a frecuencias por debajo de 10 kHz la permeabilidad es constante y comienza a decrementar ante un aumento de la frecuencia.

En resumen, el efecto piel mayoritariamente afectara la impedancia en el microhilo tomando en cuenta que ante un incremento en la frecuencia de la señal de excitación se provocara un decremento en la permeabilidad en el microhilo, afectándose de esta la manera la profundidad de piel. [30]

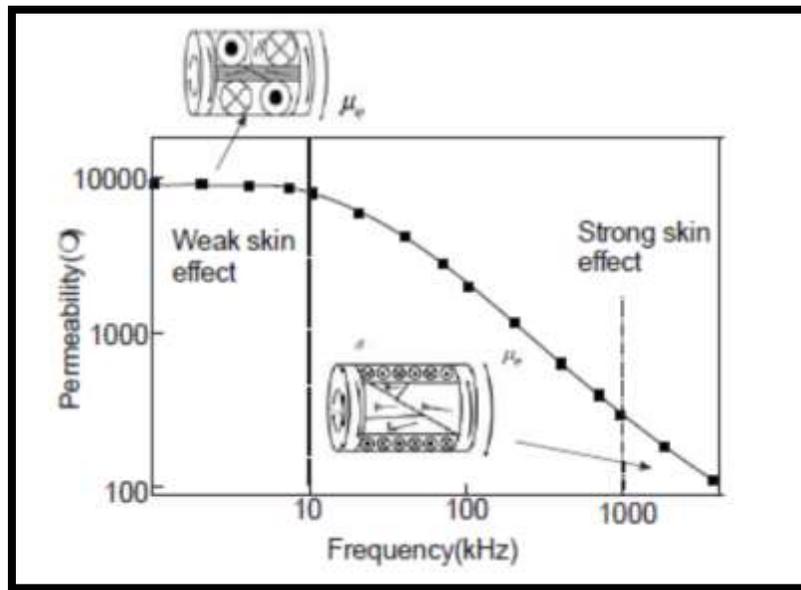


Figura 3.8 Dependencia de la permeabilidad en un microhilo amorfo respecto a la frecuencia. [30]

Adicionalmente al efecto pelicular, los procesos de magnetización inducidos a bajas frecuencias (del orden de kHz) son asociados al abombamiento de paredes de dominios, y a la rotación de spin. Cuando la excitación en un material ferromagnético está dada por una señal de AC en altas frecuencias (del orden de MHz) las paredes ya no pueden seguir el ritmo del campo de excitación AC por lo que ocurre una relajación en las paredes de dominio y el proceso predominante es la rotación de spin, hasta llegar a una frecuencia superior en la cual se producirá la resonancia magnética. [34]

Se realizó un cálculo teórico para tener una referencia de la aportación del efecto skin o pelicular al fenómeno de MI, se tomó como referencia la expresión 3.2 y la gráfica de la figura 3.8, de la cual hay que tomar en cuenta que no muestra valores para todas las frecuencias a las cuales se trabajó con el sensor pero se observa que la tendencia es hacia un valor mínimo y mantenerse, los resultados de este cálculo se muestran en la figura 3.9 donde se puede apreciar que a partir de 10 MHz la aportación de la permeabilidad es mínima pero significativa debido a el valor de la frecuencia, La mayor profundidad de piel se obtendrá alrededor de 10 MHz para este caso, por lo tanto a esta frecuencia se obtiene el mayor aporte a la MI.

3.2 Caracterización del microhilo amorfo con Magnetoimpedancia.

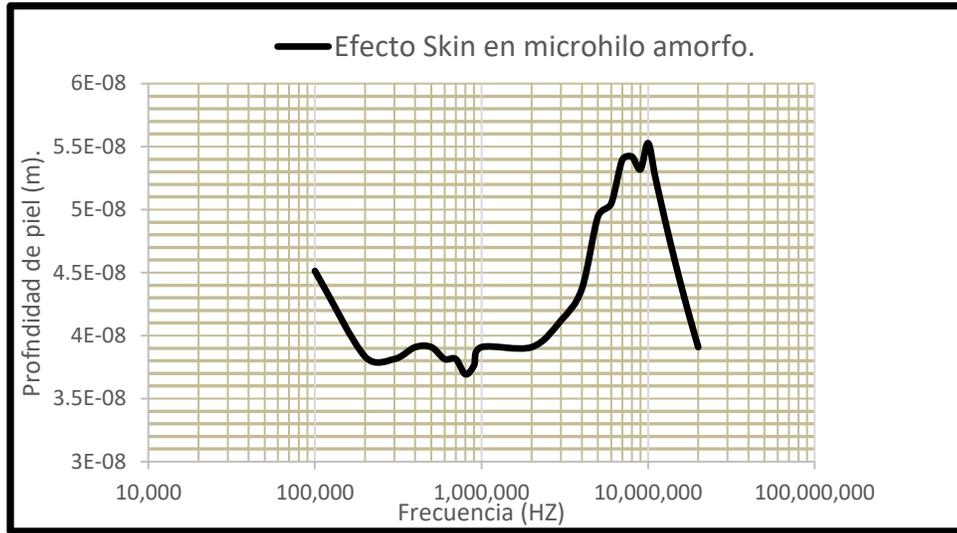


Figura 3.9 Efecto piel en microhilo amorfo respecto a la frecuencia de excitación.

Los procesos de magnetización antes mencionados se pueden observar a algunas frecuencias seleccionadas en la figura 3.10 en donde se hace un zoom en la parte central de las gráficas, observando a bajas frecuencias (100 y 500 kHz) el pico central atribuido al abombamiento de pared el cual decremента o desaparece en frecuencias más altas (15 y 20 MHz).

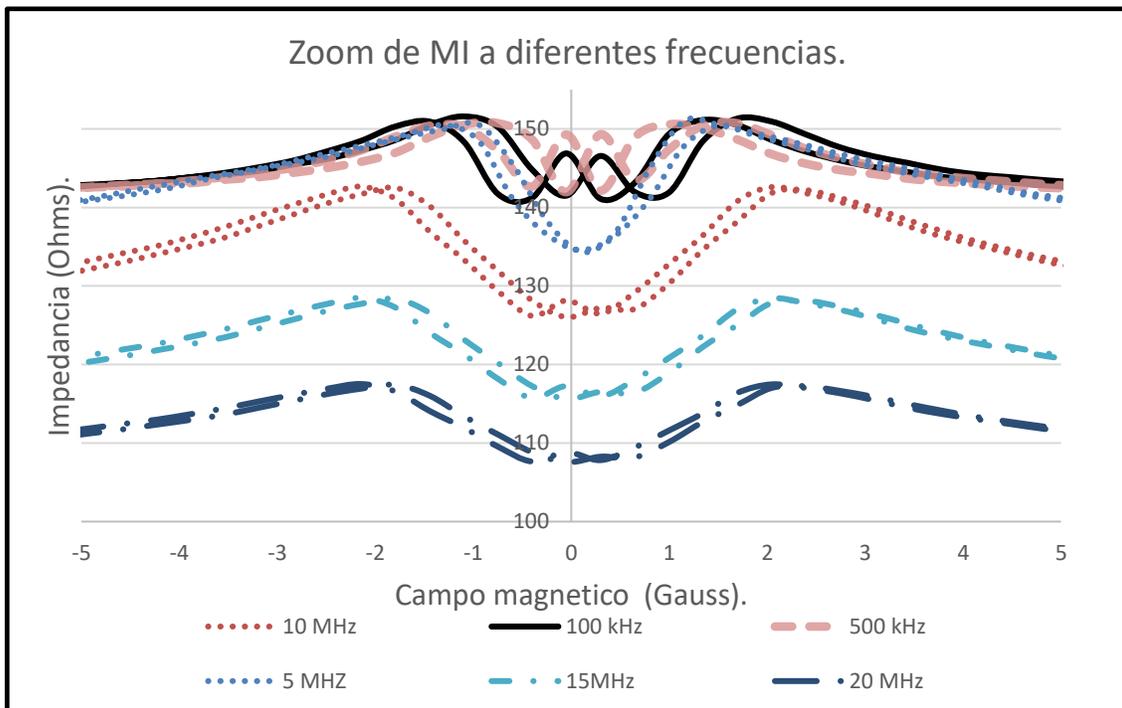


Figura 3.10 Zoom de respuesta de MI en algunas frecuencias.

