



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

“Estudio experimental de la optimización en el sensado de señales eléctricas débiles mediante resonancia estocástica magnética”

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización

Presenta:

Lic. Froylan Sergio Bello Olivos*

Directores:

Dra. Amparo Palomino Merino
Dr. Edmundo A. Gutiérrez
Dr. Pedro Javier García Ramírez

Puebla, México

Enero 2017

*BECARIO CONACYT

BUAP[®]

Agradecimientos

Agradezco a las siguientes instituciones y personas por su apoyo económico y académico para la ejecución de esta tesis:

Consejo nacional de ciencia y tecnología por su apoyo económico que me permitió cubrir mis gastos durante la maestría.

Benemérita universidad autónoma de Puebla.

Facultad de ciencias de la electrónica.

Maestría en ciencias de la electrónica opción automatización.

Instituto nacional de astrofísica, óptica y electrónica.

Dra. Olga Guadalupe Félix Beltrán coordinadora de la maestría en ciencias de la electrónica opción automatización.

Asesores: Dra. Amparo Palomino Merino, Dr. Edmundo A. Gutiérrez y Dr. Pedro Javier García Ramírez por compartir su tiempo, paciencia y conocimientos para la ejecución de esta tesis.

Sinodales: Dr. Sergio Vergara Limon, Dra. Ma. Aurora D. Vargas Treviño y Dr. David Eduardo Pinto Avendaño por sus observaciones y consejos académicos para el desarrollo adecuado de esta tesis.

Compañeros y profesores de la maestría en ciencias de la electrónica por su amistad, consejos académicos y personales.

Especialmente quiero agradecer a las personas más importantes de mi vida: a mi abuela Trinidad, a mis padres Ma. Elena y Guillermo, a mis hermanos Guillermo y Edgar, a todos mis cuñados y cuñadas, a mis suegros Romualdo y Cesarea, a mi esposa Patricia, a mis hijos Julio y Eduardo, por su enorme apoyo y afecto incondicional que me han otorgado siempre y que hoy me permite dar un paso importante en mi vida profesional.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi esposa Patricia, a mis hijos Julio y Eduardo, a mi madre Ma. Elena y a mis suegros Romualdo y Cesarea quienes siempre me han apoyado y acompañado tanto en la adversidad como en el éxito.

Resumen

La necesidad de desarrollar tecnología más avanzada trae consigo la necesidad de contar con nuevo equipo, dispositivos y hasta nuevas técnicas que permitan monitorear múltiples señales inherentes a esta nueva tecnología tanto para su construcción como para su funcionamiento. Este desarrollo tecnológico también ha ocasionado que los precios de los equipos y dispositivos aumente en su costo al ser más sofisticados, por lo que solo algunos laboratorios pueden tener acceso a ellos.

En esta tesis se presentan los primeros pasos del desarrollo de una nueva técnica que permite optimizar el sensado de señales electromagnéticas mediante la asistencia del ruido magnético. Este estudio experimental consiste en generar campos magnéticos en el rango de 0 a 200 μ T (microteslas) y de 0 a 4 Hz (Hertz) mediante bobinas, estudiar la convolución en el espacio de dos campos magnéticos con distinta amplitud, fase y frecuencia entre ellos y observar el fenómeno de resonancia estocástica magnética. También en este escrito se incluye el diseño de la bobinas generadoras de campo magnético, diseño de circuitos electrónicos utilizados para la estimulación eléctrica de las bobinas, montaje experimental, aislamiento del montaje experimental del ruido magnético del medio ambiente, la información técnica del equipo y los dispositivos más importantes y la presentación de mediciones y oscilogramas que muestran los primeros indicios de la factibilidad de utilizar la resonancia estocástica magnética como una herramienta de optimización.

Los resultados de este estudio experimental y su desarrollo fueron presentados en el segundo congreso iberoamericano de instrumentación y ciencias aplicadas en la ciudad de Guatemala, Guatemala y publicados en las memorias del congreso.

Índice

Agradecimientos	III
Dedicatoria	V
Resumen	VII
Índice.....	VIII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XVI
Introducción	XIX
Objetivo general	XXI
Objetivos particulares.....	XXI
1 Fundamentos del experimento.....	1
1.1 Teoría electromagnética.....	4
1.1.1 Ley de Biot Savart	4
1.1.2 Flujo magnético y densidad de flujo magnético.....	5
1.1.3 La fuerza de Lorentz	5
1.1.4 Efecto Hall	6
1.1.5 Ley de inducción de Faraday.....	6
1.1.6 La ley de Lenz	7
1.1.7 La inductancia.....	7
1.1.8 Propiedades magnéticas de la materia.....	8
1.2 Biomagnetismo y Magnetobiología	9
1.2.1 Magnetobiología	10
1.3 Interferencia	11
1.4 Bobinas o solenoides	11
1.5 Resonancia en serie.....	13
1.6 Ruido.....	15

1.6.1	Taxonomía del ruido	15
1.6.2	Matemáticas del ruido	17
1.7	Conclusiones	18
2	Resonancia estocástica.....	19
2.1	La relación señal a ruido.....	20
2.2	Conclusiones	21
3	Equipo y dispositivos utilizados.....	22
3.1	Sensor de densidad de flujo de campo magnético.	22
3.2	Caja de aislamiento o blindaje magnético.....	24
3.3	Bobinas o solenoides	24
3.3.1	Diseño y construcción de Bobinas	25
3.4	Estructura para la manipulación de bobinas.	27
3.5	Fuente de corriente constante.....	32
3.6	Circuito amplificador inversor de voltaje.....	34
3.7	Circuito desfasador de señal.	36
3.8	Conclusiones	37
4	Ejecución experimental.....	38
4.1	Caracterización del aislamiento magnético.	39
4.2	Caracterización de bobinas	41
4.2.1	Campo magnético	41
4.2.2	Inductancia de bobinas.....	42
4.3	Convolución de campos magnéticos.....	43
4.4	Resonancia estocástica magnética.....	45
4.5	Conclusiones	46
5.	Resultados experimentales.....	47
5.1	Caracterización de la caja de aislamiento.	47
5.2	Caracterización de bobinas	49
5.2.1	Inductancia.....	49

5.2.2 Campos magnéticos	49
5.3 Convolución de campos magnéticos.....	72
5.4 Resonancia estocástica magnética.....	77
5.5 Interpretación de resultados	79
Conclusiones	81
Recomendaciones para futuros estudio experimentales.....	82
Ruido electromagnético.....	82
Circuitos electrónicos	83
Fuente generadora de campo magnético	83
Blindaje magnético.....	84
Magnetómetro.....	84
Estructura de experimentación	85
Bibliografía	87
A. Presentación en congreso internacional	91
B. Artículo	92
C. Diseños	101
C.1 Diseño de carretes.....	101
C.2 Diseño del soporte.....	103

Índice de figuras

Figura 1.1: Diferentes tipos y formas de bobinas o solenoides con y sin núcleo.....	11
Figura 1.2: Parámetros necesarios para calcula la inductancia de una bobina. Todos los parámetros están en centímetros.....	12
Figura 1.3: Representación de una bobina y sus parámetros para determinar la densidad de flujo magnético en el punto P.....	13
Figura 1.4: Circuito resonante en serie.....	14
Figura 1.5: Ejemplo de Gráficas de ruido Gaussiano (a), ruido blanco uniforme (b) y ruido Rosa (c)	17
Figura 1.6: La Función de Densidad de probabilidad de un ruido (a) Gaussiano y un (b) Uniforme.....	18
Figura 2.1: Resonancia estocástica en un Pozo de potencial simétrico doble, (a) representación del pozo de potencial doble simétrico. Los mínimos del pozo de potencial se representan por $\pm xm$, el alto de la barrera se localiza en xb Ves el tamaño de la barrera del pozo de potencial que separa a los dos mínimos, (b) una adecuada dosis de ruido sincronizado con el movimiento de la partícula puede originar que cambie de un mínimo a otro.	20
Figura 2.2: Ejemplo de gráfica de SNR con comportamiento característico de resonancia estocástica magnética.	21
Figura 3.1: Sensor de campo magnético Mag-01 y Mag-01H.....	22
Figura 3.2: Punta de prueba axial del magnetómetro, las dimensiones están en milímetros.....	23
Figura 3.3: a) Caja de aislamiento magnético, hecha de 3 capas de mu- metal que tiene una permeabilidad de 60000 a 240000 lo que puede reducir el campo magnético de la tierra $\approx 5mT$ hasta $\approx 18nT$, b) desviación de las líneas de campo magnético.	24
Figura 3.4: Ejemplo de carrito diseñado en SolidWorks, construido con impresora 3D, con una pestaña que permite montar y retirar la bobina del soporte.....	26
Figura 3.5: Representación de la bobina, la punta de prueba del magnetómetro, líneas de campo magnético y los ejes de referencia.....	27
Figura 3.6: Diseño del soporte para las bobinas en SolidWorks	28

Figura 3.7: Representación de la posición del soporte dentro de la caja de aislamiento magnético y algunas de sus partes.....	29
Figura 3.8: Piezas b y c donde se montan las bobinas y la punta de prueba del magnetómetro.	30
Figura 3.9: Soporte de acrílico para introducir dos bobinas en la caja de aislamiento magnético y la punta de prueba del magnetómetro.	30
Figura 3.10: Soporte en el interior de la caja de aislamiento magnético con dos bobinas y punta de prueba.	31
Figura 3.11: Posición de las bobinas en el interior de la caja de aislamiento y la punta de prueba del magnetómetro cuando son montadas en el soporte.	31
Figura 3.12: Circuito electrónico convertidor de voltaje a corriente, también llamado amplificador de transconductancia o bomba de corriente Howland mejorado.	32
Figura 3.13 : Circuito electrónico bomba de corriente Howland mejorada de 0 a 500mA controlada por modulación de ancho de pulso para alimentar a las bobinas utilizado en el estudio experimental.....	35
Figura 3.14: Circuito amplificador inversor con etapa de salida B	36
Figura 3.15: Circuito electrónico pasa todo o cambiador de fase utilizado en el estudio de la convolución en el espacio de campos magnéticos variables en el tiempo.	37
Figura 4.1: Diagrama a bloques de la etapa de caracterización del campo magnético generado por las bobinas.	38
Figura 4.2: Diagrama a bloques de la etapa de convolución en el espacio de campos magnéticos desfasados.....	38
Figura 4.3: Diagrama a bloques de la etapa de convolución en el espacio de campos magnéticos con frecuencias diferentes entre ellos.	39
Figura 4.4: Diagrama a bloques de la etapa de observación del fenómeno de resonancia estocástica magnética.	39
Figura 4.5: Alineación los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la tierra.....	40
Figura 4.6: Representación del proceso de caracterización de la caja de aislamiento magnético.....	40

Figura 4.7: vista superior del arreglo experimental dentro de la caja de aislamiento para la caracterización de campos magnéticos de las bobinas.	42
Figura 4.8: Representación del arreglo experimental dentro de la caja de aislamiento para la observación de la convolución de campos magnéticos.	44
Figura 4.9: Arreglos experimentales de bobinas con polaridades opuestas y coincidentes.	44
Figura 4.10: Arreglo experimental para el estudio de resonancia estocástica magnética.	45
Figura 5.1: Densidad de flujo de campo magnético (B) en microteslas vs distancia en el interior de la caja de aislamiento magnético de uno de los orificios.	47
Figura 5.2: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 1 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.	50
Figura 5.3: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 2 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.	55
Figura 5.4: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 3 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.	60
Figura 5.5: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 4 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.	65
Figura 5.6: Gráfica de la densidad de flujo magnético de las bobinas vs diferentes intensidades de corriente.	71
Figura 5.7: Oscilogramas de: a) señal 1 de 612 mV pico a pico genera salida 1 de 181 μ T pico a pico, b) señal 2 de 1.91 V pico a pico genera salida 2 de 206 μ T pico a pico.	73
Figura 5.8: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos variantes en el tiempo, con frecuencia de 1 Hz y en fase.	74
Figura 5.9: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos con frecuencia de 1 Hz, desfase de 86.4 grados (izquierda) y 115.2 grados (derecha).	74

Figura 5.10: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos con frecuencia de 1 Hz, desfaseamiento de 144 grados (izquierda) y 172.8 grados (derecha).....	74
Figura 5.11: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 0.4 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.8 Hz.....	75
Figura 5.12: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 1.5 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 2.5 Hz.....	75
Figura 5.13: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 20 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.8 Hz.....	76
Figura 5.14: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 2 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.9 Hz.....	76
Figura 5.15: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.....	77
Figura 5.16: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.....	78
Figura 5.17: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.....	78
Figura C.1: Vista frontal de la pieza 1 del carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.....	101
Figura C.2: Vista frontal del conector para el carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.....	101
Figura C.3: Vista lateral de la pieza 1 del carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.....	102
Figura C.4: Vista lateral del conector para el carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.....	102
Figura C.5: Pieza 1 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.....	103
Figura C.6: Pieza 2 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.....	103

Figura C.7: Pieza 3 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.....	103
Figura C.8: Pieza 4 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.....	104
Figura C.9: Pieza 5 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.....	104
Figura C.10: Posición de las piezas que componen el soporte. La varilla hueca es de 9.5 mm. de diámetro y la varilla cuadrada es de 8 mm. X 8 mm.	105

Índice de tablas

Tabla 5.1: Caracterización de la densidad de flujo de campo magnético que se encuentra en el interior de la caja de aislamiento magnético.	48
Tabla 5.2: Características físicas de las bobinas empleadas en el estudio Experimental.....	49
Tabla 5.3: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1 para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	51
Tabla 5.4: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	52
Tabla 5.5: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	53
Tabla 5.6: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	54
Tabla 5.7: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	56
Tabla 5.8: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	57
Tabla 5.9: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	58
Tabla 5.10: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	59
Tabla 5.11: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.	61

Tabla 5.12: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.62

Tabla 5.13: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.63

Tabla 5.14: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.64

Tabla 5.15: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.66

Tabla 5.16: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.67

Tabla 5.17: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.68

Tabla 5.18: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.69

Tabla 5.19: Densidad de flujo magnético producido por la bobinas, para distintas intensidad de corriente constante.....70

Tabla 5.20: Densidad de flujo de campo magnético resultante de la convolución en el espacio de 2 campo variantes de 1 Hz y distintas fases entre sí y polaridad opuesta para las bobinas.72

Tabla 5.21: Densidad de flujo de campo magnético resultante de la convolución en el espacio de 2 campo variantes de 3 Hz y distintas fases entre sí y polaridad coincidente para las bobinas.....73

Introducción

La necesidad de sensar señales electromagnéticas de pequeña amplitud es un común denominador en diversas disciplinas. [1]El avance tecnológico en la fabricación de dispositivos semiconductores en cuanto al escalamiento de sus dimensiones, ha favorecido un incremento en el desempeño y complejidad de las funciones llevadas a cabo por un circuito integrado, así como también en su densidad. Pero al mismo tiempo ha dificultado las técnicas de caracterización eléctrica, resultando necesario incorporar también la aplicación y medición de campos magnéticos externos, o generados por el mismo circuito integrado. [2][3]Esto ha generado nuevos retos en áreas como la fabricación, caracterización y confiabilidad, ya que, los equipos de medición electromagnéticos junto con la configuración experimental requeridos para cumplir con tareas como:[4][5] medir la actividad eléctrica de los cuerpos biológicos y sus campos magnéticos relacionados o tareas como estudiar la influencia de los campos magnéticos en los parámetros predominantes en los transistores, en algunos casos son inexistentes, o bien su costo de adquisición es tan elevado que muy pocos laboratorios a nivel mundial pueden tener acceso a ellos.

Las necesidades mencionadas han motivado a desarrollar una nueva metodología que optimice el sensado de señales electromagnéticas mediante el uso de la resonancia estocástica magnética, es decir, una nueva metodología donde las señales electromagnéticas de interés sean expuestas a una intensidad controlada y determinada previamente de ruido magnético, con el propósito de producir el fenómeno de resonancia estocástica magnética y con esto extender la ventana de observación.

Debido al carácter novedoso de esta metodología, se presenta en este trabajo una primera aproximación experimental para determinar las condiciones para las cuales, la resonancia estocástica magnética puede ser utilizada como herramienta en la optimización del sensado de señales electromagnéticas débiles.

[6][7][8]El fenómeno de la resonancia estocástica (R.E). se presenta cuando a la señal de entrada de un sistema se le añade una señal de ruido externo o inherente al sistema, con la finalidad de amplificar su respuesta. Las condiciones para generar este fenómeno son que el sistema sea no lineal y la señal de entrada sea periódica y de subumbral. El cuantificador más aceptado para la R.E. se basa en la intensidad del pico de la relación señal a ruido del sistema.

Objetivo general

“Identificar los requerimientos que permitan determinar la factibilidad de utilizar la resonancia estocástica magnética como una herramienta de optimización del sensado de señales electromagnéticas de subumbral.”

Objetivos particulares

Revisar los fundamentos teóricos de la teoría electromagnética

Revisar los fundamentos teóricos de la técnica de resonancia estocástica eléctrica y magnética.

Revisar los fundamentos teóricos y técnicos para la construcción de bobinas o solenoides generadoras de campo magnético.

Diseñar, construir y caracterizar bobinas que generen campos magnéticos en el rango de 50 a 200 μT (microteslas) y con las dimensiones que permitan introducirlas en la cámara de aislamiento magnético.

Diseñar y construir estructuras que permitan montar las bobinas y manipular su posición espacial dentro y fuera de la caja de aislamiento magnético sin tener contacto directo por el usuario.

Diseñar y construir fuentes de corriente constante y variable para alimentar a las bobinas generadoras de campo magnético con una señal de ruido blanco y con una señal periódica no lineal.

Observar y registrar la convolución del campo magnético de 2 bobinas cuando ambas generan campos magnéticos variables periódicas de diferente fase y frecuencia.

Observar y registrar el fenómeno de Resonancia Estocástica Magnética.

Interpretar resultados.

Publicación de resultados.

Escritura de la tesis

A continuación se presenta un breve resumen de los capítulos en esta tesis:

1 Fundamentos del experimento: Este apartado se presenta el resumen de algunos artículos científicos que mencionan la observación y aplicación de la resonancia estocástica eléctrica y magnética. También se presenta la teoría científica necesaria para el desarrollo de esta tesis.

2 Resonancia estocástica: En este apartado se trata brevemente sobre el funcionamiento sobre el fenómeno de resonancia estocástica y la relación señal a ruido como herramienta de medición característica de la resonancia estocástica.

3 Equipo y dispositivos utilizados: En este capítulo se menciona el equipo y los dispositivos utilizados. Se mencionan sus características técnicas, funcionamiento y el diseño de algunos.

4 Ejecución experimental: En este apartado se describe detalladamente los pasos realizados en los procesos experimentales de caracterización, observación y medición de este trabajo.

5 Resultados experimentales: Aquí se presentan las tablas de mediciones, oscilogramas y gráficas obtenidas de los procesos experimentales.

6 Conclusiones: Esta etapa presenta las conclusiones generales obtenidas del análisis de las mediciones, observaciones y su contrastación con la teoría. También se presenta algunas recomendaciones para trabajos futuros.

1 Fundamentos del experimento.

La idea de que el ruido podía ayudar en lugar de destruir fue propuesta por primera vez en los trabajos de Benzi y Vulpiani [6] en estos trabajos se tomaba un modelo del clima de la tierra como un sistema no lineal biestable, para el cual el cambio periódico de la órbita de la tierra representaba una pequeña señal de entrada periódica débil, los mínimos del sistema eran representados por las temperaturas altas o muy bajas de la tierra y a las pequeñas variaciones climáticas producto del cambio de la órbita se les consideraba como el ruido del sistema, y que, una vez sumado a la entrada débil podía entrar en resonancia con la misma y así provocar que el sistema se quedara en un mínimo, presentando entonces el fenómeno de Resonancia Estocástica y que en este caso podría llevar al planeta a una era de hielo.

Desde el descubrimiento del fenómeno de Resonancia Estocástica (RE) han surgido una amplia cantidad de experimentos y observaciones sobre el fenómeno en distintas disciplinas. En [9] se presenta una observación de la Resonancia Estocástica aplicada a campos magnéticos, se utiliza una lámina delgada de ferrita granate como ejemplo de sistema biestable. En el cual se observa un pico en la magnetización del sistema que depende de la intensidad de las variaciones de ruido magnético.

En [10] también se estudia el fenómeno de Resonancia Estocástica aplicado a Campos magnéticos y que es llamado Resonancia Estocástica Magnética. En este caso el experimento muestra el alto potencial de la resonancia estocástica magnética para la detección y el estudio de diversos fenómenos de tunelaje cuántico proponiendo la aplicación de la

Resonancia Estocástica Magnética en el Microscopio de efecto túnel para la detección del estado individual de los átomos.

Debido a los resultados tan prometedores de la Resonancia Estocástica, se ha llamado la atención de otras disciplinas en las cuales se han desarrollado experimentos como en [11]. En este un campo eléctrico variante en el tiempo fue utilizado para entregar señal y ruido directamente a la red de neuronas de un cerebro mamífero. Como resultado se pudo observar resonancia estocástica en la respuesta de la red neuronal a una señal periódica.

La Resonancia Estocástica se consideraba solo para sistemas biestables, pero en [12] se ha mostrado que también es factible utilizar el fenómeno para sistemas triestables o multiestables.

En el campo de la Electrónica se han también desarrollado experimentos para observar el fenómeno y así poderlo aplicar en el desarrollo de mejores dispositivos, en [13], [14]y [15] se utilizan circuitos electrónicos que fungen el papel de sistemas no lineales para mostrar el desempeño de la Resonancia Estocástica Eléctrica y que como resultado muestran que puede ser factible utilizar el fenómeno para amplificar la señal de salida de los dispositivos y para ayudar a estabilizar a los sistemas.

La Resonancia Estocástica es un fenómeno relativamente nuevo y paradójico que se ha observado tanto en la naturaleza como en el laboratorio y para el cual se incrementa cada vez más el campo de posibles aplicaciones. Como ejemplo de algunas nuevas aplicaciones está la de utilizar la Resonancia Estocástica Magnética para caracterizar dispositivos electrónicos, y aunque se ha observado la Resonancia Estocástica Magnética en trabajos como [16], [17]y [18] nunca se ha utilizado al fenómeno para caracterizar dispositivos electrónicos que tienen como base de funcionamiento al campo magnético.

En cuanto al campo de caracterización de dispositivos en [18] se presenta la factibilidad de utilizar dispositivos semiconductores sensibles al campo magnético como sensores de campo magnético en dispositivos y otros fenómenos, estos sensores tienen como herramienta fundamental a la Fuerza de Lorentz. Sin embargo no se ha abordado la utilización de la Resonancia Estocástica Magnética para elevar la relación señal a ruido y así optimizar el sensado de señales de subumbral, sobre todo para dispositivos del orden de los nanómetros.

Por otro lado en [19]y[20]se hace mención sobre la interacción que existe entre los campos magnéticos y eléctricos y los cuerpos biológicos. En dichos trabajos se menciona la diferencia entre el término Biomagnetismo y Magnetobiología.

1.1 Teoría electromagnética

1.1.1 Ley de Biot Savart

La fuente de un campo magnético estable puede ser un imán permanente, un campo eléctrico que cambia linealmente con el tiempo o una corriente directa [21].

Si se toma un elemento diferencial de corriente directa en el espacio libre que produce un campo magnético, a estos elementos diferenciales de corriente se pueden considerar como pequeñas secciones de filamento conductor portador de corriente, donde el filamento es el caso límite de un conductor cilíndrico de sección transversal circular conforme el radio se aproxima a cero [21].

Si se supone una corriente I que fluye en un diferencial de longitud vectorial $d\mathbf{L}$ del filamento. La ley de Biot Savart (1.1) establece que en cualquier punto P la magnitud de la intensidad de campo magnético que produce el elemento diferencial es proporcional al producto de la corriente, la magnitud del diferencial de longitud y el seno del ángulo α formado entre el filamento y la línea que lo conecta con el punto P en donde se busca el campo. La magnitud del campo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde el elemento diferencial hasta el punto P. La dirección de la intensidad de campo magnético es normal al plano que contiene el elemento diferencial y a la línea dibujada desde el filamento hasta el punto P.[21]

Las unidades de la intensidad de campo magnético \mathbf{H} son amperes por metro(A/m).

$$dH = \frac{Idl \operatorname{sen}\alpha}{R^2} \quad (1.1)$$

De la definición de producto cruz se desprende fácilmente la conveniencia de expresar la ecuación (1.1) en forma vectorial en (1.2).

$$d\mathbf{H} = \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{Id\mathbf{L} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (1.2)$$

Donde $\mathbf{R} = |\mathbf{R}|$ y $\mathbf{a}_R = \mathbf{R}/R$

1.1.2 Flujo magnético y densidad de flujo magnético.

En el espacio libre, la densidad de flujo magnético \mathbf{B} se define como:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1.3)$$

Donde \mathbf{B} se mide en webers por metro cuadrado (Wb/m^2) o en una nueva unidad adoptada en el Sistema internacional de Unidades, el tesla (T). Una unidad más antigua que con frecuencia se utiliza para la densidad de flujo magnético es el gauss (G), donde $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$ ($1 \text{ Wb/m}^2 = 10^4 \text{ G}$). [22][23] La constante μ_0 es la permeabilidad y tiene unidades de (Tm/A), para el espacio libre es de:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A} \quad (1.4)$$

Si \mathbf{B} se mide en teslas o webers por metro cuadrado, entonces el flujo magnético (1.5) se debe medir en webers (Wb). Se representa al flujo magnético por Φ y se definirá como el flujo que pasa por cualquier área escogida (diferencial de Superficie dS).

$$\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (Wb) \quad (1.5)$$

El flujo magnético es una medida del número de líneas de campo que pasan a través de una superficie.

1.1.3 La fuerza de Lorentz

Si tanto un campo eléctrico \mathbf{E} como un campo magnético \mathbf{B} actúan sobre una partícula cargada q con velocidad \mathbf{v} , la fuerza total \mathbf{F} sobre ella puede expresarse como:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1.6)$$

La fuerza de Lorentz es simplemente la suma de las fuerzas eléctrica y magnética que puede actuar simultáneamente sobre una partícula cargada. La parte eléctrica de esta fuerza actúa sobre cualquier partícula cargada, ya sea que esté en reposo o en movimiento; la parte

magnética actúa únicamente sobre partículas cargadas en movimiento [21][24].

1.1.4 Efecto Hall

En 1879, Edwin H. Hall llevó a cabo un experimento que permitió la medición directa del signo y la densidad del número (número por unidad de volumen) de los portadores de carga en un conductor. El efecto Hall desempeña un papel crítico en nuestra comprensión de la conducción eléctrica en los metales y semiconductores.

Consideremos una cinta plana de material de ancho w por la cual fluye una corriente \mathbf{I} . La dirección de la corriente \mathbf{I} es la convencional, opuesta al movimiento de los electrones. Se crea un campo magnético uniforme \mathbf{B} perpendicular al plano de la cinta, como al situar la cinta entre los polos de un electroimán. Los portadores de carga experimentan una fuerza magnética de desviación que los dirige a la parte derecha de la cinta.

Se acumula carga a lo largo del lado derecho de la cinta, y se crea una deficiencia de carga del lado izquierdo, lo cual constituye el efecto Hall, produce un campo Eléctrico \mathbf{E} en la cinta. En forma equivalente, existe a lo largo de la cinta una diferencia de potencial llamada la diferencia de potencial Hall (o voltaje de Hall) [21].

1.1.5 Ley de inducción de Faraday

La fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito [21][24].

$$fem = \frac{d_B}{dt} \quad (1.7)$$

Si la cantidad de cambio de flujo está en unidades de webers por segundo, la fem tiene unidades de volts. Si se considera una bobina de N vueltas, entonces aparece una fem inducida en cada vuelta, y la fem inducida total en el circuito es la suma de los valores individuales. Si la bobina está tan apretada que puede considerarse que cada vuelta ocupa

la misma región del espacio y por lo tanto experimenta el mismo cambio de flujo, entonces la *fem* inducida total es:

$$fem = N \frac{d \Phi_B}{dt} \quad (1.8)$$

1.1.6 La ley de Lenz

En un circuito conductor cerrado la corriente inducida aparece en una dirección tal que esta se opone al cambio que la produce.

El signo menos de la ley de Faraday indica esta opción. La corriente inducida se opone a este cambio creando un campo que tiende a oponerse al aumento de flujo causado por el imán en movimiento [21][22].

1.1.7 La inductancia

La inductancia L de un elemento de circuito (como un solenoide) se define como:

$$fem_L = L \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

En donde todas las cantidades se consideran magnitudes. Esta ecuación se basa en la ley de Farady, afirma que una corriente variable en el tiempo por el inductor genera una fem_L a través del inductor, y que la fem_L es proporcional a la velocidad de variación de la corriente. La constante de proporcionalidad L es la inductancia y se considera siempre una cantidad positiva, la unidad en el SI es el volt*segundo /ampere, a esta combinación de unidades se la ha dado el nombre de Henry de modo que 1 Henry= 1 volt* segundo / ampere.

La inductancia es la razón del total de eslabonamiento de flujo entre la corriente a la cual rodean los eslabones de flujo.

$$L = \frac{N \Phi_B}{I} \quad (1.10)$$

donde N es el número de eslabonamientos, Φ es el flujo magnético e I es la corriente[22].

1.1.8 Propiedades magnéticas de la materia

La susceptibilidad magnética χ_m o la permeabilidad relativa μ_r permiten clasificar a los materiales de acuerdo con sus propiedades o comportamiento magnéticos. Un material es no magnético si $\chi_m = 0$ ($\mu_r \approx 1$); de lo contrario, es magnético. El vacío, el aire y los materiales con $\chi_m = 0$ ($\mu_r \approx 1$) son no magnéticos [22][23][24].

1.1.8.1 Paramagnetismo

El paramagnetismo ocurre en materiales cuyos átomos tienen momentos dipolares magnéticos permanentes. En la muestra de un material paramagnético que no tenga aplicado un campo, los momentos dipolares atómicos están inicialmente orientados al azar en el espacio. La magnetización, es cero porque las direcciones al azar de los momentos dipolares provocan que la suma vectorial se anule.

Cuando se aplica al material un campo magnético externo, los dipolos tienden a alinearse con el campo, el campo dentro del material tienen ahora dos componentes: el campo aplicado y el campo inducido, al estar alineados los dipolos aumentan el valor del campo aplicado.

El movimiento térmico de los átomos tiende a perturbar el alineamiento de los dipolos, y en consecuencia la magnetización disminuye al aumentar la temperatura.

Cuando la magnetización alcanza su valor de saturación, los aumentos en el campo aplicado no tienen ya efecto sobre la magnetización.

Cuando el campo magnético externo se suprime de una muestra paramagnética, el movimiento térmico causa que las direcciones de los momentos dipolares magnéticos se distribuyan de nuevo al azar. [24]

1.1.8.2 Diamagnetismo

El diamagnetismo se presenta en todos los materiales. Sin embargo, es un efecto mucho más débil que el paramagnetismo y, por lo tanto,

puede observarse más fácilmente sólo en materiales que no sean paramagnéticos.

En los materiales diamagnéticos, los átomos que no tienen momentos dipolares magnéticos permanentes adquieren momentos dipolares inducidos cuando están situados dentro de un campo magnético externo.

El diamagnetismo es análogo al efecto de los campos eléctricos inducidos en la electrostática. Un trozo de material no cargado, como el papel, es atraído hacia una barra cargada de cualquier polaridad, de modo, que en un material diamagnético, la magnetización se opone al cambio aplicado[21][24].

1.1.8.3 Ferromagnetismo

El ferromagnetismo, al igual que el paramagnetismo, se presenta en materiales en los que los átomos tienen momentos dipolares magnéticos permanentes, pero en este tipo de material existe una fuerte interacción entre los momentos dipolares atómicos vecinos incluso cuando se suprime el campo magnético externo.

El acrecentamiento del campo aplicado es considerable en los ferroimanes, En un ferroimán, el campo magnético total puede ser de 10^3 a 10^4 veces el campo aplicado, pero, en estos materiales la magnetización y el campo no aumentan de manera lineal, ya que presentan un comportamiento de histéresis en la magnetización [21][24].

1.2 Biomagnetismo y Magnetobiología

El biomagnetismo es un método de diagnóstico y no una terapia. No sirve para curar, sino para diagnosticar. Las funciones cerebrales y cardíacas están relacionadas con la presencia de corrientes eléctricas muy débiles, que van acompañadas de campos eléctricos y magnéticos. Cuando las corrientes son variables o pulsantes, los campos se encuentran en forma de radiación electromagnética: ondas invisibles formadas por la interacción de los campos eléctrico y magnético que se transforman uno en otro continuamente y se propagan en todas

direcciones. La componente eléctrica se puede medir con electrodos colocados en la piel; se llega así al electrocardiograma y al electroencefalograma, de uso corriente en el diagnóstico médico.

El biomagnetismo trata de las mediciones de la componente magnética asociada a estas corrientes. En este caso no se utilizan electrodos, sino un magnetómetro SQUID (del inglés Superconducting Quantum Interference Device), instrumento capaz de medir campos magnéticos increíblemente pequeños, de intensidad 100 millones de veces menor que el campo magnético terrestre [19][20].

1.2.1 Magnetobiología

En los últimos 20 años han aparecido múltiples informes describiendo el hallazgo de pequeñas cantidades de óxido ferroso-férrico Fe_3O_4 , conocido vulgarmente como magnetita o imán natural, en el organismo de diversos animales; bacterias, anguilas, palomas y delfines, entre otros. Y se especula si estos animales utilizan el campo magnético de la tierra como una especie de brújula interna, que les sirve de orientación para desplazarse en su medio ambiente. El menor organismo donde se ha comprobado la existencia de una capacidad de orientación en la dirección del campo magnético es el *aquaspirillum magnetotacticum* o bacteria magnetotáctica. Estas bacterias fueron descubiertas en 1975 por Richard P. Blakemore, quien notó que algunas de las bacterias que él observaba al microscopio siempre se movían hacia el mismo lado de su campo visual.

Cuando colocaba un imán cerca del portamuestras, las bacterias se movían hacia el polo norte del imán; las bacterias muertas también se orientaban en la misma dirección pero, desde luego, no se trasladaban al igual que las vivas. Blakemore encontró que estas bacterias son capaces de orientarse y viajar a lo largo de la dirección del campo porque tienen en su seno pequeñas partículas o magnetosomas compuestas esencialmente de magnetita; cada partícula es un pequeño imán permanente con su polo norte y su polo sur [19][20].