Se puede concluir en base a las grafías de las figuras 3.2, 3.4 y 3.6 que la mejor respuesta de MI se obtiene a 10 MHz ya que se obtiene un mayor cambio de impedancia que es de 20.9 %.

3.3 Caracterización del sensor de MI.

Después de diseñar y construir el sensor de MI se procedió a reproducir la curva de MI pero ahora con el sensor de MI esto con el objetivo de hacer una caracterización del nuevo sensor y su calibración. Para esto se requirió un ajuste de referencia del sensor con una punta hall, donde la salida del sensor se ajustó a cero, la ganancia también se ajustó para obtener valores de 0 a 5 VDC, se realizó un ajuste polinomial para obtener la curva de respuesta del sensor, cabe mencionar que a pesar de que este sensor de MI no se diseñó en esta ocasión para medir campos menores a 4 Gauss el sensor si es capaz de medirlos e incluso el campo magnético terrestre que está en el orden de 0.25 a 0.65 Gauss (valores en la parte central de la curva marcados con líneas más delgadas en la figura 3,11) aunque con menor exactitud, razón por la que las mediciones se centran en la curva exterior de MI marcadas con líneas más oscuras.

La caracterización se realizó aplicando un campo magnético conocido y obteniendo un valor de voltaje a la salida del sensor, lo que se espera es una lectura de campo magnético, por lo que cada valor de voltaje medido a través del sensor está asociado a un campo magnético, por lo que para conocer este valor de campo magnético, se buscó una función o un que se ajuste a la curva obtenida, se obtuvo un polinomio de grado 7 que se ajusta muy bien a la curva externa de MI para valores de 3.8 Gauss a 94 Gauss.

En la figura 3.11 se muestra la curva de respuesta obtenida en el sensor de MI, el barrido de campo magnético se realizó de ± 94 Gauss, cabe resaltar que el sensor puede medir campos magnéticos más grandes pero debido a las limitaciones de la fuente de alimentación solo se logró caracterizar el sensor hasta ese campo magnético, en base a la curva de respuesta también es posible observar que a partir de estos valores de campo magnético el cambio de impedancia es mínimo y probablemente no valga la pena aplicar campos magnéticos más grandes.

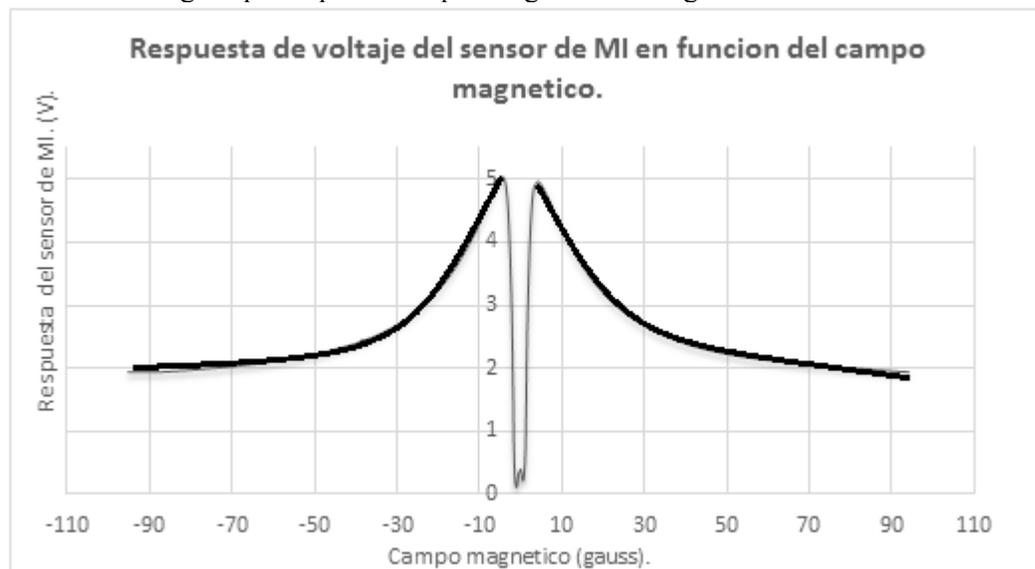


Figura 3.11 Curva de respuesta del sensor de MI.

3.3 Resultados de la caracterización del sensor de MI.

De acuerdo a la curva de respuesta el sensor puede medir valores de campo magnético de 3.8 a 94 Gauss.

Adicionalmente se realizó una caracterización angular del sensor de MI para una $I= 1A$, los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.12 donde el eje horizontal esta graduado con valores de desplazamiento angular en grados y en el eje vertical se muestran valores de voltaje para el caso de mediciones directamente del sensor y campo magnético utilizando la ecuación polinomial.

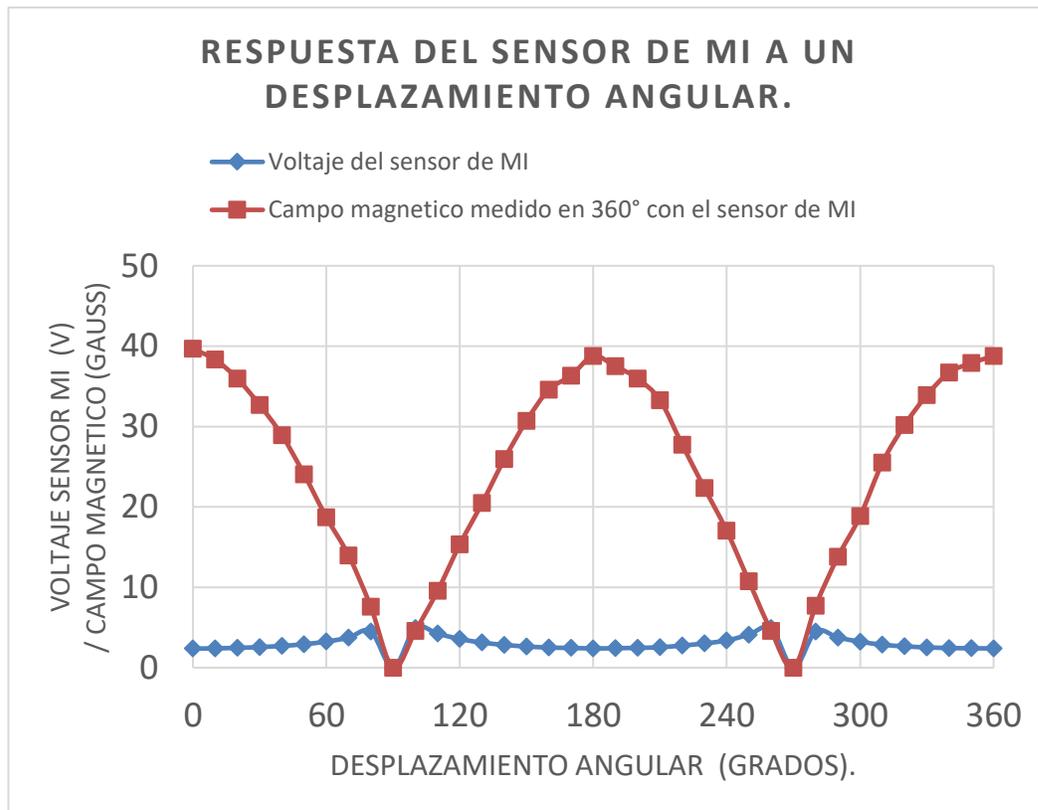


Figura 3.12 Caracterización angular del sensor de MI.

Se puede concluir que la respuesta del sensor es de 3.8 a 94 Gauss ± 0.01 tomando como referencia las mediciones con la punta Hall y podría ser utilizado como sensor angular.

Ya con el sensor construido y calibrado de acuerdo al sensor comercial se logra uno de los principales objetivos que es la construcción del sensor, el principal objetivo de este trabajo es el siguiente paso que es la determinación del campo homogéneo en las bobinas de Helmholtz para lo cual se caracterizan las bobinas en la siguiente sección.

3.4 Mapeo de la distribución del campo magnético de un arreglo de Bobinas de Helmholtz.

Como aplicación y validación del sensor construido se realiza un mapeo de las líneas de campo magnético de una bobina de Helmholtz.