1.3 Interferencia

Cuando dos ondas por lo demás idénticas que proceden de dos fuentes se traslapan en un punto en el espacio, la intensidad de la onda combinada en ese punto puede ser mayor o menor que la intensidad de cualquiera de las dos ondas. a este efectos se le llama interferencia. La interferencia puede ser o bien constructiva, cuando la intensidad neta es mayor que las intensidades individuales, o destructiva, cuando la intensidad neta es menor que las intensidades individuales [21].

1.4 Bobinas o solenoides

Una bobina o solenoide o inductor es un enrollado de alambre largo alrededor de un cilindro bobina. Este artefacto sirve para aumentar la corriente que provoca el campo magnético y en su caso incrementar también el “número” de circuitos vecinos en los cuales inducirse la tensión de Farady. El resultado de este efecto doble es que la inductancia de una bobina es casi proporcional al cuadrado del número de vueltas completas que efectúa el conductor y de las cuales está formado. En la Figura 1.1 se puede observar algunos distintos tipos y formas de bobinas o solenoides [21][22].



Figura 1.1: Diferentes tipos y formas de bobinas o solenoides con y sin núcleo.

La inductancia de un solenoide o bobinas de una sola capa es:

$$L = \mu_0 n^2 l A \quad (1.11)$$

En donde n es el número de espiras por unidad de longitud, l es la longitud de la bobinas, A área de sección trasversal y μ_0 es la permeabilidad en el espacio libre.

[25][26]Es muy importante señalar que las fórmulas para determinar la inductancia de una bobina o inductor son puramente empíricas, ya que la inductancia solo depende de las propiedades físicas de la bobina, entre las que se encuentran sus dimensiones y hasta la forma en la que se enreda el alambre, pero existen fórmulas como (1.12) que se acercan mucho al valor experimental.

$$L = \frac{0.8a^2N^2}{6a + 9l + 10c} [\mu H] \quad (1.12)$$

Donde a , l , c están en centímetros (cm) y N representa el número total de vueltas .En la Figura 1.2 representan las siguientes magnitudes

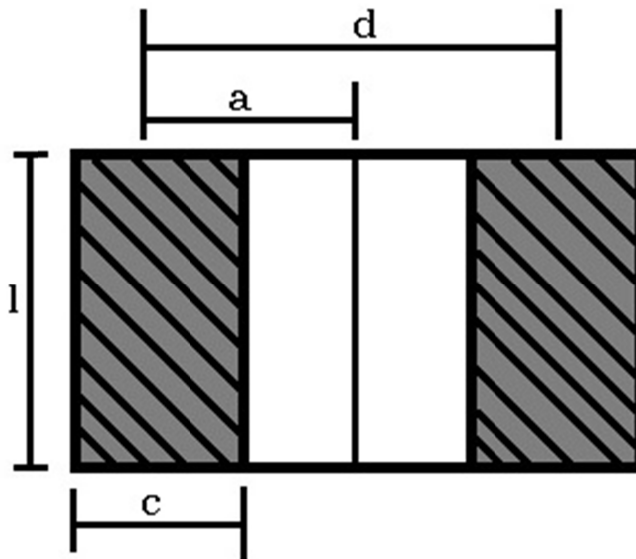


Figura 1.2: Parámetros necesarios para calcula la inductancia de una bobina. Todos los parámetros están en centímetros.

La densidad de flujo magnético en el centro del inductor de una sola capa es:

$$B_L = \frac{Inl\mu_0}{2[a^2 + l^2/4]^{1/2}} \quad (1.13)$$

En donde l es la longitud de la bobina, a es el radio, I corriente, n es el número de espiras por longitud y μ_0 es la permeabilidad en el espacio libre.

A continuación se presenta una fórmula propuesta para determinar la densidad de flujo magnético de una bobina multicapa B_l , en cualquier punto P sobre el eje Z de la bobina o solenoide, los parámetros se muestra en Figura 1.3.

$$B_l = \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i=0}^{v-1} \frac{\mu_0 I \rho^2}{2[\rho^2 + z_d^2]^{3/2}} \quad (1.14)$$

En donde $\rho = [R + (jr)]$, $z_d = [z_d - (id)]$, con R como el radio menor de la bobina, r separación entre capas, d separación entre vueltas y z_d como la distancia del origen del sistema a el punto P.

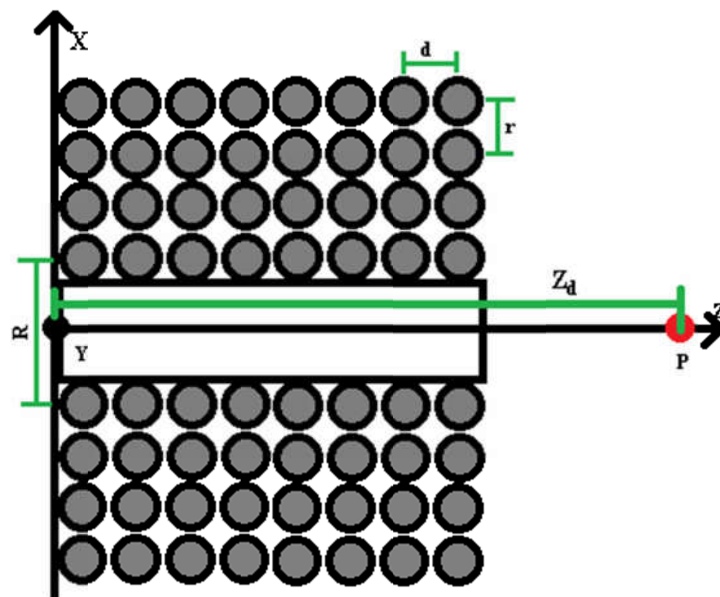


Figura 1.3: Representación de una bobina y sus parámetros para determinar la densidad de flujo magnético en el punto P.

1.5 Resonancia en serie

Un circuito resonante en serie o en paralelo debe tener un elemento reactivo y un elemento capacitivo. Siempre habrá un elemento resistivo debido a la resistencia interna de la fuente R_f , la resistencia interna del

inductor R_l y cualquier resistencia que se haya agregado para controlar la forma de la curva de respuesta $R_{diseño}$. La configuración básica del circuito resonante en serie aparece en la con los elementos resistivos antes mencionados [27][28].

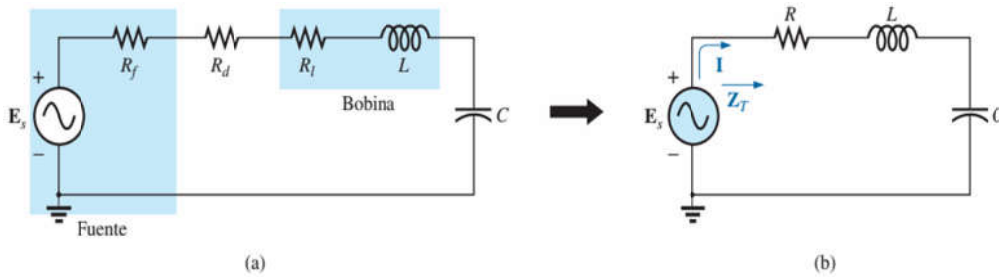


Figura 1.4: Circuito resonante en serie

La Figura 1.4b muestra una versión resumida si consideramos lo siguiente:

$$R = R_f + R_l + R_d \quad (1.15)$$

La impedancia total de esta red a cualquier frecuencia está determinada por:

$$Z_T = R + jX_L \quad jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (1.16)$$

Donde $X_L = \omega L$ es la reactancia inductiva, es la oposición al flujo de corriente, la cual produce el intercambio continuo de energía entre la fuente y el campo magnético. $X_C = \frac{1}{\omega C}$ es la reactancia capacitiva, es la oposición al flujo de carga, lo que resulta en el intercambio continuo de energía entre la fuente y el campo eléctrico del capacitor. La reactancia inductiva como capacitiva se miden en ohms y están directamente relacionada con el producto de la velocidad angular ω , la inductancia L y capacitancia C respectivamente.

La condición resonante ocurre cuando

$$X_L = X_C \quad (1.17)$$

Al quitar el elemento reactivo de la ecuación de impedancia total. Entonces la impedancia total en resonancia es:

$$Z_{T_s} = R \quad (1.18)$$

Y que representa el valor mínimo de Z_T a cualquier frecuencia. El subíndice s se utiliza para indicar condiciones resonantes en serie.

La frecuencia resonante se determina en función de la inductancia y capacitancia, al examinar la ecuación definitoria de resonancia, ecuación (1.17).

Sustituyendo obtenemos:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad y \quad \omega^2 = \frac{1}{LC} \quad y \quad \omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.19)$$

o también la podemos expresar como:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.20)$$

donde f = hertz (Hz), L = henries (H), C = farads (F)

La corriente que fluye a través del circuito en resonancia es

$$I = \frac{E \angle 0^\circ}{R \angle 0^\circ} = \frac{E}{R} \angle 0^\circ \quad (1.21)$$

1.6 Ruido

Cuando los sistemas son forzados a usar un tipo de señal de entrada, generalmente se desea que la señal de salida dependa exclusivamente de la señal de entrada y de las propiedades estructurales del sistema. Desafortunadamente la salida en los sistemas reales depende de un número de fuentes indeseables que pueden ser inherentes o externas al sistema: el correspondiente efecto en la señal de salida es conocido como ruido [29][30].

1.6.1 Taxonomía del ruido

El ruido viene en un número diferente de formas que influyen tanto a la vida diaria como a los experimentos en los laboratorios, por lo que el ruido se ha clasificado de muchas formas: ruido acústico, térmico, y eléctrico por mencionar algunos ejemplos. El tráfico urbano es

considerado como una causa de ruido porque este produce señales acústicas que interfieren con la calidad de vida. Una señal de interferencia de radio es ruido porque cubre las noticias que nos interesan. Los transistores son afectados por señales de ruido que tienen un bajo límite de resolución de medición de dispositivos.

El ruido generalmente no es bienvenido porque limita el rendimiento del sistema, por lo que se han desarrollado filtros, compensación de retroalimentación, etc., para tratar satisfactoriamente al ruido elevando el costo y la complejidad de los sistemas.

A fin de limitar los efectos negativos del ruido y para explicar su presencia se ha desarrollado aproximaciones, basadas en la naturaleza misma del ruido. Aunque el ruido es impredecible y no determinístico se han encontrado algunas características que han permitido clasificarlo en diferentes tipos.

Incluso un simple componente eléctrico como un resistor produce una señal de ruido que en gran parte se debe a las fluctuaciones térmicas de los electrones en el cuerpo del dispositivo y que dan origen a un tipo común de ruido llamado ruido térmico o ruido Johnson y es una forma de ruido blanco si tomamos en cuenta su Densidad Espectral que tiene forma plana.

Un gran conjunto de muy diferentes fenómenos en la naturaleza, como las fluctuaciones de resistencia en los semiconductores, la actividad eléctrica en el corazón, el nivel de insulina en los diabéticos, etc. Produce una cantidad diferente de señal de ruido, que es conocida como ruido rosa o $1/f$ ruido.

Otras formas de ruido han sido introducidas en diferentes campos, como es el ruido popcorn y el ruido Schottky que afecta a los circuitos integrados, en la Figura 1.5 se muestran algunos ejemplos de ruidos que no pueden ser distinguidos con facilidad. Estos ejemplos y los anteriores muestran que la taxonomía del ruido puede ser obtenida si se considera el contenido de frecuencia [29][30].

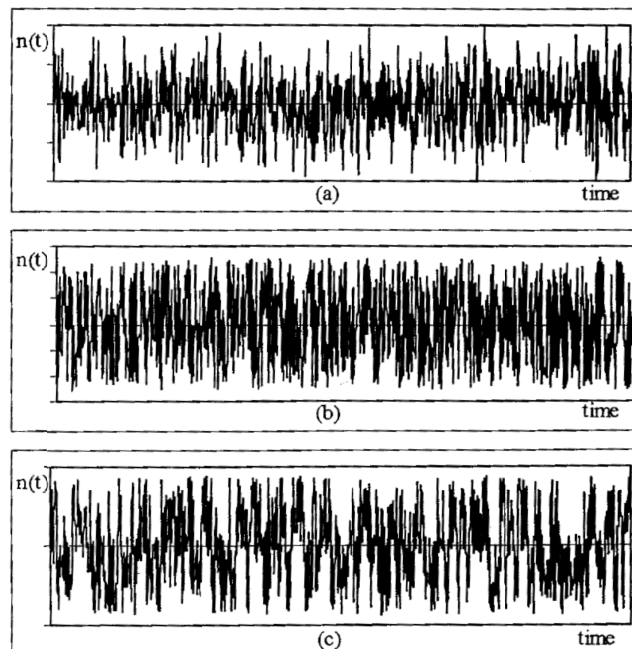


Figura 1.5: Ejemplo de Gráficas de ruido Gaussiano (a), ruido blanco uniforme (b) y ruido Rosa (c)

1.6.2 Matemáticas del ruido

En la Figura 1.5 se muestra 3 tipos diferentes de ruido, para los cuales es difícil establecer qué tipo de ruido es cada uno, a no ser que se haga algún tipo de análisis.

La naturaleza aleatoria del ruido sugiere que el análisis estadístico es la aproximación correcta para poderlo predecir. Los métodos más comunes involucran la descripción de la magnitud de la señal o la rapidez del cambio de la señal.

Entre los parámetros o herramientas más importantes para describir al ruido se encuentra la probabilidad, la función de densidad de probabilidad (FDP), la función de Autocorrelación (FAC) y el espectro de densidad de potencia (EDP), un ejemplo de la utilidad de estas herramientas se muestra en la Figura 1.6 donde se ve claramente la diferencia entre los tipos de ruido [29][30].

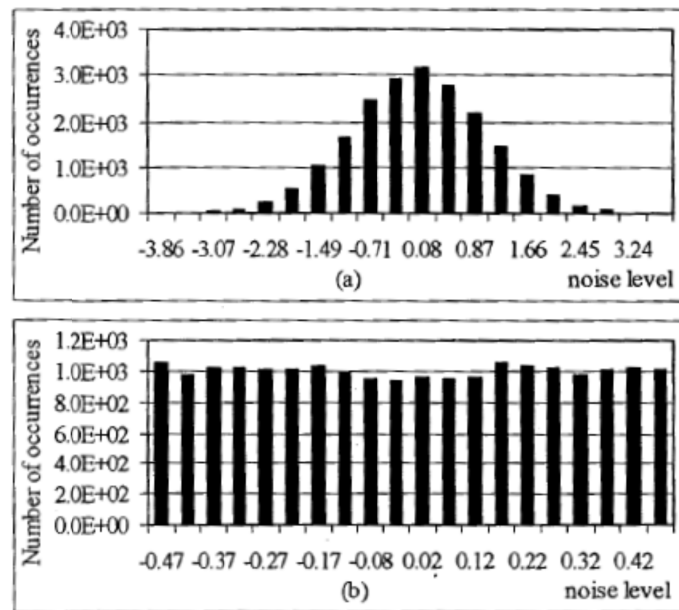


Figura 1.6: La Función de Densidad de probabilidad de un ruido (a) Gaussiano y un (b) Uniforme

1.7 Conclusiones

En este capítulo se presentó la teoría fundamental que nos permite desarrollar este experimento, validar las mediciones, explicar las observaciones y apoyar las conclusiones de este trabajo.

2 Resonancia estocástica

El término se ha dado al fenómeno que se manifiesta en sistemas no lineales por el cual generalmente una señal débil en la entrada del sistema es amplificada y optimizada por asistencia del ruido. Este fenómeno requiere de tres ingredientes básicos: una barrera de activación energética o más generalmente llamada una forma de umbral, una señal débil en la entrada del sistema y una fuente de ruido inherente al sistema o que pueda ser añadida a la señal débil. La idea de que el ruido ayude en lugar de destruir ha generado gran interés en campos de la física, química, ciencias biomédicas e ingeniería entre otras.

El mecanismo de la Resonancia Estocástica se explica brevemente a continuación (ver Figura 2.1):

Considere una partícula moviéndose en un pozo de potencial simétrico doble. Los mínimos del pozo de potencial se representan por $\pm x_m$, el alto de la barrera se localiza en x_b y V es el tamaño de la barrera del pozo de potencial que separa a los dos mínimos. Si aplicamos una pequeña fuerza periódica a la partícula, el pozo de potencial simétrico doble se inclinara asimétricamente de arriba abajo como se muestra en la Figura 2.1, aunque la fuerza periódica aplicada no es suficiente para que la partícula cambie de un potencial a otro, pero si se induce una adecuada y pequeña señal de ruido que se sincronice con la fuerza periódica se creara la suficiente fuerza para que la partícula cambie de un potencial a otro dando lugar al fenómeno de resonancia estocástica [6][7][29].

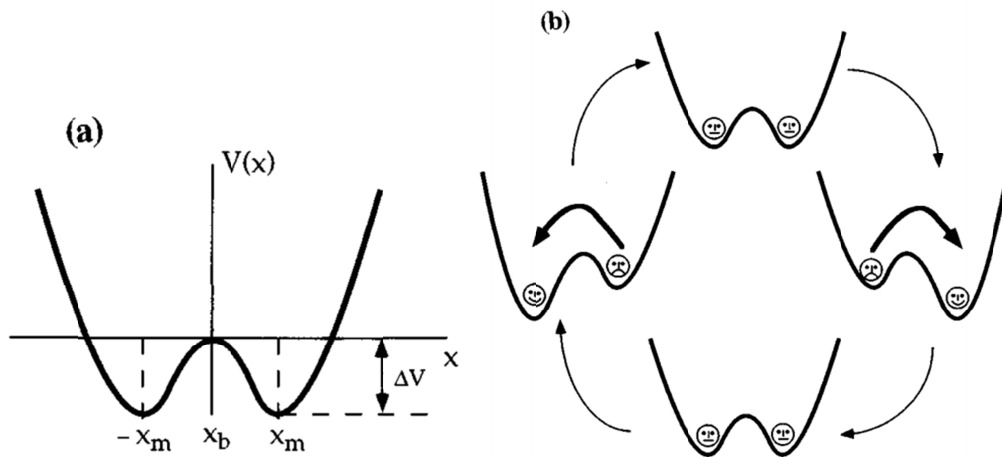


Figura 2.1: Resonancia estocástica en un Pozo de potencial simétrico doble, (a) representación del pozo de potencial doble simétrico. Los mínimos del pozo de potencial se representan por $\pm x_m$, el alto de la barrera se localiza en x_b y el tamaño de la barrera del pozo de potencial que separa a los dos mínimos, (b) una adecuada dosis de ruido sincronizado con el movimiento de la partícula puede originar que cambie de un mínimo a otro.

2.1 La relación señal a ruido

La Relación Señal a Ruido es una medida usada para comparar el nivel de la señal de entrada con el nivel de ruido del sistema, donde una relación mayor de 1 indica que hay más señal de entrada que ruido en el sistema.

Ya que la entrada es una señal periódica, la Relación Señal a Ruido SNR (por sus siglas en inglés), es la medición natural que se debe tomar para determinar si la señal de salida está reflejando la periodicidad de la entrada de una buena forma. Por ello se define de la siguiente manera:

$$SNR = \frac{p(\omega_0)}{S_n} \quad (2.1)$$

Donde $p(\omega_0)$ es la densidad espectral de potencias a la frecuencia de la señal de entrada (ω_0) y el término S_n es la densidad espectral de la potencia de ruido de fondo de la salida. Es importante mencionar que en la ecuación (2.1) tanto $p(\omega_0)$ como (ω_0) deben estar medidos en puntos equivalentes en el sistema. Se tiene fácilmente que la Resonancia Estocástica ocurre cuando el SRN es máximo para una entrada de ruido

distinta de cero. Las Unidades de la Relación Señal a Ruido es dB (decibeles). En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo de la gráfica de valores de SNR con comportamiento característica de resonancia estocástica [29][30].

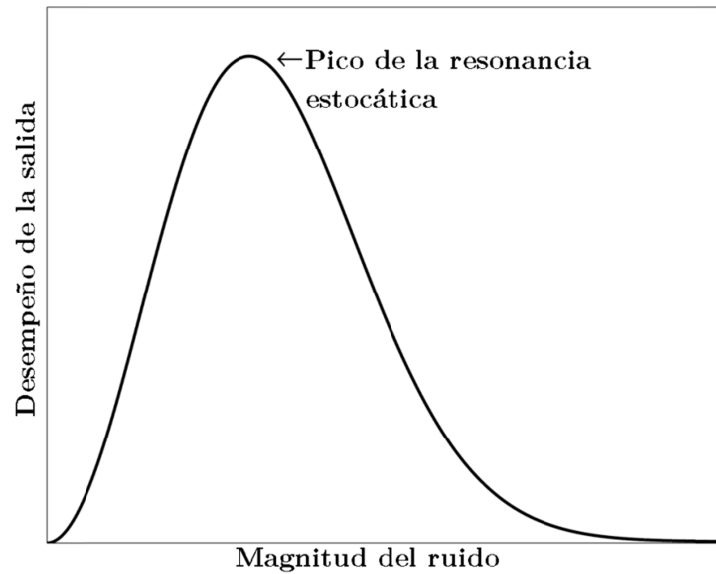


Figura 2.2: Ejemplo de gráfica de SNR con comportamiento característico de resonancia estocástica magnética.

2.2 Conclusiones

En este capítulo se presenta brevemente una descripción de la mecánica del fenómeno de resonancia estocástica y la relación señal a ruido que es la herramienta que nos muestra el efecto del fenómeno en el sistema.

3 Equipo y dispositivos utilizados.

Para realizar el estudio experimental se utilizó el siguiente equipo y dispositivos:

- 2 Fuentes de voltaje E3630A de Agilent.
- 2 Generadores de funciones Hp 33120A.
- Osciloscopio Tektronix tds3054.
- Multímetro Klein Tool MM1000.
- Calibrador vernier.

3.1 Sensor de densidad de flujo de campo magnético.

Para la medición de la densidad de flujo de campo magnético se utilizó el magnetómetro Mag-01H de Bartington Instruments (Figura 3.1) que trabaja con campos magnéticos de 0 a 2 mT (mili teslas) y a una frecuencia máxima de 10 Hz para campos variables en el tiempo, una resolución máxima de 1nT (Mag-01), 0.1nT (Mag-01H). El magnetómetro cuenta con tres tipos de puntas de prueba; axial, transversal y criogénica.



Figura 3.1: Sensor de campo magnético Mag-01 y Mag-01H

El sistema comprende una gama de sondas de saturación en miniatura conectadas por un cable a una unidad electrónica compacta. La unidad electrónica contiene circuitos para convertir las señales producidas por la sonda en una medición de la densidad de flujo para la visualización en la pantalla LCD del panel frontal o en la forma de una tensión de salida analógica para fines de gráfico de grabación. Se incluye una batería recargable, por lo que la unidad es adecuada para uso portátil, incluyendo una batería no magnética, el instrumento se puede utilizar cerca de la sonda. Los errores no son significativos con la sonda y el magnetómetro tan cerca como 0.5 metros.

El Mag-01H difiere de los Mag-01 debido a la adición de un control de sensibilidad $\times 10$ para aumentar la resolución y la provisión de una precisión de control para ampliar el rango de. Ambos instrumentos muestran el voltaje de la batería de 2 a 4 segundos después de encender el equipo y señal de alarma audible cuando la batería debe ser recargada.

El sensor cuenta con sondas o puntas de medición, estas están disponibles en dos rangos de sensibilidad (0.2mT y 2 mT) y tres construcciones diferentes (axial, transversal y criogénico). Cada una está identificada por una letra de código en la etiqueta pegada al lado de la clavija del cable de la sonda, en la Figura 3.2 se puede observar las dimensiones físicas de la punta de tipo axial B y axial D con sensibilidad de hasta 0.2mT y 2mT respectivamente.

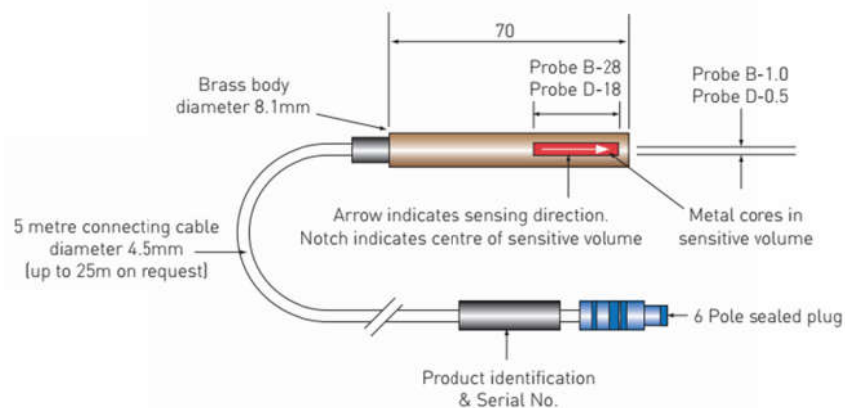


Figura 3.2: Punta de prueba axial del magnetómetro, las dimensiones están en milímetros.

3.2 Caja de aislamiento o blindaje magnético

Es una cámara de forma cilíndrica hecha de tres capas de mu-metal que es una aleación de 80% níquel, 4.5% Molibdeno e hierro como balance, este material tiene una permeabilidad de 60 000 a 240 000. El modelo es TLMS-0100 Open-end Magnetic Shield, de la compañía Bartington Instruments.

La cámara desvía las líneas de flujo alrededor de las capas, protegiendo el interior de hasta intensidades externas de 5mT.

Las especificaciones se muestran y en la Figura 3.3 se puede observar su apariencia física.

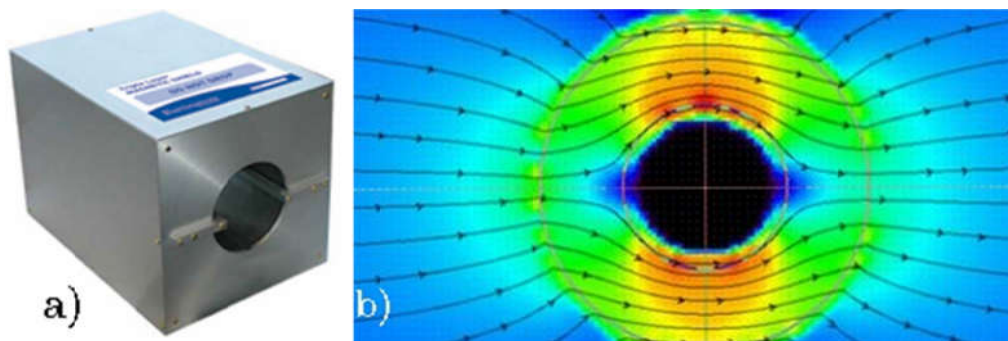


Figura 3.3: a) Caja de aislamiento magnético, hecha de 3 capas de mu-metal que tiene una permeabilidad de 60000 a 240000 lo que puede reducir el campo magnético de la tierra $\approx 5\text{mT}$ hasta $\approx 18\text{nT}$, b) desviación de las líneas de campo magnético.

3.3 Bobinas o solenoides

Para generar los campos magnéticos necesarios para este estudio experimental se diseñaron y construyeron bobinas con las siguientes características y observaciones:

Para seleccionar la forma de la bobina se analizaron los modelos existentes de bobinas en la literatura y se determinó que la más adecuada para construir las bobinas era la forma cilíndrica, ya que esta permite variar la inductancia, la densidad de campo magnético y las

dimensiones físicas con relativa facilidad, y como estos parámetros dependen del radio de la bobina, el número de vueltas, el núcleo del cilindro, el calibre del alambre y la cantidad de corriente que pasa por la bobina, se tiene un margen amplio de variables y que, aunque están relacionadas directa e indirectamente se pueden manipular a conveniencia. Desafortunadamente obtener valores exactos es bastante laborioso y quizás imposible, ya que todo es empírico y en ciertos casos es imposible poder controlar todas las variables que interviene.

3.3.1 Diseño y construcción de Bobinas

En la construcción de las bobinas fue necesario tomar en cuenta las dimensiones del espacio en el interior de la caja de aislamiento, ya que después de algunas pruebas con el magnetómetro se determinó que las mediciones era considerablemente afectadas por el ruido magnético del medio ambiente lo que llevo a considerar que las bobinas de forma cilíndrica no deberían tener un diámetro mayor a 70 mm. (milímetros) para ser introducidas en la caja de aislamiento magnético.

Para el campo magnético máximo que deberían generar las bobinas se tomó en cuenta las capacidades máximas de medición del magnetómetro, por lo que las bobinas no deberían generar campos mayores a 2 mT o ± 1 mT cerca de la punta de prueba, pero sí podrían rebasar este límite si se encontraba a una separación adecuada de la punta de prueba, ya que el campo disminuye considerablemente al aumentar la distancia entre la fuente y la punta de prueba.

El calibre del alambre de cobre esmaltado seleccionado para la construcción de las bobinas fue el 24 y 25 porque estos calibres permiten una conducción máxima de corriente de 1.5 amperes, y su diámetro permite construir bobinas que cumplan con las dimensiones necesarias para el estudio, pero también este calibre permite controlar el número de vueltas y capas en la construcción de bobinas y representan un parámetro importante en la generación de campo magnético.

Cuando se construye una bobina se debe asegurar que el número de espiras y el número de capas de espiras se mantenga constante, por lo que en ocasiones es necesario contar con un soporte adecuado que

permita conservar a la bobina sin alteraciones. En este estudio experimental se diseñaron 3 carretes diferentes en el software SolidWorks y se construyeron mediante una impresora 3D, las dimensiones físicas fueron seleccionadas para que el carrete pudiera ser introducido en la caja de aislamiento magnético y facilitara la construcción de bobinas con diferentes características. Todos los carretes cuentan con una extensión o conexión que permite montar y retirar la bobina con relativa facilidad de un soporte que se construyó especialmente para introducir las bobinas en la caja de aislamiento, además, el diseño de estas evitan que la bobina cambie su orientación mientras se manipula y su posición con respecto a la punta de prueba. En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo del diseño del carrete y en el apéndice se muestran las dimensiones completas y fotografías.

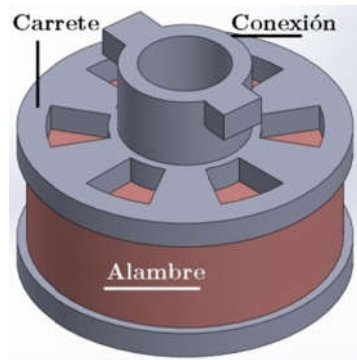


Figura 3.4: Ejemplo de carrete diseñado en SolidWorks, construido con impresora 3D, con una pestaña que permite montar y retirar la bobina del soporte.

El núcleo seleccionado para todas las bobinas en este estudio fue el aire, ya que no contribuye o altera el campo generado por las bobinas como lo haría un material de alta permeabilidad que presenta no linealidades, histéresis en su comportamiento magnético, lo cual puede alterar considerablemente las mediciones o los resultados en este estudio experimental.

3.4 Estructura para la manipulación de bobinas.

Durante la experimentación se realizaron mediciones que nos permitieron observar que las lecturas tomadas por la punta de prueba del magnetómetro variaban con respecto a la distancia entre el piso y la punta de prueba y también las lecturas variaban con respecto al ángulo entre la punta y el polo norte geomagnético. Además se pudo observar que las lecturas tomadas a las bobinas dependían de la distancia de la punta de prueba con respecto al eje Z de la bobina. En la Figura 3.5 se muestra los ejes de referencia de las bobinas.

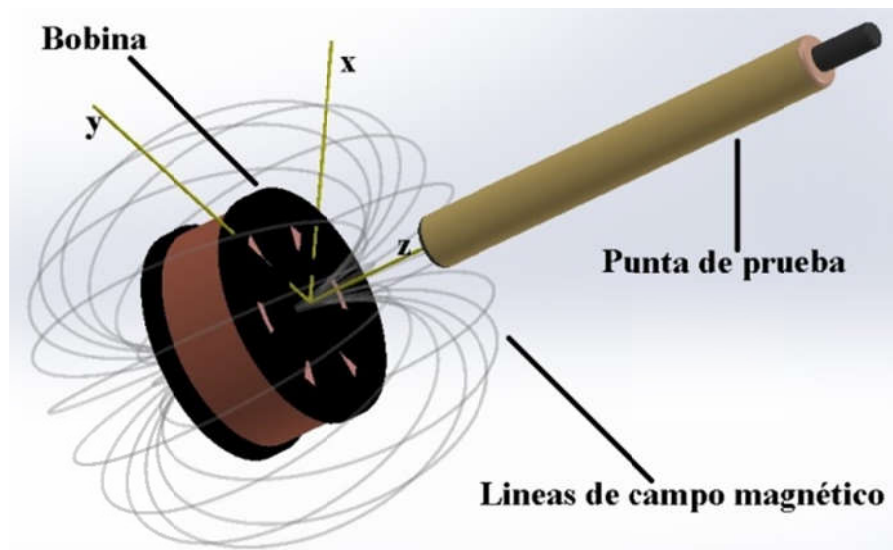


Figura 3.5: Representación de la bobina, la punta de prueba del magnetómetro, líneas de campo magnético y los ejes de referencia.

Estas observaciones nos mostraron que el proceso experimental debería realizarse en el interior de la caja de aislamiento y además que las bobinas deberían colocarse en algún soporte que permitiera mantener la punta de prueba en el eje z de la bobina, pero permitiendo variar la distancia entre ellas. Después de buscar en los diferentes modelos de soportes para experimentación se decidió construir el soporte con acrílico siguiendo el diseño que se muestra en Figura 3.6.

El soporte para las bobinas que se muestra en la Figura 3.6 está constituido de 2 partes. En la parte 1, la pieza b sirve para colocar la punta de prueba y/o una bobina de hasta 70 mm, esta pieza cuenta con dos ranuras que permiten montar el soporte en las guías de la caja de aislamiento, desplazarla y mantener a la punta y/o bobina en un mismo eje.