La tabla 3.1 muestra las mediciones realizadas con el sensor de MI y con el ajuste de curva para una corriente de alimentación de 0.2 A y 4.026 V. De acuerdo a la ecuación 3.1 en el centro (coordenada 0,0) se calcula teóricamente un campo magnético de 6.749 Gauss, en la tabla se muestra un mapeo en el plano horizontal con $Z = 0$ y las medidas de los ejes “X” y “Y” están en cm.

Tabla 3.1 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con sensor de MI con 0.2 A, coordenadas en cm valores en Gauss.

Y\X	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
-10.5	8.71	8.41	7.15	6.57	5.96	5.40	5.26	4.94	4.94	5.10	5.40	5.87	6.57	6.79	7.74
-9.5	8.79	8.64	7.42	6.83	6.28	5.87	5.40	5.10	5.10	5.26	5.76	6.13	6.66	7.19	7.92
-8.5	8.79	8.33	7.52	7.03	6.71	6.46	6.21	6.21	6.21	6.46	6.66	6.95	7.32	7.92	8.33
-7.5	8.64	8.48	7.74	7.32	7.03	6.83	6.61	6.57	6.57	6.61	6.79	6.99	7.32	7.99	8.26
-6.5	8.48	8.41	7.86	7.42	7.11	6.95	6.83	6.79	6.79	6.87	7.03	7.23	7.57	7.92	8.26
-5.5	8.41	8.41	7.99	7.47	7.32	7.15	7.07	6.95	6.95	7.03	7.15	7.32	7.63	7.86	8.12
-4.5	8.48	8.33	7.68	7.57	7.42	7.23	7.11	7.07	7.11	7.19	7.32	7.47	7.68	7.80	8.05
-3.5	8.12	8.26	7.63	7.68	7.47	7.32	7.23	7.19	7.19	7.23	7.37	7.52	7.74	7.80	8.26
-2.5	7.99	7.74	7.63	7.74	7.52	7.42	7.32	7.32	7.32	7.37	7.47	7.68	7.86	8.05	7.92
-1.5	7.99	7.74	7.63	7.74	7.57	7.47	7.37	7.32	7.32	7.37	7.47	7.57	7.80	7.74	7.92
-0.5	7.99	7.86	7.74	7.63	7.42	7.28	7.15	7.15	7.19	7.23	7.32	7.37	7.57	7.80	7.99
0.5	7.99	7.86	7.74	7.57	7.42	7.28	7.15	7.15	7.19	7.23	7.32	7.47	7.57	7.74	7.92
1.5	7.99	7.86	7.74	7.57	7.42	7.28	7.23	7.19	7.19	7.23	7.23	7.42	7.63	7.74	7.92
2.5	7.99	7.86	7.74	7.57	7.42	7.28	7.32	7.32	7.15	7.19	7.28	7.37	7.74	7.99	7.86
3.5	7.99	7.74	7.68	7.47	7.37	7.42	7.32	7.28	7.28	7.37	7.47	7.57	7.80	7.74	7.86
4.5	8.19	7.86	7.63	7.42	7.23	7.15	7.11	7.07	7.07	7.07	7.19	7.37	7.52	7.80	8.12
5.5	8.26	7.99	7.68	7.42	7.19	7.07	6.99	6.99	6.95	6.99	7.11	7.23	7.47	7.68	7.99
6.5	8.41	8.12	7.63	7.32	7.11	6.95	6.87	6.79	6.79	6.75	6.99	7.11	7.37	7.74	7.99
7.5	8.64	8.12	7.57	7.23	6.95	6.79	6.66	6.61	6.61	6.71	6.83	7.31	7.28	7.52	8.05
8.5	8.79	8.05	7.47	7.11	6.75	6.57	6.40	6.28	6.34	6.46	6.75	6.87	7.07	7.47	8.05
9.5	8.71	8.12	7.32	6.95	6.61	6.34	6.13	5.96	6.13	6.34	6.46	6.75	7.11	7.42	8.12
10.5	8.56	8.05	6.99	6.52	6.28	5.87	5.65	5.65	5.65	5.87	6.21	6.52	6.87	7.47	8.12

3.4 Resultados de la caracterización de las bobinas de Helmholtz (mapeo).

La tabla 3.2 muestra las mediciones realizadas con la punta Hall para una corriente de alimentación de 1 A y 18.84 V en las bobinas de Helmholtz según la ecuación 3.1 en el centro tendríamos 6.749 Gauss.

Tabla 3.2 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con punta Hall con 0.2 A de alimentación, coordenadas en cm valores en Gauss.

Y/X	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
-11.5	10.0	8.0	7.5	6.5	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.5	7.5	8.0	10.0
-10.5	10.5	9.0	8.0	7.5	6.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	7.5	8.0	10.0
-9.5	10.5	9.0	8.0	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	8.0	9.0	10.0
-8.5	10.0	10.0	9.0	8.0	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.5	8.0	9.0	10.0
-7.5	10.0	9.0	8.0	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	8.0	9.0	10.0	10.0
-6.5	10.0	10.0	8.0	8.0	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	8.0	9.0	10.0
-5.5	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0
-4.5	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0
-3.5	10.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0
-2.5	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0
-1.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0
-0.5	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
0.5	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0
1.5	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0
2.5	9.0	9.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0
3.5	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0	9.0
4.5	10.0	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0
5.5	10.0	9.0	8.0	8.0	8.0	7.5	7.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0
6.5	10.0	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	8.0	9.0	9.0
7.5	10.0	9.0	8.0	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	8.0	8.0	9.0	9.0
8.5	10.0	10.0	9.0	8.0	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.5	8.0	8.0	9.0
9.5	10.0	9.0	8.0	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.5	8.0	9.0	10.0
10.5	10.0	9.0	8.0	7.5	6.5	6.5	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.5	7.5	8.0	9.0
11.5	9.0	7.5	6.5	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.5	7.5	9.0	10.0

Comparando ambos mapeos de la tabla 3.1 y 3.2 se concluye que para el mismo valor corriente se presenta mayor resolución y sensibilidad, con un menor error en el sensor MI que el sensor Hall.

3.4 Resultados de la caracterización de las bobinas de Helmholtz (mapeo).

La tabla 3.3 muestra las mediciones realizadas con el sensor de MI con el ajuste polinomial para una corriente de alimentación de 1 A y 18.84 V en las bobinas de Helmholtz según la ecuación 3.1 en el centro tendríamos 38.10 Gauss.

Tabla 3.3. Caracterización de Bobinas de Helmholtz con sensor de MI con 1 A, coordenadas en cm valores en Gauss.