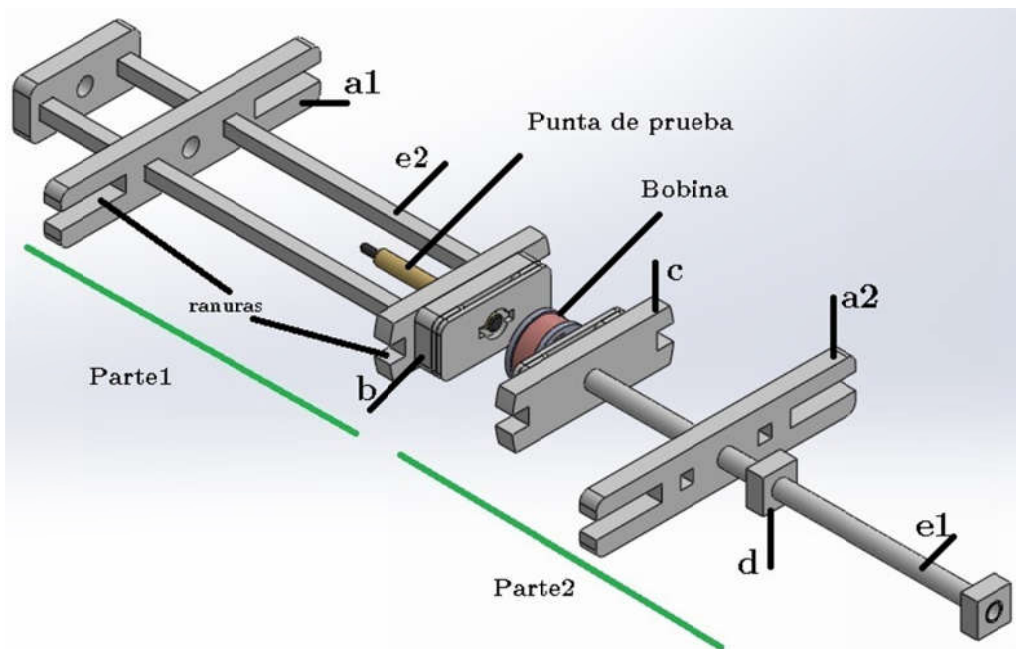


Figura 3.6: Diseño del soporte para las bobinas en SolidWorks

La pieza a1 es colocada y fijada en el exterior de una de las caras de la caja de aislamiento magnético con tornillos a los rieles.

En la parte 2 del soporte, la pieza c permite colocar bobinas de hasta 70 mm de diámetro y desplazarlas dentro de la caja de aislamiento por medio de dos ranuras que se montan en las guías del soporte. La pieza a2 permite fijar el soporte a la caja de aislamiento por medio de tornillos.

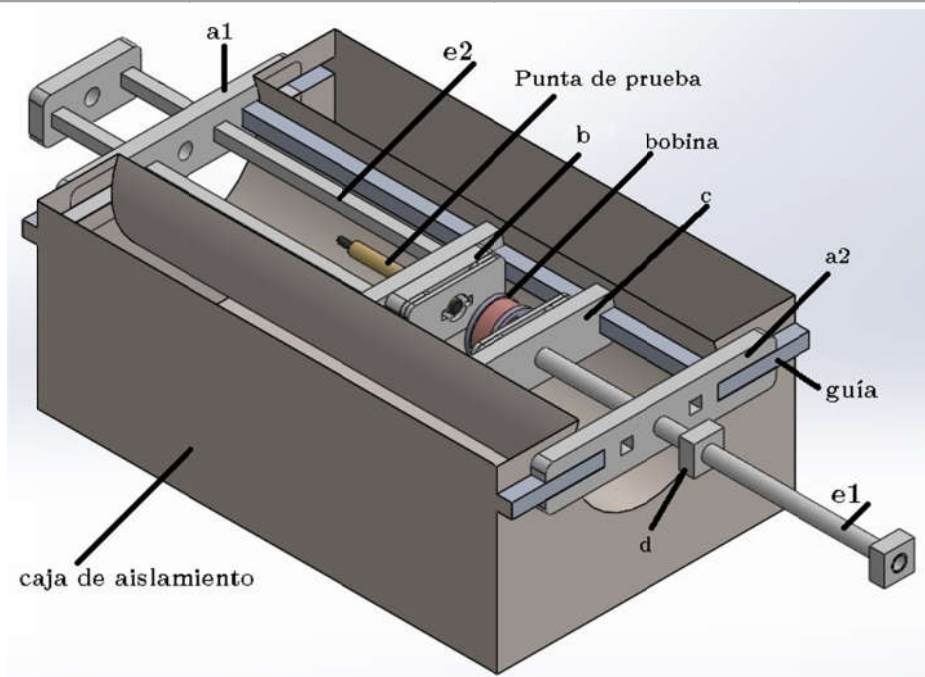


Figura 3.7: Representación de la posición del soporte dentro de la caja de aislamiento magnético y algunas de sus partes.

Las piezas e1 y e2 son varillas de acrílico que permiten mover independientemente las piezas c y b respectivamente en un mismo eje. La pieza d es un prisma rectangular de acrílico que se puede desplazar sobre la varilla e1 y fijarse a esta por medio de un tornillo, la pieza d, colocada adecuadamente puede ser usada para medir desde el exterior la distancia que existe entre las bobinas o entre la punta de prueba que están en el interior de la caja de aislamiento.

Las piezas b y c de la parte 1 y parte 2 cuentan cada una con un conector hembra que permite montar una bobina en cada una de ellas con relativa facilidad y manteniendo la orientación de la bobina o punta de prueba en el mismo eje. Las bobinas se montan introduciendo el conector de cada carrete en el conector hembra del soporte y se gira hacia la izquierda o derecha. En las Figura 3.8 se muestran el conector hembra en el soporte, en Figura 3.9 , Figura 3.10 y Figura 3.11 se muestra una fotografía del soporte dentro y fuera de la caja de aislamiento.

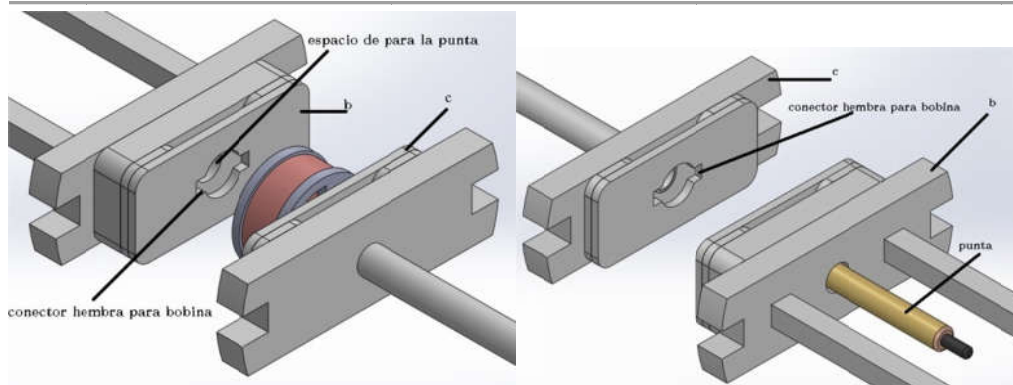


Figura 3.8: Piezas b y c donde se montan las bobinas y la punta de prueba del magnetómetro.

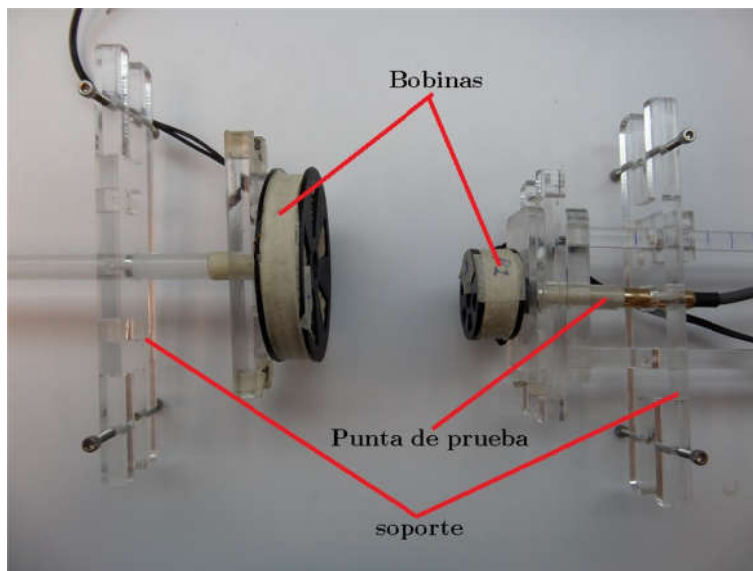


Figura 3.9: Soporte de acrílico para introducir dos bobinas en la caja de aislamiento magnético y la punta de prueba del magnetómetro.

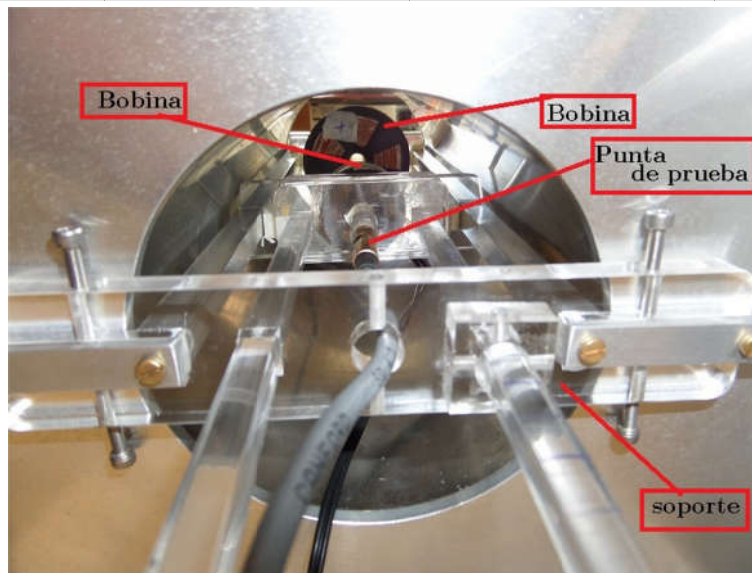


Figura 3.10: Soporte en el interior de la caja de aislamiento magnético con dos bobinas y punta de prueba.

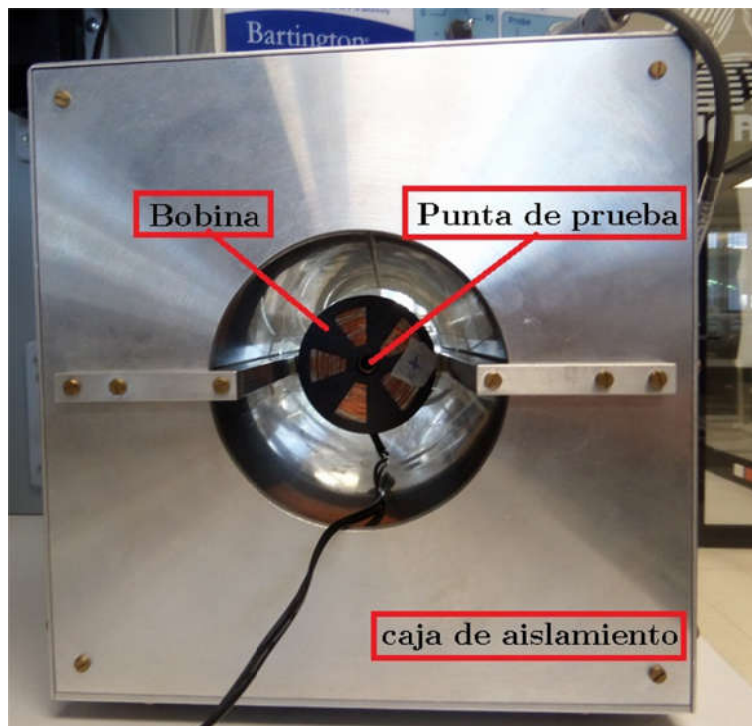


Figura 3.11: Posición de las bobinas en el interior de la caja de aislamiento y la punta de prueba del magnetómetro cuando son montadas en el soporte.

3.5 Fuente de corriente constante

El campo magnético generado por la bobina depende directamente de la corriente eléctrica que pasa por ella, por lo tanto es necesario una fuente que nos garantice esta cantidad de corriente constante o variable controlada, por lo cual se decidió utilizar el circuito llamado bomba de corriente Howland mejorada, que es un convertidor de voltaje a corriente y que garantiza una corriente sin importar relativamente la resistencia de carga [31].

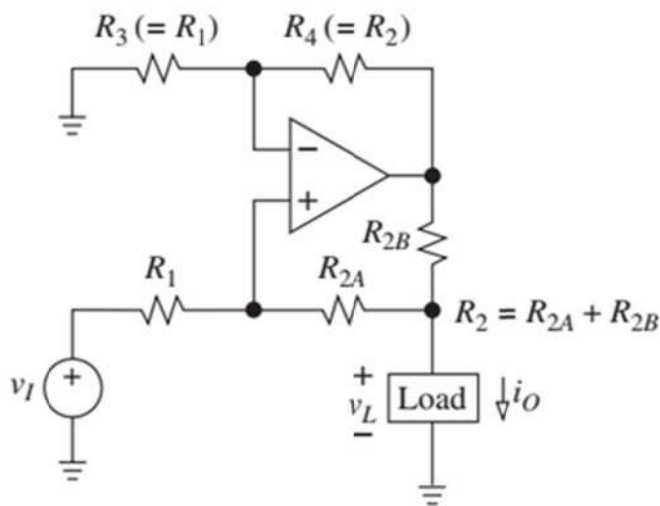


Figura 3.12: Circuito electrónico convertidor de voltaje a corriente, también llamado amplificador de transconductancia o bomba de corriente Howland mejorado.

Para garantizar que el circuito se comporte como una fuente de corriente es necesario que las cuatro resistencias que se muestran en la Figura 3.12 formen un puente balanceado como se muestra en la ecuación (3.1), el voltaje de la carga V_L debe satisfacer la ecuación (3.2), donde V_I es el voltaje de entrada y V_{sat} es el voltaje de alimentación del amplificador operacional.

$$\frac{R_4}{R_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_{2A} + R_{2B}}{R_1} \quad (3.1)$$

$$|V_L| \leq |V_{sat}| \quad (R_2/R_1)|V_I| \quad (3.2)$$

Cuando se cumplen las condiciones (3.1) y (3.2), la corriente i_0 que entrega el circuito a la carga se puede expresar de la forma:

$$i_0 = \frac{R_2/R_1}{R_{2B}} v_I \quad (3.3)$$

En la Figura 3.13 se presenta el circuito electrónico utilizado en la caracterización de las bobinas, este circuito es una fuente de corriente constante controlada por modulación de ancho de pulso. La etapa A del circuito es un oscilador astable hecho con circuito integrado 555 que genera una señal modulada en pulso de 10KHz (Hertz). La etapa B es un circuito de acoplamiento óptico implementado con el opto-transistor 4N25 para asilar el control de la etapa de potencia. La etapa C es un circuito pasa bajas que permite suavizar los pulsos y entregar un voltaje promedio equivalente al ancho del pulso generado en la etapa A y B. La etapa F es el circuito bomba de corriente Howland mejorada. Previamente a este circuito se colocó un circuito seguidor de voltaje con el amplificador TL081 para acoplamiento de impedancias. El amplificador operacional U2 es el dispositivo principal utilizado para entregar la corriente a la bobina, durante el estudio experimental se utilizaron los amplificadores operacionales LA6500 de ON Semiconductor y el OPA564 de Texas Instruments. Ambos son capaces de entregar hasta 1 Ampere de corriente con una disipación de calor adecuada. Los diodos D3 y D4 son diodos Zener y están recomendados por los fabricantes para evitar daños por sobrevoltaje. Los capacitores c1,c2,c3 y c4 son capacitores cerámicos de 100nF, colocados para disminuir el ruido que proviene de la fuente de voltaje. Los capacitores c8 y c7 son capacitores de 1nF y son colocados para evitar que el circuito bomba de corriente en ciertas condiciones se convierta en un circuito oscilador ya que utiliza retroalimentación positiva y negativa, con el uso de los capacitores en paralelo con las resistencias R4 y R3 se pretende que prevalezca la retroalimentación negativa sobre la positiva. La salida de la etapa F se conecta a la bobina o carga, esta salida entrega la corriente que proviene del amplificador operacional y pasa por la resistencia R7 de 10 ohm y después a la carga. Esto quiere decir que en la práctica se debe utilizar una resistencia de 10 watts, para evitar que la corriente de hasta 500mA o más, destruya a la resistencia R7. Para mejorar el rendimiento del circuito de conmutación de la etapa de potencia, la red “snubber” se coloca en la salida del circuito para suprimir los picos de voltaje y amortiguar la oscilación transitoria

provocada por la inductancia del circuito cuando se abre un interruptor. El diseño adecuado de la red “snubber” puede ofrecer mayor fiabilidad, mayor eficiencia y menor EMI (interferencia electromagnética).

3.6 Circuito amplificador inversor de voltaje

Durante el estudio experimental es necesario que las bobinas generen campos magnéticos variables en el tiempo y ruido magnético, esto se logra al inyectar una corriente adecuada a la bobina. Las señales que son inyectadas a las bobinas serán generadas por el generador de funciones de Hp 33120A, pero el generador de funciones no tiene la capacidad para inyectar la corriente adecuada [28][31][32].