Y/X	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
-10.5	45.87	45.21	38.33	33.29	29.68	27.27	26.15	25.29	25.29	25.93	27.50	29.43	32.10	32.98	43.94
-9.5	48.80	45.87	39.21	34.90	31.53	29.68	28.69	28.44	28.44	29.68	31.53	33.60	37.49	42.20	45.87
-8.5	48.80	46.57	41.66	37.09	34.23	31.81	30.72	30.19	30.19	30.99	32.39	34.56	38.76	41.66	47.28
-7.5	48.03	45.21	41.14	37.90	35.24	33.60	32.68	32.10	32.39	33.29	34.90	37.09	40.14	43.94	46.57
-6.5	47.28	45.21	42.76	40.63	37.90	36.33	34.90	34.56	34.56	35.24	36.33	37.90	40.63	43.34	46.57
-5.5	46.57	44.56	42.20	40.14	37.90	36.71	35.96	35.60	35.96	36.33	37.90	39.21	41.66	45.21	45.87
-4.5	45.87	45.21	43.34	40.63	39.21	37.90	36.71	36.33	36.33	36.71	37.90	39.21	41.14	43.34	45.21
-3.5	45.87	44.56	42.76	41.14	39.67	38.76	37.90	37.49	37.49	38.33	39.21	40.14	42.20	43.94	44.56
-2.5	45.21	44.56	42.76	41.66	40.63	39.21	38.76	38.33	38.33	38.76	39.67	40.63	42.20	43.34	44.56
-1.5	44.56	43.94	42.76	41.14	40.14	39.21	38.76	38.33	38.33	39.21	39.67	40.63	42.20	43.34	43.94
-0.5	44.56	43.94	42.76	41.14	40.14	39.21	38.76	38.76	38.76	38.76	39.21	40.14	41.66	42.20	43.34
0.5	45.21	43.34	42.76	41.14	40.14	39.21	38.76	38.76	38.76	39.21	39.67	40.63	41.66	42.76	43.34
1.5	44.56	44.56	42.76	41.66	40.63	39.21	38.76	38.33	38.76	38.76	39.67	40.63	41.66	42.76	43.34
2.5	44.56	43.94	42.20	41.14	40.14	39.21	38.33	38.33	38.33	38.76	39.67	40.14	41.66	42.76	43.94
3.5	44.56	43.94	42.20	41.14	39.21	38.76	37.90	37.90	37.90	38.33	38.76	40.14	41.14	42.76	43.34
4.5	45.21	43.94	42.20	40.63	39.21	37.90	37.49	37.09	37.49	37.90	38.76	40.14	41.66	43.34	43.94
5.5	45.87	44.56	42.20	40.14	38.76	37.90	37.09	36.33	36.33	37.09	37.90	39.67	41.14	43.34	45.21
6.5	48.03	45.21	41.66	40.14	38.33	37.09	35.96	35.60	35.96	36.33	37.90	39.21	41.66	43.94	45.87
7.5	48.80	44.56	41.66	39.21	37.09	35.60	34.56	34.56	34.56	35.60	36.71	38.76	41.14	43.94	45.87
8.5	51.31	46.57	42.20	38.33	35.96	34.23	33.60	32.98	33.29	34.23	35.24	37.09	40.14	42.76	45.21
9.5	49.61	46.57	41.66	37.49	34.23	32.39	31.53	30.72	30.72	31.81	33.60	35.96	38.76	42.76	46.57
10.5	51.31	45.87	39.67	35.24	32.39	30.19	28.93	28.21	28.44	28.93	30.45	32.39	35.60	39.67	45.21

3.4 Resultados de la caracterización de las bobinas de Helmholtz (mapeo).

La tabla 3.4 muestra las mediciones realizadas con la punta Hall para una corriente de alimentación de 1 A y 18.84 V en las bobinas de Helmholtz, según la ecuación 3.1 en el centro tendríamos 38.10 Gauss.

Tabla 3.4 Caracterización de Bobinas de Helmholtz con punta Hall a 1 A, coordenadas en cm valores en Gauss.

Y/X	-7.0	-6.0	-5.0	-4.0	-3.0	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
-11.5	47.5	38.5	31.5	27.0	24.5	23.0	22.0	21.5	21.5	21.5	23.0	25.5	28.0	33.0	44.5
-10.5	46.0	40.0	33.0	29.0	27.0	25.5	24.5	24.5	25.5	26.5	28.0	30.5	33.5	39.5	45.5
-9.5	52.0	46.0	41.0	35.5	33.0	30.5	28.0	27.0	27.0	27.0	28.0	29.5	32.0	37.0	41.0
-8.5	48.5	44.5	39.5	36.0	33.5	31.5	29.5	29.5	29.5	30.5	31.5	33.5	36.0	39.5	43.0
-7.5	47.5	46.0	42.0	38.5	36.0	34.5	33.0	32.0	31.5	31.5	32.0	33.5	36.0	38.0	42.0
-6.5	45.5	43.0	41.0	38.5	36.0	34.5	33.5	33.0	33.0	33.5	34.5	36.0	38.5	40.5	43.0
-5.5	45.5	43.5	41.0	39.5	38.0	36.0	35.5	34.5	34.5	34.5	34.5	36.0	38.0	39.5	41.0
-4.5	43.0	41.0	39.5	38.0	36.0	35.5	35.5	35.5	35.5	36.0	38.0	38.5	40.5	42.0	43.0
-3.5	43.0	42.0	40.5	38.5	38.0	37.0	36.0	36.0	36.0	36.0	37.0	38.5	39.5	41.0	42.0
-2.5	42.0	41.0	39.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	41.0	42.0
-1.5	42.0	41.0	40.5	39.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	41.0
-0.5	42.0	41.0	39.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	41.0	42.0
0.5	43.0	42.0	41.0	39.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	41.0
1.5	42.0	41.5	40.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	41.0	41.0
2.5	43.0	42.0	40.5	39.5	38.5	38.0	37.0	37.0	37.0	37.0	38.0	38.5	39.5	40.5	42.0
3.5	43.0	41.0	39.5	38.5	37.0	37.0	36.0	36.0	37.0	37.0	38.0	38.5	40.5	42.0	42.0
4.5	43.0	42.0	40.5	38.5	38.0	37.0	36.0	36.0	36.0	36.0	37.0	38.0	39.5	41.0	42.0
5.5	43.5	43.0	41.0	38.5	38.0	36.0	35.5	35.5	35.5	35.5	36.0	38.0	38.5	41.0	43.0
6.5	44.5	42.0	39.5	37.0	36.0	34.5	33.5	33.5	34.5	34.5	36.0	38.0	39.5	42.0	43.5
7.5	45.5	43.5	40.5	38.0	35.5	33.5	33.0	33.0	33.0	33.5	34.5	36.0	38.5	42.0	44.5
8.5	45.5	42.0	38.0	35.5	33.0	32.0	31.5	31.5	31.5	32.0	33.5	36.0	38.5	43.0	46.0
9.5	46.0	41.0	37.0	33.5	31.5	29.5	29.0	29.0	29.0	30.5	31.5	34.5	37.0	41.0	45.5
10.5	47.5	40.5	35.5	30.5	29.0	27.0	26.5	26.5	27.0	28.0	29.5	32.0	35.5	40.5	46.0
11.5	47.0	38.0	33.0	29.0	26.5	24.5	24.0	24.0	24.0	24.0	25.5	27.0	32.0	37.0	44.5

Comparando los resultados de las tablas 3.1 y 3.2 se puede observar que para campos magnéticos relativamente pequeños como es el caso de 7.2 Gauss con una resolución de .1 Gauss y un rango de error de ± 0.5 Gauss podemos decir que se tiene una esfera de radio de 1 cm con campo homogéneo con el sensor de MI, que comparándolo con las mediciones de la punta Hall tendríamos una esfera de 2 cm de radio con un rango de error de 1.4 Gauss, según las mediciones un valor central de 8 Gauss.

3.5 Resultado de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

Haciendo la comparación para campos magnéticos más grandes como es 38.10 Gauss con el sensor de MI se obtiene una esfera de campo magnético homogéneo de 0.5 cm de radio a un valor de 38.76 ± 0.5 Gauss y para las mediciones realizadas con la punta Hall se obtiene una esfera de campo homogéneo de radio de 1 cm con un valor de 37 ± 1.5 Gauss.

Se puede observar una mejor resolución con el sensor de MI por lo tanto se muestra una esfera de campo magnético homogéneo más pequeña comparando las mediciones con la punta Hall.

Por último, se decidió realizar una comparación cualitativa de los valores obtenidos con una simulación en COMSOL Multiphysics aprovechando una licencia de prueba, los resultados se muestran en la siguiente sección.

3.5 Resultados de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

Se trabajó con el software de simulación COMSOL Multiphysics en el módulo AC/DC y campo magnético.

Se construyó el modelo en 3D de las bobinas de Helmholtz con las dimensiones de las bobinas físicas con las cuales se estuvo trabajando en todas las mediciones, en la figura 3.13 se muestra la geometría de las bobinas con las dimensiones acotadas en cm.