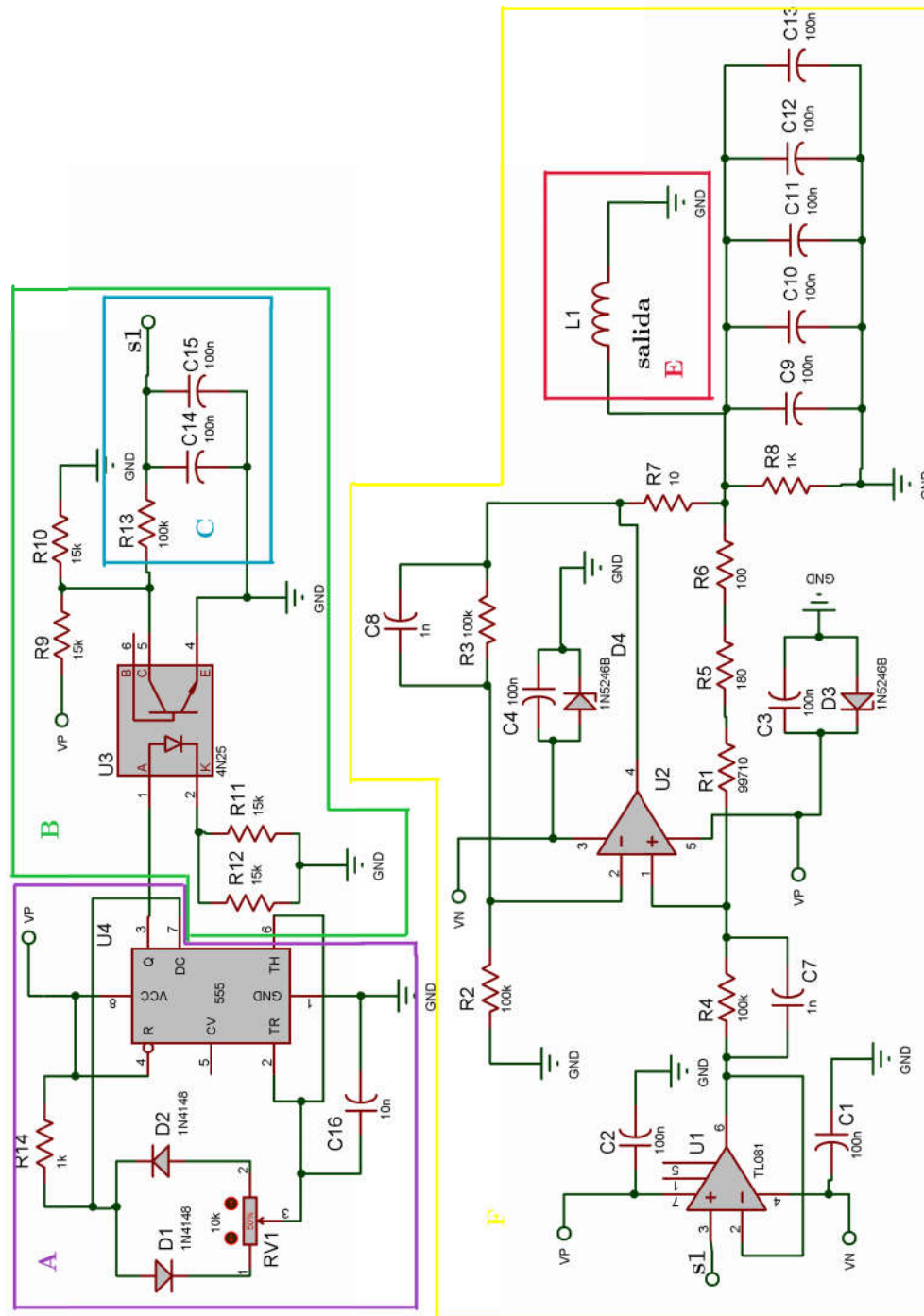


Figura 3.13 : Circuito electrónico bomba de corriente Howland mejorada de 0 a 500mA controlada por modulación de ancho de pulso para alimentar a las bobinas utilizado en el estudio experimental.

Para inyectar la corriente en las bobinas generadoras de campo magnético variable y ruido magnético se diseñó e implementó el circuito de la Figura 3.14. Este circuito tiene la capacidad de seguir, atenuar o amplificar una señal y de entregar hasta 10 amperes con un adecuado disipador de calor.

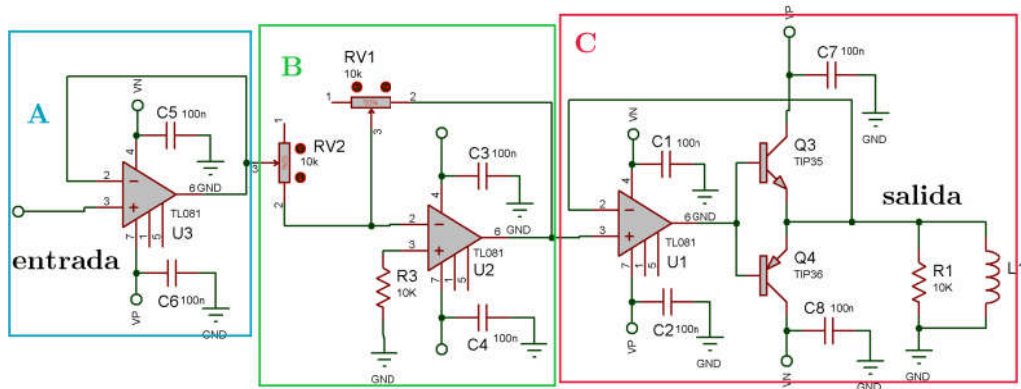


Figura 3.14: Circuito amplificador inversor con etapa de salida B

El circuito de la Figura 3.14 consta de 3 etapas la etapa A es un circuito seguidor de voltaje, la etapa B es un circuito inversor con ganancia variable y el C es un circuito clase B con un amplificador operacional conectado es retroalimentación negativa para reducir la distorsión de cruce.

3.7 Circuito desfaseador de señal.

Para este estudio experimental se diseñó y construyó un circuito llamado filtro pasa todo que permite desfasear una señal con respecto a otra sin atenuarla o amplificarla y que es mostrado en la Figura 3.15. Este circuito junto con el mostrado en la Figura 3.14 son utilizados en el estudio de la convolución en el espacio de campos magnéticos variables en el tiempo. El circuito tiene la capacidad de desfasear una señal con respecto a la otra [32].

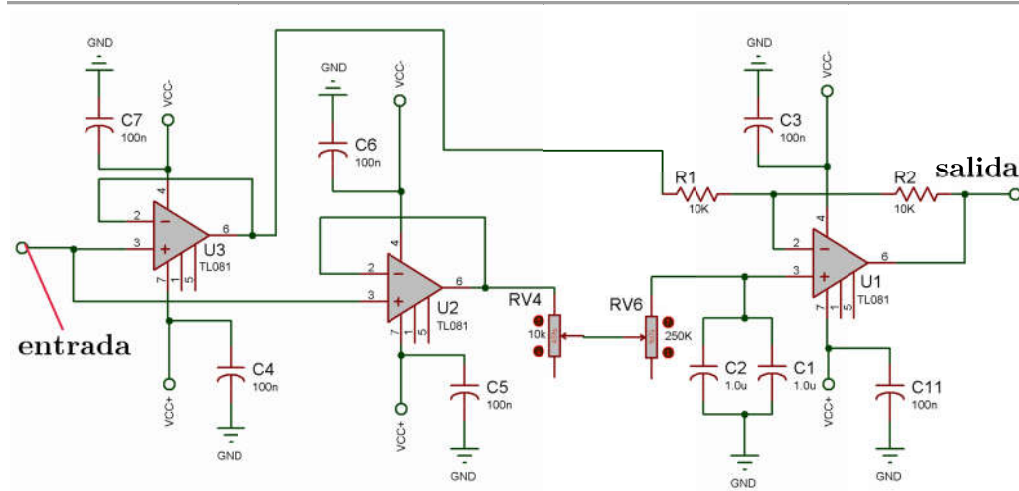


Figura 3.15: Circuito electrónico pasa todo o cambiador de fase utilizado en el estudio de la convolución en el espacio de campos magnéticos variables en el tiempo.

La función de transferencia de este circuito es la que se muestra en la ecuación (3.4):

$$H(s) = \frac{RCs + 1}{RCs + 1} \quad (3.4)$$

Donde $R = RV4 + RV6$ y $C = C1 + C2$, lo cual indica un cero en $s = 1/RC$ y un polo en $s = -1/RC$. Si $s \rightarrow j\omega$, se obtiene:

$$H(j\omega) = \frac{1 - j\omega/\omega_0}{1 + j\omega/\omega_0} \quad (3.5)$$

Este circuito introduce un atraso en la fase, el cual varía de 0 a -180 grados, con un valor de -90 grados en $\omega = \omega_0$ y $\omega_0 = \frac{1}{RC}$.

3.8 Conclusiones

Este capítulo presentó las características técnicas de los del equipo utilizado durante todo este proceso experimental, se presentó el diseño de los circuitos electrónicos que junto con las bobinas generaban campos magnéticos constante y variables, se presentó el diseño y construcción de bobinas, carretes y se presentó el diseño y construcción de una estructura de acrílico que permite manipular las bobinas dentro de la caja de aislamiento magnético.

4 Ejecución experimental.

El proceso experimental consiste en tres etapas que se describirán brevemente en el siguiente texto:

- Construcción y caracterización de bobinas generadoras de campo magnético.

En esta primera etapa se diseña y construye las fuentes de campo magnético y se determina la densidad de flujo magnético para distintas distancias desde la fuente hasta un punto determinado, (ver Figura 4.1).



Figura 4.1: Diagrama a bloques de la etapa de caracterización del campo magnético generado por las bobinas.

- Observación de la convolución en el espacio del campo magnético generado por dos fuentes distintas.

En esta etapa se observa el campo resultante de la interacción de dos campos magnéticos generados por 2 fuentes distintas, esto cuando a las fuentes se les inyecta señales variantes en el tiempo con diferente amplitud, fase y frecuencia (ver Figura 4.2 y Figura 4.3)

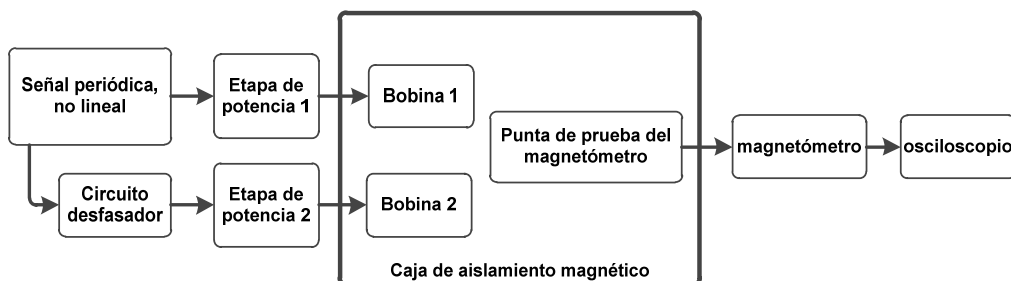


Figura 4.2: Diagrama a bloques de la etapa de convolución en el espacio de campos magnéticos desfasados.

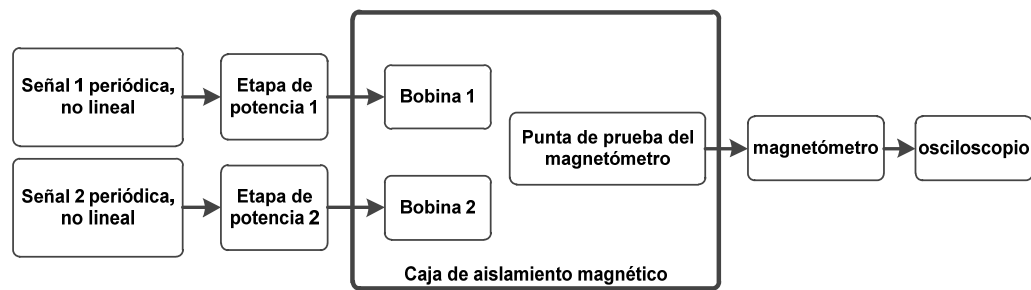


Figura 4.3: Diagrama a bloques de la etapa de convolución en el espacio de campos magnéticos con frecuencias diferentes entre ellos.

- Observación de la Resonancia estocástica magnética

En esta última etapa se expone una fuente de campo variante en el tiempo a una cierta cantidad de ruido magnético generado por otra fuente (ver Figura 4.4).

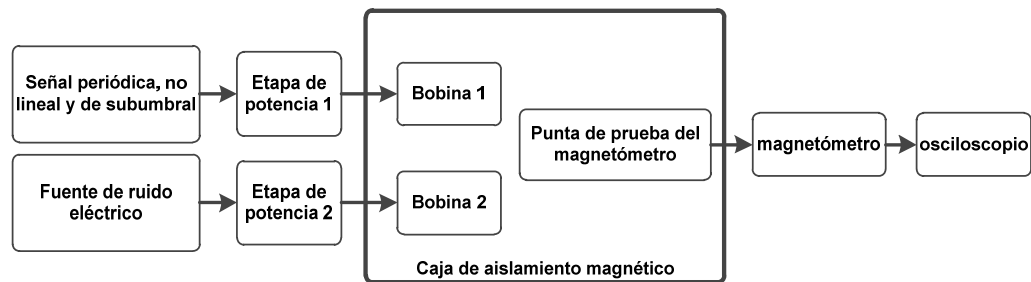


Figura 4.4: Diagrama a bloques de la etapa de observación del fenómeno de resonancia estocástica magnética.

4.1 Caracterización del aislamiento magnético.

Durante el estudio experimental es importante conocer la intensidad del ruido magnético que existe dentro de la caja de aislamiento magnético, estos datos nos ayudan a tomar con mayor eficiencia las mediciones.

- a) Como primer paso se alinearon los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la

tierra utilizando una brújula como se muestra en la figura 20, esta actividad ayuda a atenuar la influencia del campo magnético dentro de la caja de aislamiento.

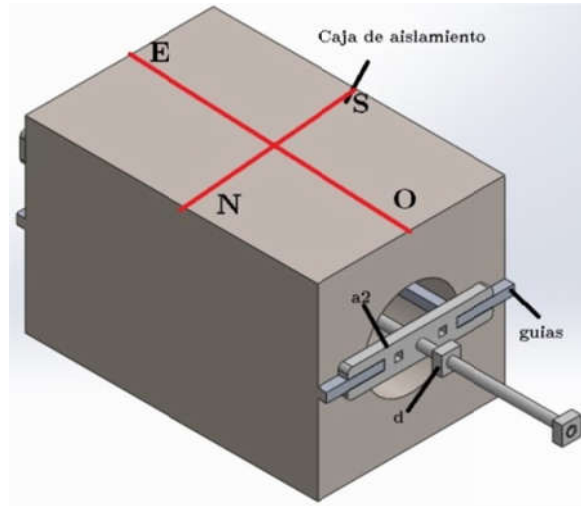


Figura 4.5: Alineación los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la tierra

- b) Se colocó la punta de prueba en la parte 1 del soporte y se ajustó su posición dentro de la caja de aislamiento de tal manera que la punta de prueba se encontrara en el punto p2 donde empieza la cara opuesta de la caja de aislamiento, como lo muestra la Figura 4.6.

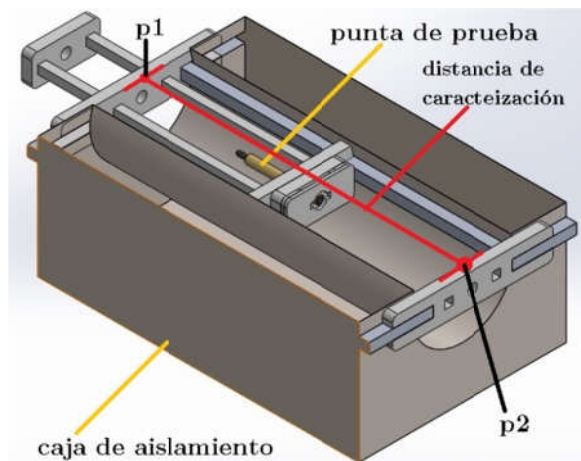


Figura 4.6: Representación del proceso de caracterización de la caja de aislamiento magnético

-
- c) El siguiente paso es fijar la referencia móvil.
 - d) Por último se desplazó la referencia móvil 0.5 cm por cada medición hasta el punto p1 y se registró. Los datos obtenidos se encuentran en el apartado de resultados de este trabajo.

4.2 Caracterización de bobinas

En esta etapa del estudio experimental se determinó la inductancia de cada bobina y se midió el campo magnético generado por cada una de las bobinas a diferentes distancias desde la bobina siguiendo estos pasos:

4.2.1 Campo magnético

- a) Se alineó los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la tierra utilizando una brújula como se muestra en la Figura 4.5.
- b) Se conectó al magnetómetro, se colocó la punta de prueba en la parte 1 del soporte y se ajustó su posición dentro de la caja de aislamiento de tal manera que al encender el magnetómetro la lectura mostrada sea mínima.
- c) Se colocó la bobina en la parte 2 del soporte, se introdujo y fijó ambos en la caja de aislamiento magnético, se ajustó el soporte hasta que la bobina tocara o coincidiera con la parte 2 del soporte.
- d) Se ajustó adecuadamente las partes 1 y 2 del soporte asegurando que la bobina y la parte 2 del soporte coincidan, después se fijó la referencia móvil.
- e) Se conectaron los cables de alimentación de la bobina al circuito electrónico bomba de corriente Howland mejorada.
- f) Para proceder con las mediciones y antes de encender el equipo, se registró y verificó que la medición del magnetómetro sea constante y mínima.