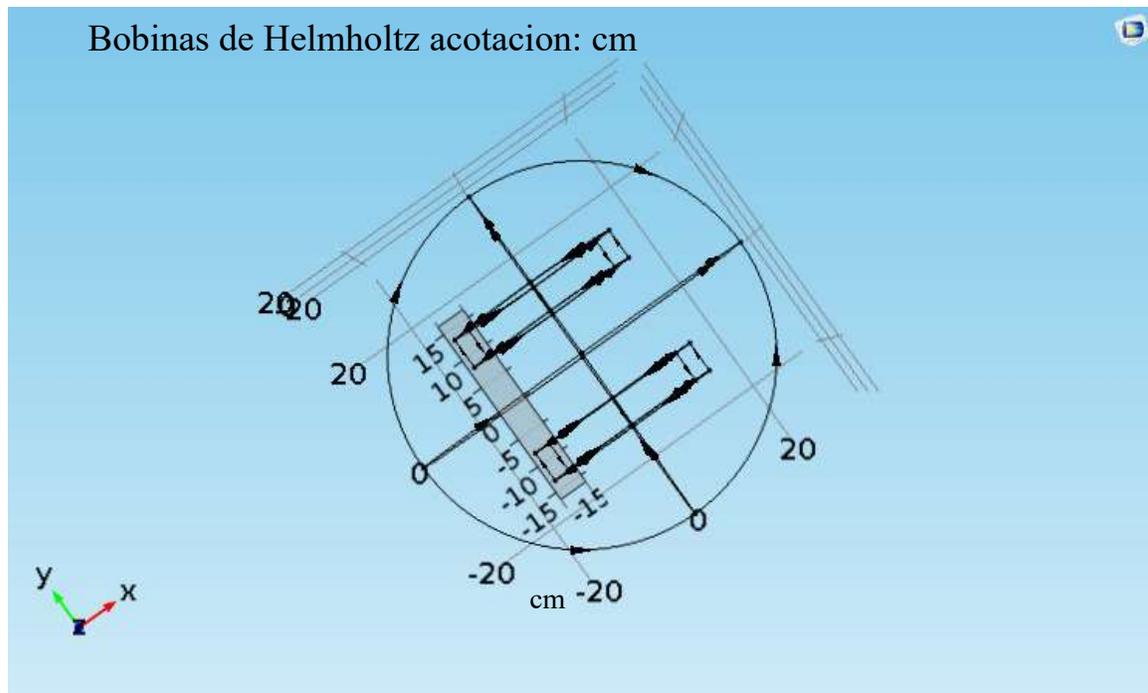


Figura 3.13 Geometría de la simulación de las bobinas de Helmholtz.

3.5 Resultado de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

La simulación puede calcular el campo magnético que en este caso se delimito en una esfera de un radio de 30 cm, para la visualización se eligió crear un plano por lo que solo se observa el campo magnético en un círculo de radio de 30cm tomando en cuenta que las bobinas son simétricas, la escala de campo magnético está dada en Gauss, cada simulación tiene dos barras, la del lado derecho muestra la escala de color de del plano circular y la de la izquierda muestra la escala de color de un volumen de flechas que indican la dirección y magnitud de las líneas de campo magnético.

En las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 se muestran las simulaciones realizadas para una corriente en las bobinas de 0.2 A, cada uno de ellas vistas desde diferentes ángulos, el campo magnético en la coordenada 0,0,0 es de 6.004 Gauss.

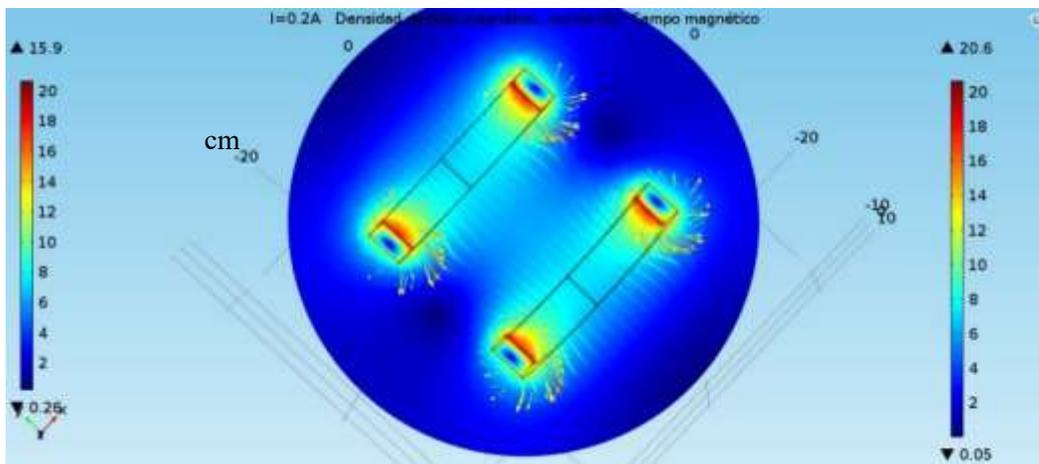


Figura 3.14 Simulación de campo magnético para I=0.2 A vista superior escalas iguales.

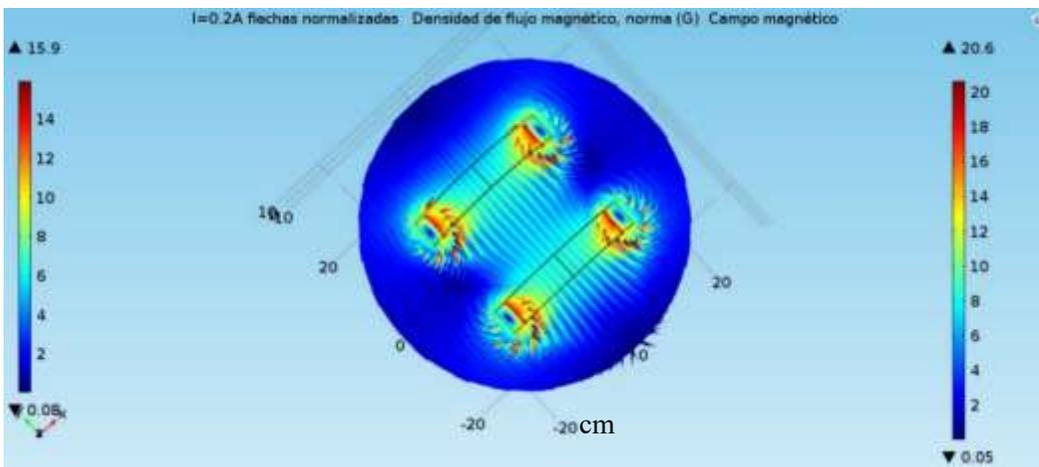


Figura 3.15 Simulación de campo magnético para I=0.2 A escala de flechas normalizadas.

3.5 Resultado de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

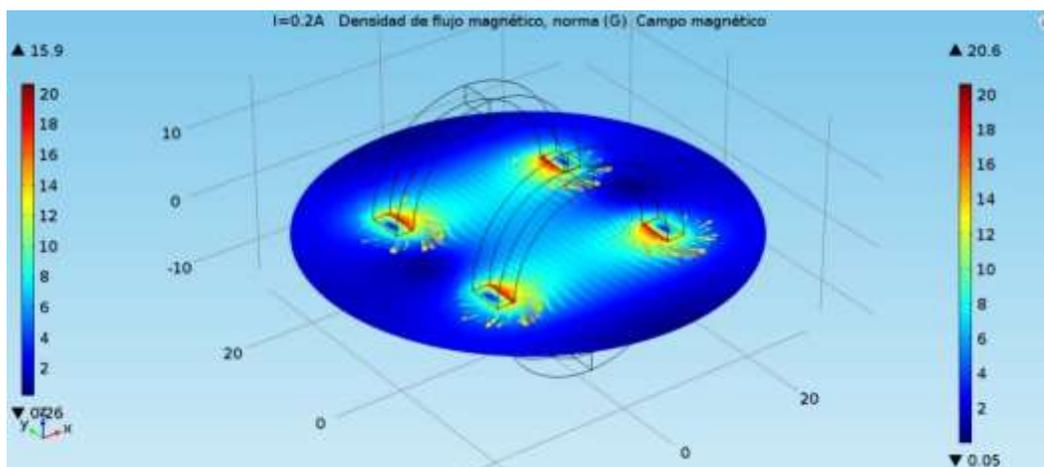


Figura 3.16 Simulación de campo magnético para $I=0.2$ Avista 3D.

En las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se muestran las simulaciones realizadas para una corriente en las bobinas de 1 A, cada uno de ellas vistas desde diferentes ángulos, el campo magnético en la coordenada 0,0,0 es de 30.052 Gauss

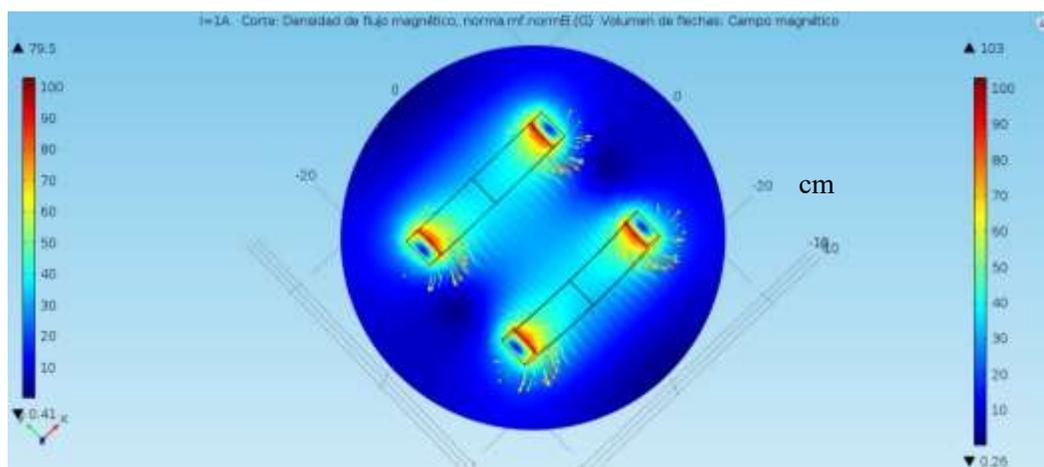


Figura 3.17 Simulación de campo magnético para $I=1$ A vista superior escalas iguales.

3.5 Resultado de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

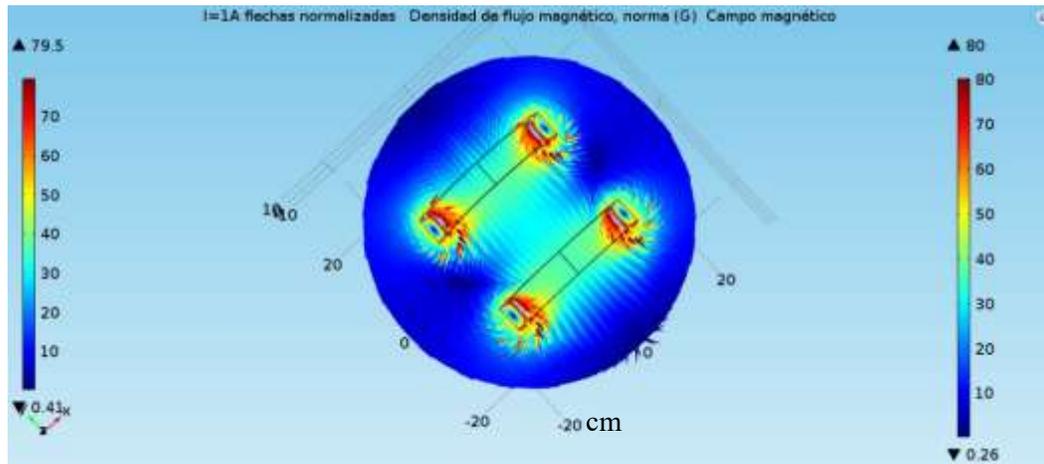


Figura 3.18 Simulación de campo magnético para $I=1$ A, vista superior flechas normalizadas.

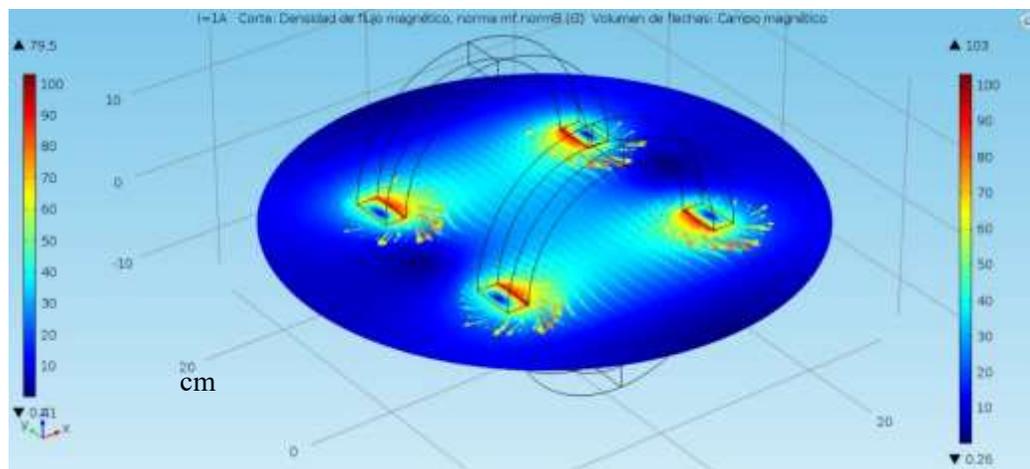


Figura 3.19 Simulación de campo magnético para $I=1$ A vista 3D.

Es difícil visualizar los pequeños cambios de campo magnético en la parte central de las bobinas debido a la escala de color por lo que se limitaron los valores a visualizar en dos simulaciones más que se realizaron con los siguientes valores:

3.5 Resultado de las simulaciones en COMSOL Multiphysics.

Para la figura 3.20 Los valores se limitaron de 5.9 a 6.1 Gauss, el volumen de flechas se mantiene igual, y para la figura 3.21 se limitaron los valores a 70 29.5 a 30.5 Gauss.

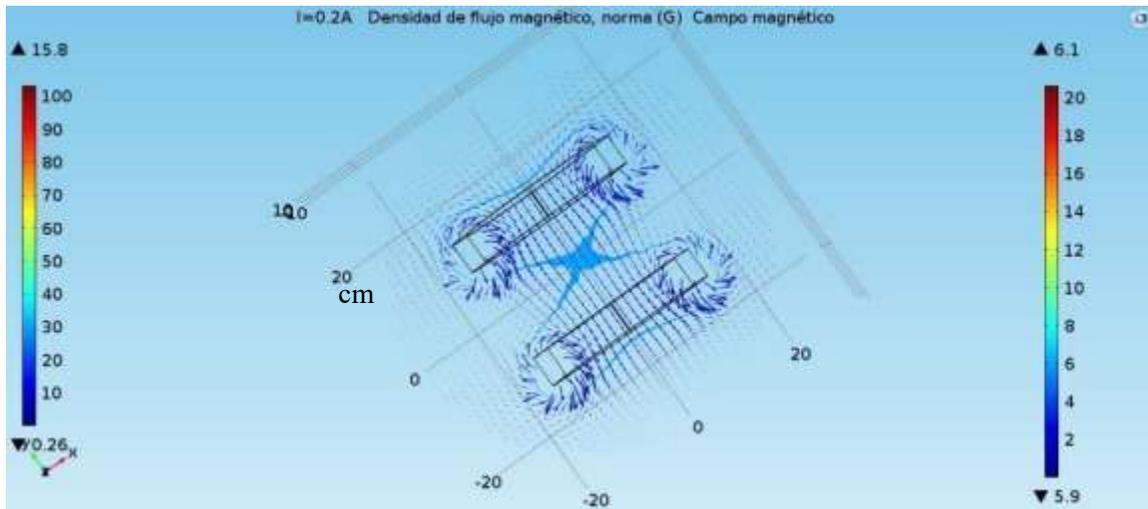


Figura 3.20 Campo magnético para $I=0.2$ A con valores limitados de 5.9 a 6.1 Gauss.