- g) Para realizar la primera medición se encendió el equipo, y se registró la primera medición, esta medición corresponde a la distancia 0 cm.
- h) Para realizar la n-medición se desplazó la parte 2 del soporte una distancia deseada y se registró la n-medición, ver Figura 4.7. Para determinar la distancia entre la bobina y la punta del magnetómetro se hizo uso de un calibrador vernier con el que se midió la distancia que hay entre el punto A1 y B1, esta distancia es proporcional a la distancia que existe entre el punto A y B dentro de la caja de aislamiento.
- i) EL proceso antes mencionado se repite hasta que las dimensiones de la caja de aislamiento y/o el soporte lo permitan. Los resultados de estas mediciones son presentados en el aparatado de resultados de este trabajo.

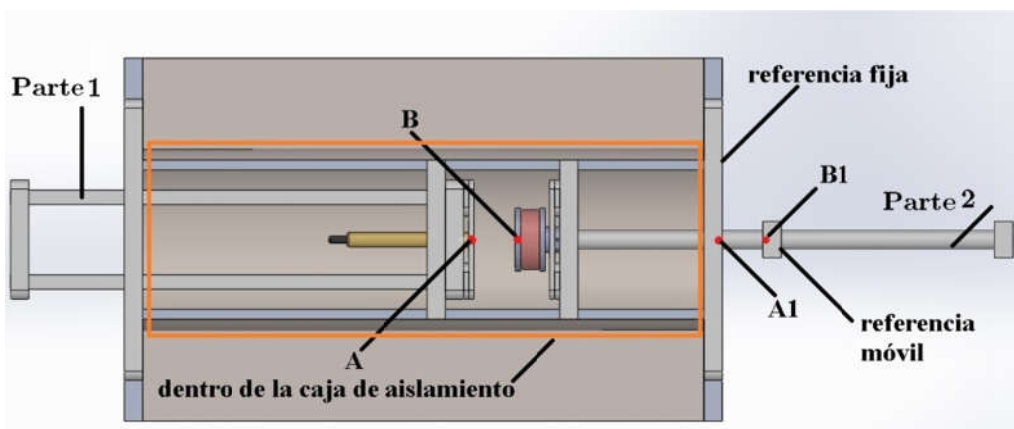


Figura 4.7: vista superior del arreglo experimental dentro de la caja de aislamiento para la caracterización de campos magnéticos de las bobinas.

4.2.2 Inductancia de bobinas

Para determinar la Inductancia de cada bobina se utilizó la formula (1.12) del capítulo 2 y se realizó de manera práctica utilizando la resonancia en serie con un circuito resonante en serie. Después de construir el circuito se utilizó el generador de funciones y el circuito seguidor de la Figura 3.14 para inyectar a cada circuito en serie una señal senoidal con diferentes frecuencias, de tal manera que mediante

prueba y error se hallara la frecuencia de resonancia del circuito, es decir la frecuencia a la cual se midiera la máxima corriente en el circuito.

Los resultados de este proceso se reportan en el apartado de resultados de este trabajo.

4.3 Convolución de campos magnéticos

En esta etapa del estudio experimental se observó y registró la convolución en el espacio de dos diferentes campos magnéticos variables en el tiempo, generados por dos fuentes distintas. Los pasos para este proceso son los siguientes:

- a) Se alinearon los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la tierra utilizando una brújula como se muestra en la Figura 4.5.
- b) Se conectó al magnetómetro, se colocó la punta de prueba y una bobina en la parte 1 del soporte, se ajustó su posición dentro de la caja de aislamiento de tal manera que al encender el magnetómetro la lectura mostrada sea mínima.
- c) Se colocó la bobina 2 en la parte 2 del soporte, se introdujo y fijó ambos en la caja de aislamiento magnético, se ajustó el soporte hasta que la bobina 1 tocara o coincidiera con la bobina 2 de la parte 2 del soporte.
- d) Se ajustó adecuadamente las partes 1 y 2 del soporte asegurando que la bobina 1 y la bobina 2 de la parte 2 del soporte coincidan, después se fijó la referencia móvil. En la Figura 4.8 se observa una representación del arreglo experimental.

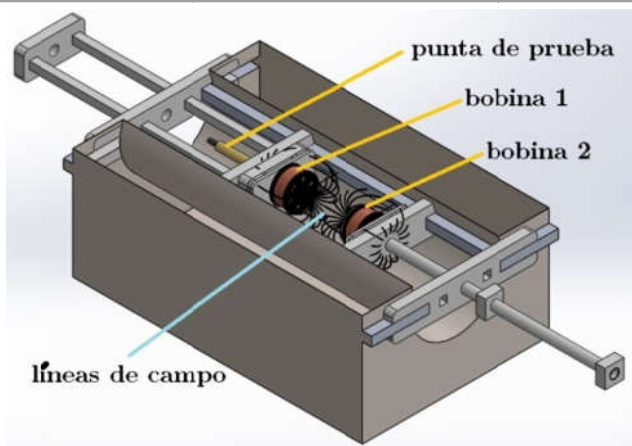


Figura 4.8: Representación del arreglo experimental dentro de la caja de aislamiento para la observación de la convolución de campos magnéticos.

- e) Se conectaron los cables de alimentación de las bobinas al circuito electrónico amplificador inversor de la Figura 3.14 y al circuito cambiador de fase de la Figura 3.15 y al generador de funciones Hp.
- f) Para proceder con las mediciones y antes de encender el equipo, se registró y verificó que la medición del magnetómetro sea constante y mínima.
- g) La señales inyectadas a las bobinas fueron de la forma senoidal, de 0.5 Hz hasta los 5 Hz, en algunos casos se utilizó la misma frecuencia y se varió la fase y en otro casos se inyectaron señales de diferentes frecuencias. Debido a que las fuentes de campo magnético son bipolares es decir tienen polo positivo y negativo se realizó el estudio experimental de la convolución de los campos magnéticos variando la polarización de las bobinas, esto se ejemplifica en la Figura 4.9 donde se observa las polarizaciones de las bobinas utilizadas en el experimento.

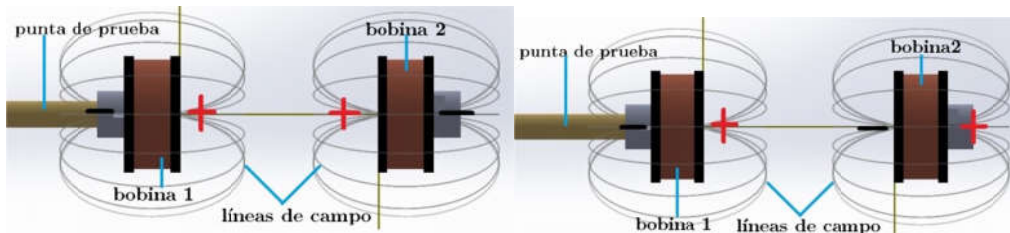


Figura 4.9: Arreglos experimentales de bobinas con polaridades opuestas y coincidentes.

-
- h) Los datos recopilados serán presentados en el apartado de resultados de este trabajo.

4.4 Resonancia estocástica magnética

- a) Se alineó los orificios de la caja de aislamiento magnético con el eje este-oeste magnético de la tierra utilizando una brújula como se muestra en la figura 20.
- b) Se conectó al magnetómetro, se colocó la punta de prueba y una bobina en la parte 1 del soporte y se ajustó su posición dentro de la caja de aislamiento de tal manera que al encender el magnetómetro la lectura mostrada sea mínima.
- c) Se colocó la bobina 2 en la parte 2 del soporte, se introdujo y fijó ambos en la caja de aislamiento magnético, se ajustó el soporte hasta que la bobina 1 tocara o coincidiera con la bobina 2 de la parte 2 del soporte.
- d) Se ajustó adecuadamente las partes 1 y 2 del soporte asegurando que la bobina 1 y la bobina 2 de la parte 2 del soporte coincidan. En la Figura 4.10 se observa una representación del arreglo experimental.

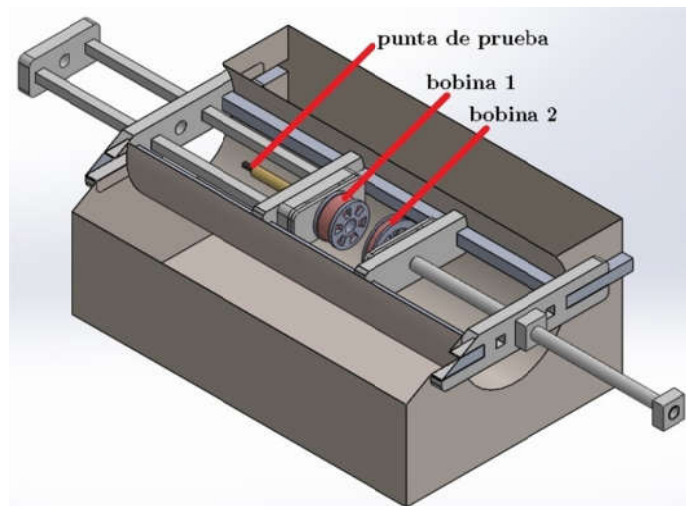


Figura 4.10: Arreglo experimental para el estudio de resonancia estocástica magnética.

-
- e) Se conectaron los cables de alimentación de las bobinas a los circuitos electrónicos amplificador inversor de la figura 18 y a los generadores de funciones Hp para cada bobina.
 - f) Para proceder con las mediciones y antes de encender el equipo, se registró y verificó que la medición del magnetómetro sea constante y mínima.
 - g) En esta etapa del experimento se inyectó a la bobina 1 distintas señales senoidales de 0.5 Hz a 5 Hz y con diferentes amplitudes para generar campos magnéticos con las mismas frecuencias y amplitudes de medición de densidad de flujo magnético proporcionales a la intensidad de la señal senoidal inyectada, con la bobina 2 y el generador de funciones se generó ruido blanco magnéticos al inyectar una señal eléctrica de la misma forma a la bobina 2.

Los datos recopilados, las frecuencias e intensidades de las señales senoidales y ruido serán presentados en el apartado de resultados de este trabajo.

4.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó la descripción de las diferentes etapas que conforman este estudio experimental, se presentó el arreglo experimental para cada una de las etapas y como se obtuvieron los datos y mediciones en cada etapa.

5. Resultados experimentales

En este apartado se presentan las mediciones realizadas en este proceso experimental.

5.1 Caracterización de la caja de aislamiento.

Las propiedades de atenuación de la caja de aislamiento magnético en su interior son no uniformes, por lo que es necesario realizar una caracterización del interior, con el fin de detectar la zona que mejor presente atenuación de ruido externo, esto se muestra en la Figura 5.1 y en la Tabla 5.1.

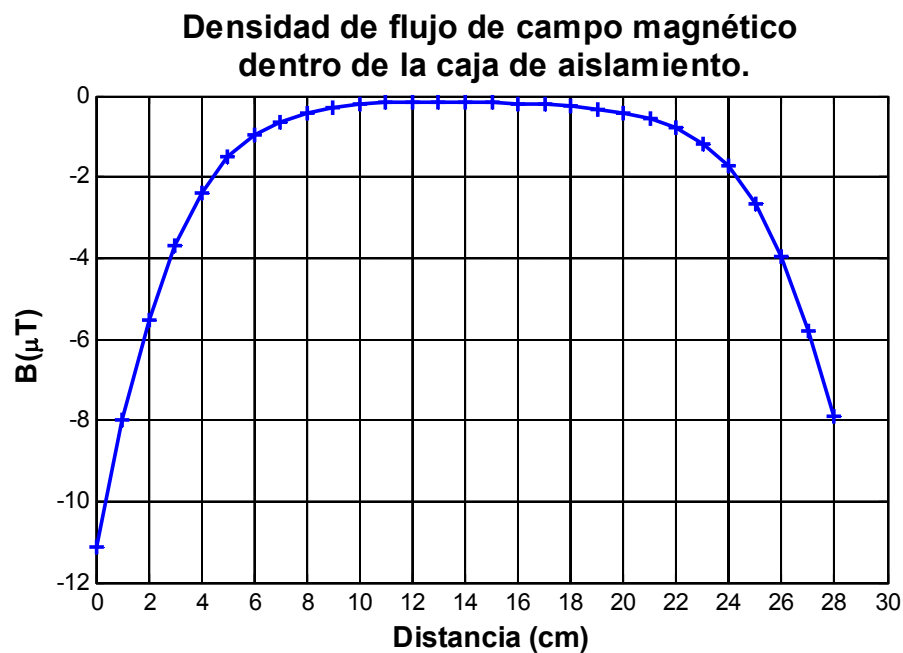


Figura 5.1: Densidad de flujo de campo magnético (B) en microteslas vs distancia en el interior de la caja de aislamiento magnético de uno de los orificios.

Caracterización de caja de aislamiento magnético			
Distancia (cm).	B(μ T)	Distancia (cm).	B(μ T)
0	-11.125	15	-0.157
1	-8.001	16	-0.181
2	-5.513	17	-0.214
3	-3.692	18	-0.260
4	-2.386	19	-0.324
5	-1.503	20	-0.423
6	-0.964	21	-0.577
7	-0.637	22	-0.804
8	-0.420	23	-1.187
9	-0.289	24	-1.741
10	-0.211	25	-2.671
11	-0.152	26	-3.954
12	-0.146	27	-5.777
13	-0.140	28	-7.891
14	-0.144		

Tabla 5.1: Caracterización de la densidad de flujo de campo magnético que se encuentra en el interior de la caja de aislamiento magnético.

Las mediciones presentadas en la Tabla 5.1 sobre la caracterización del flujo de densidad de campo magnético en el interior de la caja de aislamiento, presentan una variación notable cuando los orificios de la caja cambian su orientación con respecto al polo norte terrestre y a la distancia entre el suelo y la caja.

5.2 Caracterización de bobinas

5.2.1 Inductancia

En la Tabla 5.2 se muestran las características físicas y técnicas de las bobinas utilizadas en este estudio experimental, la información se refiere a los siguientes parámetros: (*Cal.* (AWG)) calibre del cable esmaltado utilizado para cada bobina, (*De.* (mm.)) diámetro exterior de la bobinas en milímetros, (*v/c*) número de vueltas por capa, (*nc.*) número de capas, (*R cd.* (Ω)) Resistencia en cd. de cada bobina en Ohm, (*Lx mH.*) Inductancia obtenida empíricamente utilizando el concepto de resonador en serie.

Características físicas de las bobinas						
Bobina	Cal.(A WG)	De. (mm.)	v/c	nc.	R cd.(Ω)	Lx mH.
1	24	34	26	22	10.8	6.89
2	25	34	15	22	3.3	2.0934
3	24	65	21	55	33.3	42.02
4	24	34.15	16	22	9.562	1.7749

Tabla 5.2: Características físicas de las bobinas empleadas en el estudio Experimental

5.2.2 Campos magnéticos

En las siguientes gráficas y tablas se presentan, las mediciones tomadas en la etapa de caracterización de bobinas de este estudio experimental. Las Gráficas presentan la densidad de campo magnético producido por la bobinas a diferentes distancias desde la bobina y hasta la punta de prueba del magnetómetro e intensidades de corriente.

Las Tablas muestran los valores graficados e información de la variación de la densidad de campo magnético producido por las bobinas.

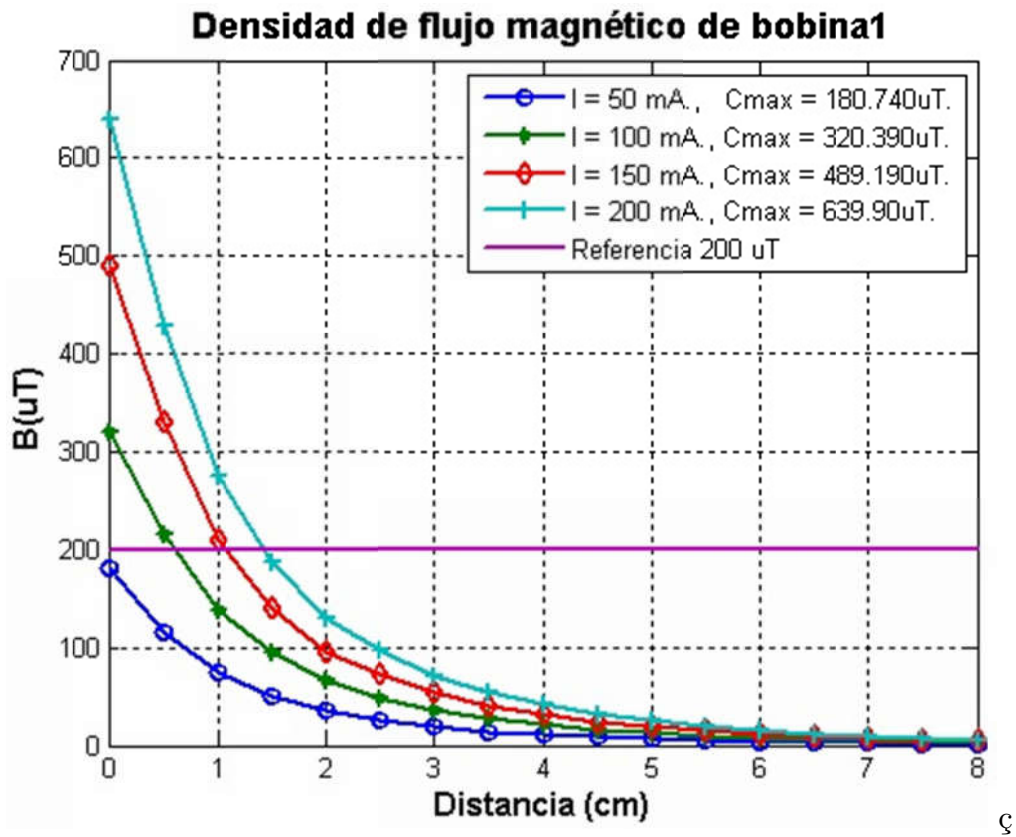


Figura 5.2: Gráfica de la densidad de flujo magnético de las bobina 1 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.