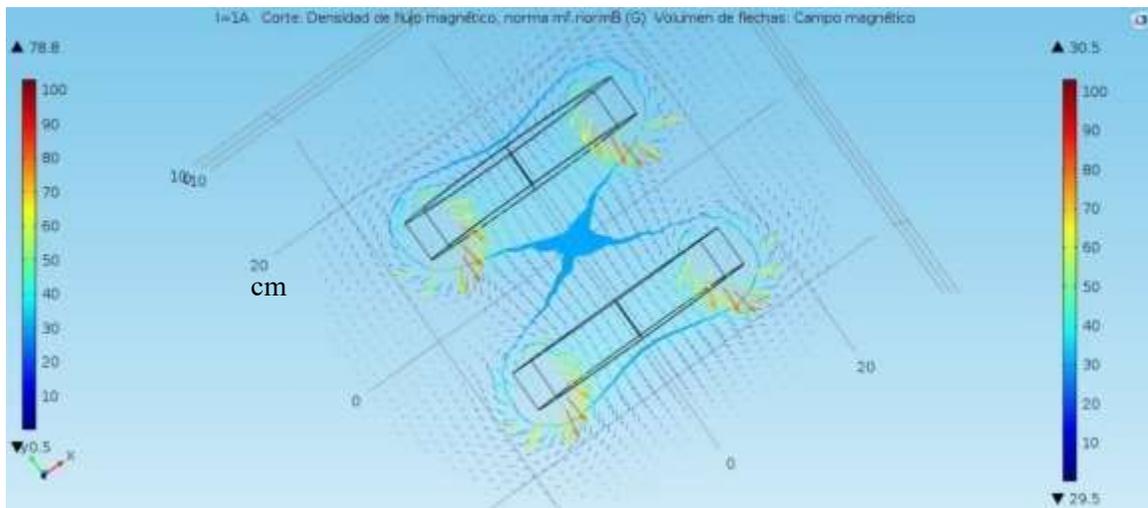


Figura 3.21 Campo magnético para $I=1$ A con valores limitados de 29.5 a 30.5 Gauss

La simulación tiene una gran resolución tomando en cuenta esto no tendríamos un valor de campo magnético homogéneo pues a cada coordenada corresponde un valor único de campo magnético tomando en cuenta las figuras 3.2 y 3.20 y comparándolas con los valores del sensor de MI se obtiene; 7.15 ± 0.5 Gauss y 38.76 ± 0.5 Gauss par el sensor de MI y con la simulación 6 ± 0.1 Gauss y 30 ± 0.5 Gauss para los mismos diámetros de esferas o área del plano de 0.5 cm y 1 cm respectivamente.

Capítulo 4.

Conclusiones.

Las mediciones de MI mostradas en este trabajo se realizaron con un par de bobinas de Helmholtz, se determinó la respuesta de campo magnético en las bobinas de Helmholtz respecto a la corriente o voltaje de alimentación de manera teórica y práctica, dado que la respuesta es lineal los resultados obtenidos se ajustaron a la ecuación de la recta obteniendo una función de campo magnético respecto a la alimentación eléctrica en las bobinas, estos resultados se presentan en el capítulo 3.1 y la ecuación obtenida es la ecuación 3.1, la cual se tomó como referencia para las mediciones siguientes.

En base a la caracterización del microhilo amorfo ultrasuave se determinó la frecuencia de trabajo idónea para la construcción del sensor de manera experimental, el valor de frecuencia propuesto fue 10 MHz debido a que a esta frecuencia se obtuvo la mayor variación de porcentaje de impedancia que fue mayor al 20%.

Otra razón muy importante por la que ese escogió la frecuencia de trabajo del sensor es que esta curva es la que se pudo observar con solo 2 picos pues en las demás mediciones se observaron más de 2 picos y no muy definidos, la parte de la curva utilizada para este sensor son los extremos de los picos de la curva de MI, esta parte de la curva debe ser lo más lineal posible respecto a todas las mediciones realizadas.

En la figura 3.5 se presenta el mayor porcentaje de cambio de impedancia que fue para 10 kHz con 20.9 %, comparándolo con 5.23 % obtenido a 200 kHz se obtuvo una mejor respuesta casi 4 veces mayor.

La caracterización en frecuencia fue limitada hasta los 20 MHz, frecuencia a la cual no se observó ninguna mejora en cuanto a porcentaje de MI por el contrario se observó un decremento hasta llegar a 13.79 % a 20 MHz, pero a futuro se podría realizar una caracterización llegando al límite de frecuencia dada por el analizador de impedancias que es hasta 500 MHz, lo cual implicaría rediseñar el portamuestras para que el principal aporte de impedancia sea dado por el microhilo y no por la línea de transmisión.

En cuanto al nuevo sensor de MI se analizó la etapa del oscilador y se decidió utilizar un oscilador basado en un oscilador de reloj con cristal debido a que un cristal de 10 MHz es comercial por lo tanto fácil de conseguir y barato, el amplificador operacional tuvo que ser seleccionado para alta frecuencia para poder trabajar a 10 MHz, lo cual fue el único inconveniente para la electrónica del sensor, la tarjeta electrónica no fue muy grande, tan solo unos 4 x 6 cm, se lograron mediciones de 3.8 a 94 Gauss con un rango de error de 0.1 Gauss, a pesar de que el sensor puede medir campos más pequeños en la parte central de la curva de MI, solo se reportan las curvas de respuesta pero no se profundizó más en ello, estas mediciones podrían ser de 0.5 a 3 Gauss pues es la parte de la curva que es más lineal.

En los objetivos se pone como meta obtener una respuesta de 2 a 200 Gauss, las limitaciones a la respuesta del sensor fueron definidas por la curva de respuesta mayormente y por otro lado el voltaje de la fuente de alimentación no nos permitió realizar mediciones con campos magnéticos más grandes, pero se observaron respuestas con campos magnéticos más grandes con imanes de neodimio pero debido a que no se realizó la caracterización con estos campos magnéticos más grandes, el ajuste máximo del sensor quedó en 94 Gauss, otro punto a tomar en cuenta es que a mayor campo magnético debido a la forma de la curva de respuesta se obtiene menor sensibilidad.

En base a las mediciones experimentales realizadas con el sensor de MI se determinó que se puede obtener una resolución de hasta 0.01 Gauss en las mediciones debido al voltímetro o tarjeta de adquisición de datos utilizados, esta es una buena noticia pero por hay que realizar mejoras en la etapa de electrónica pues por otro lado podemos tener un rango de error de hasta 0.5 Gauss en algunos casos debido al incremento de la temperatura en el amplificador operacional, para este caso se propone recalibrar el sensor antes de realizar cualquier medición o implementar un sistema de corrección por temperatura, podríamos decir que el sensor de MI construido tiene muy buena precisión pero hay que trabajar en la exactitud.

En la literatura se reportan sensores de MI con una sensibilidad de 100 nOe , que serían 100 nGauss, o 10 pT pero para mediciones de campos magnéticos muy pequeños los cuales trabajan en la búsqueda de realizar mediciones de campo magnético en el cerebro o poder sensor automóviles a algunos metros de distancia [35], definitivamente el microhilo amorfo tiene una sensibilidad muy grande pero la electrónica es la limitante a la resolución del sensor, para este trabajo la resolución de 10 mGauss es aceptable comparándolo con la punta Hall pero se puede seguir trabajando en mejorarlo.

Los resultados obtenidos con el sensor de MI alientan a seguir trabajando en el fenómeno de MI y en desarrollo nuevas propuestas de electrónica para este fenómeno.

En cuanto a la caracterización con la punta Hall podemos tomarlo como una buena comparación pero hay que tomar en cuenta que en algunas mediciones la respuesta de la punta hall tiene una resolución de 1.4 Gauss por lo que si tomáramos como referencia estas mediciones para determinar el área de campo magnético homogéneo en las bobinas de Helmholtz obtendríamos un volumen mayor de campo magnético homogéneo comparando con las mediciones realizadas con el sensor de MI, definitivamente para campos magnéticos pequeños en el orden de decenas de Gauss la punta Hall no es un muy buen sensor pero para campos magnéticos mayores a 400 Gauss si lo es pues a mayor campo magnético tiene menor error.

La simulación realizada en COMSOL es una muy buena referencia para saber qué es lo que está pasando con el campo magnético en las bobinas de Helmholtz, en las simulaciones se puede apreciar una muy buena resolución pero tomando en cuenta que es algo teórico sabemos que no necesariamente los resultados son iguales a la práctica y este caso no fue la excepción, tuvimos una discrepancia de entre 2 y 8 Gauss según las mediciones realizadas pero lo que cabe resaltar es que el mapeado obtenido es similar por lo que solo se pueden realizar comparaciones cualitativas en este caso.

Las diferencias entre el modelo teórico y el práctico lo podemos atribuir al alineamiento de las bobinas, la certeza del número de espiras en las bobinas, al rango de error en las mediciones de las dimensiones de las bobinas, el enrollamiento del alambre, la simulación no contempla la influencia del campo magnético terrestre, además que se espera que el diámetro del alambre sea homogéneo.

En la tabla 8 se presenta una comparación de los resultados obtenidos en este trabajo.

Tabla 8. Comparación de resultados teóricos y prácticos.

Campo magnético (Gauss) y radio de la esfera.							
I(A) en Bobina de Helmholtz	Ec. de ajuste lineal	Sensor MI		Punta Hall		Simulación	
		Gauss	cm.	Gauss	Cm	Gauss	cm
0.2 ± 0.0001	6.749	7.15 ± 0.5	1	8 ± 1.4	2	6 ± 0.1	1.3
1 ± 0.001	38.1	38.76 ± 0.5	0.5	37 ± 1.4	1	30 ± 0.5	1.3

En base a los resultados mostrados en la tabla podemos determinar que el volumen de campo magnético homogéneo en las bobinas de Helmholtz es relativo al rango de error que se quiera manejar pero podemos considerar fácilmente un volumen menor en una esfera con radio de 0.5 cm para mediciones del orden de unidades y decenas de Gauss, para mediciones menores tendríamos que reducir el volumen en las mediciones para tener un error menor, esta consideración debería tomarse en cuenta para caracterizar la parte central de curva de Magnetoimpedancia que maneja valores por debajo de 2 Gauss.

Referencias

- [1] M Vázquez, M. knobel, M. L. Sánchez, R Valenzuela, A.P Zhukov, «Sensors Actuators,» 1997.
- [2] K. Mohri, «Application of amorphous magnetic wires to computer peripherals,» *Materials Science and Engineering A—Structural Materials*, vol. 185, nº 1-2, pp. 141-145, 1994.
- [3] L. V. P. a. K. Mohri, «Magneto-impedance effect in amorphous,» *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, nº 9, pp. 1189-1191, 1994.
- [4] K. M. T. Y. T. U. a. L. P. S. T. Kanno, «Amorphous wire MI micro sensor using CMOS IC multivibrator,» *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, nº 5, pp. 3353-3360, 1997.
- [5] T. Uchiyama , K. Mohri , Life Fellow, IEEE, Y. Honkura , and L. V. Panina, «Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto-Impedance Sensor Based on Amorphous Wire CMOS IC MI Sensor,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, nº 11, pp. 3833-3839, 2012.
- [6] Rubén Pérez , « Departamento de Física Teórica de la Materia Condensada, Universidad Autónoma de Madrid.,» Madrid, España..
- [7] «<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17763201>.».
- [8] E. d. J. Alcañiz, «Magnetismo,» Universidad de Alcala, 1995-2000.
- [9] R. Pérez, «Universidad Autonoma de Madrid.,» 2010. [En línea]. Available: https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/ruben/FES/slides/magnetism_1_3_bw.pdf. [Último acceso: 5 Julio 2016].
- [10] B. W. D. Callister, *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*, Volume 2, Barcelona, España: Reverté, 2007.
- [11] F. Keffer, *Handbuch der physik*, New York: Springer, 1966.
- [12] Valentina Zhukova 1 , Mihail Ipatov 1 and Arcady Zhukov 1,2,, « Thin Magnetically Soft Wires for Magnetic Microsensors.,» de *Dpto. Física de Materiales, Facultad de Química.*, Paseo Manuel de Lardizabal, 3, 20018, San Sebastián, Spain.
- [13] T. d. d. u. s. d. d. A. M. Castrejón., «Tesis doctoral desarrollo de un sensor de detección de campo magnético usando el fenómeno de Magnetoimpedancia.,» de *UNAM*, México, DF., 2014.
- [14] Hans Hauser, Ludek Kraus, and Pavel Ripka, «Giant Magnetoimpedance Sensors.».
- [15] M. Vázquez, «Giant Magneto Impedance and Applications.,» Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid..
- [16] M. Vazquez, «Giant Magneto-impedance and applications,» de *Institute for Materials Scince, CSIC*, 28049, Madrid Spain..
- [17] Panina & Mohri, V.Kose y J. Sievert., *Non-linear Electromagnetic Systems: Advanced Techniques and Mathematical Methods*, Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokio, Washinton, DC: Ohmsha, 1994.
-

-
- [18] P. D. Son., «Principles and Applications of Magnetic Sensors.,» Dept. of Photonics and Sensors Hannam University , 2014.
- [19] «Aichi-steel,» [En línea]. Available: https://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/products/electromagnetic/mi_sensor/index.html. [Último acceso: 28 Mayo 2016].
- [20] L. M. E. Yáñez, «Instrumentación y Automatización en Mecánica y Mecatrónica.,» Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Escuela Politécnica del Ejército. ECUADOR - AMERICA DEL SUR..
- [21] «https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Josephson».
- [22] «<https://donapeaelsi.wikispaces.com/Magnetorresistencia>».
- [23] Xinhua Nie, Zhongming Pan , Dasha Zhang, Han Zhou, Min Chen, Wenna Zhang, «Energy Detection Based on Undecimated Discrete Wavelet Transform and Its Application in Magnetic Anomaly Detection,» *PLOS ONE*, 2014.
- [24] H.Guerrero,a) R.PérezdelReal, b) R.FernándezdeCaleya, c) andG.Rosa, «Magneticfield biasingin Faraday effect sensors,» Laboratorio de Instrumentacion Espacial (LINES), Division de Ciencias del Espacio, Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial (INTA)..
- [25] Nobuki Itoh, Hisashi Minemoto, Daisuke Ishiko, and Satoshi Ishizuka, «Small optical magnetic-field sensor that uses rare-earth iron garnet films based on the Faraday effect,» *Applied Optics*, vol. 38, n° 10, pp. 2047-2052, 1999.
- [26] Saleh and M.C Teich, Wiley., «Fundamentals of Photonics, 2nd edition,» 2007.
- [27] P. J. L. M. C. (joseluis.masa@uam.es), «Transmisión por Soporte Físico4º de Ingeniería de Telecomunicación,» de *Grupo de Radiofrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas (RFCAS)*.
- [28] Kaneo Mohri,1 Tsuyoshi Uchiyama,2 Larissa V. Panina,3, «Recent Advances of Amorphous Wire CMOS IC: Magneto-Impedance Sensors: Innovative High-Performance,» de *Hindawi Publishing Corporation*, Nagoya University, Japan, 2015.
- [29] Lei Zhang, Zhongming Pan and Xinhua Nie, «A novel signal detection method of giant magneto-impedance magnetic sensors,» de *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2012.
- [30] Walt Jung, Elsevier., «Op amp applications handbook,» 2005 Analog Devices..
- [31] «LEVITAÇÃO APLICADA,» [En línea]. Available: http://www.passo-a-passo.com/mec/3.2.1/08_avaliacao_frame.htmk. [Último acceso: 31 08 2016].
- [32] B. C. Sánchez., «Tesis de maestría Instrumentación y control de la técnica de Magnetoimpedancia para materiales ferromagnéticos suaves.,» UNAM, México DF., 2012.
- [33] Rafael R. Boix, Alberto Pérez Izquierdo y Francisco Medina., «Practica 2 Medida del campo magnético de Bobinas de Helmholtz y del campo magnético terrestre.».
- [34] Anh-Tuan LeEmail authorManh-Huong Phan, «Advanced Magnetic Microwires as Sensing Elements for LC-Resonant-Type Magnetoimpedance Sensors: A Comprehensive Review,» *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 25, pp. 181- 195, 2012.
-

- [35] Uchiyama, KMohri, Life Fellow, Y. Honkura, L.V. Panina, «Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto_Impedance Sensor Based on Amorphous Wire CMOS IC Sensor.,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, n° 11, pp. 3833- 3839, Noviembre 2012.
- [36] Young Friedman, Sears Zemansky., «Física universitaria con física moderna 12ª edición.,» de *Addison-Wesley, PEARSON.*
- [37] «http://www.anast.cl/detalle_productos1.html».
- [38] «wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Dominio_magn%C3%A9tico#/media/File:Dominios.png. [Último acceso: 9 05 2016].
- [39] D. M. L. P. K. M. Y. H. Serghei Sandacci, «Off- Diagonal Impedance in Amorphous Wires and Its Application to Linear Magnetic Sensors.,» *IEEE Transactions on magnetics.*, vol. 40, n° 6, pp. 3505-3511, 2004.
- [40] B. C. Sánchez, Instrumentacion y control de la tecnica de Magnetoimpedancia para materiales ferromagneticos suaves., Ciudad Universitaria: UNAM., 2012.