Densidad de flujo magnético de la bobina 1 y I= 50 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	180.740	100.0	0.0
2.0	0.5	115.420	63.9	36.1
3.0	1.0	74.560	41.3	58.7
4.0	1.5	50.210	27.8	72.2
5.0	2.0	35.210	19.5	80.5
6.0	2.5	24.840	13.7	86.3
7.0	3.0	18.880	10.4	89.6
8.0	3.5	14.090	7.8	92.2
9.0	4.0	10.750	5.9	94.1
10.0	4.5	8.230	4.6	95.4
11.0	5.0	6.360	3.5	96.5
12.0	5.5	5.020	2.8	97.2
13.0	6.0	3.850	2.1	97.9
14.0	6.5	3.030	1.7	98.3
15.0	7.0	2.380	1.3	98.7
16.0	7.5	1.880	1.0	99.0
17.0	8.0	1.460	0.8	99.2
18.0	8.5	1.160	0.6	99.4
19.0	9.0	0.930	0.5	99.5
20.0	9.5	0.740	0.4	99.6
21.0	10.0	0.580	0.3	99.7
22.0	10.5	0.460	0.3	99.7
23.0	11.0	0.370	0.2	99.8
24.0	11.5	0.290	0.2	99.8
25.0	12.0	0.180	0.1	99.9

Tabla 5.3: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1 para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 1 y I= 100 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	320.390	100	0
2.0	0.5	216.790	67.7	32.3
3.0	1.0	138.830	43.3	56.7
4.0	1.5	95.540	29.8	70.2
5.0	2.0	66.730	20.8	79.2
6.0	2.5	49.110	15.3	84.7
7.0	3.0	36.270	11.3	88.7
8.0	3.5	27.170	8.5	91.5
9.0	4.0	20.690	6.5	93.5
10.0	4.5	16.010	5.0	95.0
11.0	5.0	12.390	3.9	96.1
12.0	5.5	9.570	3.0	97.0
13.0	6.0	7.470	2.3	97.7
14.0	6.5	5.870	1.8	98.2
15.0	7.0	4.620	1.4	98.6
16.0	7.5	3.620	1.1	98.9
17.0	8.0	2.840	0.9	99.1
18.0	8.5	2.240	0.7	99.3
19.0	9.0	1.750	0.5	99.5
20.0	9.5	1.380	0.4	99.6
21.0	10.0	1.080	0.3	99.7
22.0	10.5	0.850	0.3	99.7
23.0	11.0	0.670	0.2	99.8
24.0	11.5	0.530	0.2	99.8
25.0	12.0	0.410	0.1	99.9

Tabla 5.4: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 1 y I= 150 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	489.190	100	0
2.0	0.5	329.790	67.4	32.6
3.0	1.0	209.090	42.7	57.3
4.0	1.5	139.620	28.5	71.5
5.0	2.0	94.910	19.4	80.6
6.0	2.5	72.340	14.8	85.2
7.0	3.0	53.990	11.0	89.0
8.0	3.5	39.720	8.1	91.9
9.0	4.0	31.110	6.4	93.6
10.0	4.5	23.920	4.9	95.1
11.0	5.0	18.790	3.8	96.2
12.0	5.5	14.580	3.0	97.0
13.0	6.0	11.320	2.3	97.7
14.0	6.5	8.820	1.8	98.2
15.0	7.0	6.940	1.4	98.6
16.0	7.5	5.460	1.1	98.9
17.0	8.0	4.280	0.9	99.1
18.0	8.5	3.360	0.7	99.3
19.0	9.0	2.640	0.5	99.5
20.0	9.5	2.080	0.4	99.6
21.0	10.0	1.640	0.3	99.7
22.0	10.5	1.290	0.3	99.7
23.0	11.0	1.010	0.2	99.8
24.0	11.5	0.800	0.2	99.8
25.0	12.0	0.620	0.1	99.9

Tabla 5.5: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 1 y I= 200 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	639.900	100	0
2.0	0.5	429.700	67.2	32.8
3.0	1.0	275.600	43.1	56.9
4.0	1.5	186.420	29.1	70.9
5.0	2.0	130.120	20.3	79.7
6.0	2.5	96.980	15.2	84.8
7.0	3.0	70.760	11.1	88.9
8.0	3.5	53.530	8.4	91.6
9.0	4.0	41.440	6.5	93.5
10.0	4.5	31.500	4.9	95.1
11.0	5.0	24.600	3.8	96.2
12.0	5.5	19.170	3.0	97.0
13.0	6.0	15.020	2.3	97.7
14.0	6.5	11.720	1.8	98.2
15.0	7.0	9.210	1.4	98.6
16.0	7.5	7.240	1.1	98.9
17.0	8.0	5.660	0.9	99.1
18.0	8.5	4.480	0.7	99.3
19.0	9.0	3.510	0.5	99.5
20.0	9.5	2.770	0.4	99.6
21.0	10.0	2.180	0.3	99.7
22.0	10.5	1.710	0.3	99.7
23.0	11.0	1.350	0.2	99.8
24.0	11.5	1.060	0.2	99.8
25.0	12.0	0.840	0.1	99.9

Tabla 5.6: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 1, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

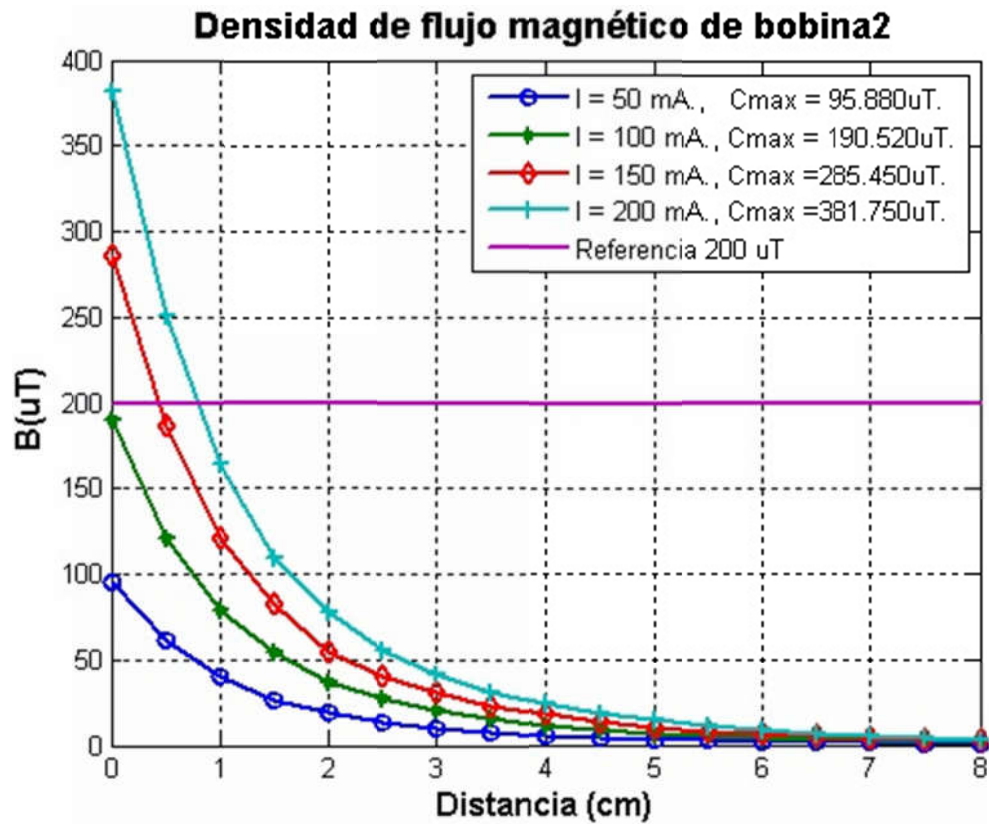


Figura 5.3: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 2 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.

Densidad de flujo magnético de la bobina 2 y I= 50 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	95.880	100	0
2.0	0.5	61.070	63.7	36.3
3.0	1.0	40.050	41.8	58.2
4.0	1.5	26.470	27.6	72.4
5.0	2.0	19.020	19.8	80.2
6.0	2.5	13.830	14.4	85.6
7.0	3.0	10.400	10.8	89.2
8.0	3.5	7.690	8.0	92.0
9.0	4.0	5.840	6.1	93.9
10.0	4.5	4.430	4.6	95.4
11.0	5.0	3.440	3.6	96.4
12.0	5.5	2.730	2.8	97.2
13.0	6.0	2.120	2.2	97.8
14.0	6.5	1.660	1.7	98.3
15.0	7.0	1.320	1.4	98.6
16.0	7.5	1.030	1.1	98.9
17.0	8.0	0.800	0.8	99.2
18.0	8.5	0.630	0.7	99.3
19.0	9.0	0.500	0.5	99.5
20.0	9.5	0.400	0.4	99.6
21.0	10.0	0.320	0.3	99.7
22.0	10.5	0.250	0.3	99.7
23.0	11.0	0.200	0.2	99.8
24.0	11.5	0.160	0.2	99.8
25.0	12.0	0.140	0.1	99.9

Tabla 5.7: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 2 y I= 100 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	190.520	100	0
2.0	0.5	120.940	63.5	36.5
3.0	1.0	79.490	41.7	58.3
4.0	1.5	53.960	28.3	71.7
5.0	2.0	36.380	19.1	80.9
6.0	2.5	27.000	14.2	85.8
7.0	3.0	20.410	10.7	89.3
8.0	3.5	15.300	8.0	92.0
9.0	4.0	11.670	6.1	93.9
10.0	4.5	8.980	4.7	95.3
11.0	5.0	6.990	3.7	96.3
12.0	5.5	5.420	2.8	97.2
13.0	6.0	4.210	2.2	97.8
14.0	6.5	3.310	1.7	98.3
15.0	7.0	2.350	1.2	98.8
16.0	7.5	2.050	1.1	98.9
17.0	8.0	1.580	0.8	99.2
18.0	8.5	1.260	0.7	99.3
19.0	9.0	1.000	0.5	99.5
20.0	9.5	0.790	0.4	99.6
21.0	10.0	0.620	0.3	99.7
22.0	10.5	0.490	0.3	99.7
23.0	11.0	0.390	0.2	99.8
24.0	11.5	0.310	0.2	99.8
25.0	12.0	0.250	0.1	99.9

Tabla 5.8: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 2 y I= 150 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	285.450	100	0
2.0	0.5	186.250	65.2	34.8
3.0	1.0	120.700	42.3	57.7
4.0	1.5	81.930	28.7	71.3
5.0	2.0	54.910	19.2	80.8
6.0	2.5	40.870	14.3	85.7
7.0	3.0	30.760	10.8	89.2
8.0	3.5	22.960	8.0	92.0
9.0	4.0	17.550	6.1	93.9
10.0	4.5	13.500	4.7	95.3
11.0	5.0	10.470	3.7	96.3
12.0	5.5	8.140	2.9	97.1
13.0	6.0	6.330	2.2	97.8
14.0	6.5	4.960	1.7	98.3
15.0	7.0	3.880	1.4	98.6
16.0	7.5	2.960	1.0	99.0
17.0	8.0	2.430	0.9	99.1
18.0	8.5	1.900	0.7	99.3
19.0	9.0	1.490	0.5	99.5
20.0	9.5	1.170	0.4	99.6
21.0	10.0	0.930	0.3	99.7
22.0	10.5	0.730	0.3	99.7
23.0	11.0	0.590	0.2	99.8
24.0	11.5	0.460	0.2	99.8
25.0	12.0	0.370	0.1	99.9

Tabla 5.9: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 2 y I= 200 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	381.750	100	0
2.0	0.5	250.550	65.6	34.4
3.0	1.0	164.050	43.0	57.0
4.0	1.5	109.150	28.6	71.4
5.0	2.0	77.270	20.2	79.8
6.0	2.5	55.750	14.6	85.4
7.0	3.0	41.850	11.0	89.0
8.0	3.5	31.410	8.2	91.8
9.0	4.0	23.710	6.2	93.8
10.0	4.5	18.410	4.8	95.2
11.0	5.0	14.170	3.7	96.3
12.0	5.5	11.060	2.9	97.1
13.0	6.0	8.600	2.3	97.7
14.0	6.5	6.710	1.8	98.2
15.0	7.0	5.300	1.4	98.6
16.0	7.5	4.160	1.1	98.9
17.0	8.0	3.260	0.9	99.1
18.0	8.5	2.570	0.7	99.3
19.0	9.0	2.010	0.5	99.5
20.0	9.5	1.590	0.4	99.6
21.0	10.0	1.250	0.3	99.7
22.0	10.5	0.990	0.3	99.7
23.0	11.0	0.790	0.2	99.8
24.0	11.5	0.620	0.2	99.8
25.0	12.0	0.490	0.1	99.9

Tabla 5.10: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 2, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

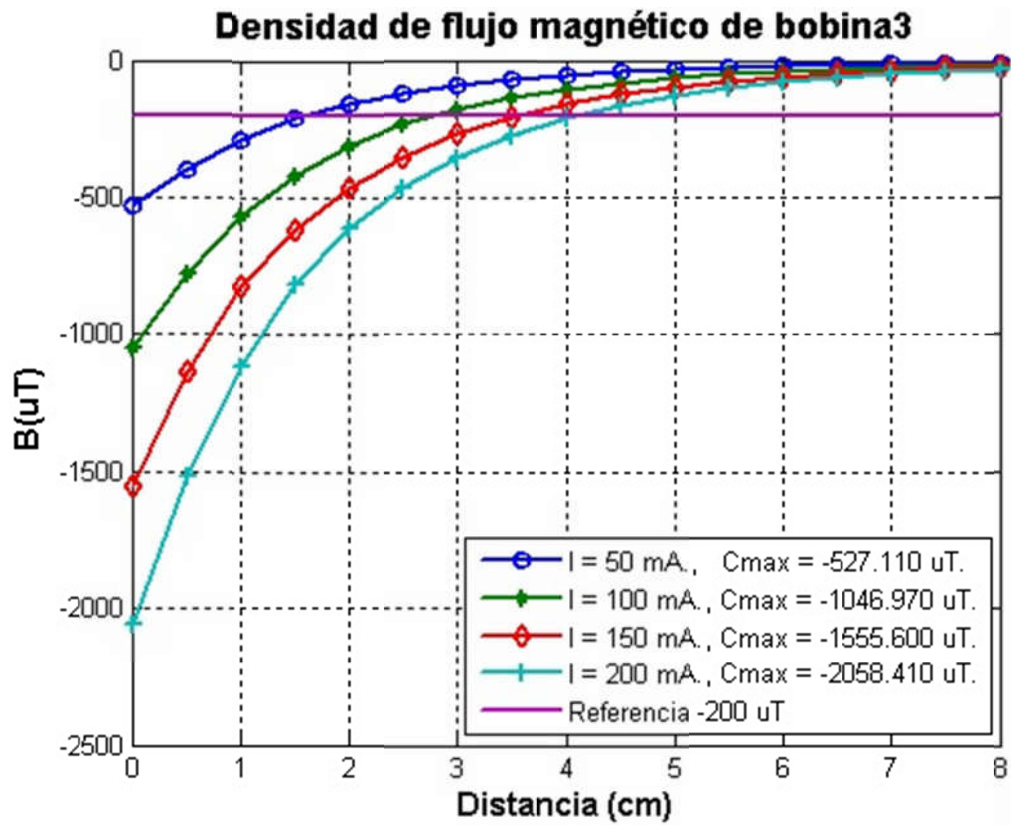


Figura 5.4: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 3 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.

Densidad de flujo magnético de la bobina 3 y I= 50 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-527.110	100	0
2.0	0.5	-398.610	75.6	24.4
3.0	1.0	-288.110	54.7	45.3
4.0	1.5	-211.910	40.2	59.8
5.0	2.0	-155.610	29.5	70.5
6.0	2.5	-117.630	22.3	77.7
7.0	3.0	-89.610	17.0	83.0
8.0	3.5	-68.990	13.1	86.9
9.0	4.0	-53.270	10.1	89.9
10.0	4.5	-41.200	7.8	92.2
11.0	5.0	-32.320	6.1	93.9
12.0	5.5	-25.460	4.8	95.2
13.0	6.0	-19.880	3.8	96.2
14.0	6.5	-15.630	3.0	97.0
15.0	7.0	-12.310	2.3	97.7
16.0	7.5	-9.610	1.8	98.2
17.0	8.0	-7.620	1.4	98.6
18.0	8.5	-5.990	1.1	98.9
19.0	9.0	-4.710	0.9	99.1
20.0	9.5	-3.680	0.7	99.3
21.0	10.0	-2.910	0.6	99.4
22.0	10.5	-2.300	0.4	99.6
23.0	11.0	-1.820	0.3	99.7
24.0	11.5	-1.440	0.3	99.7
25.0	12.0	-1.140	0.2	99.8

Tabla 5.11: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 3 y I= 100 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-1046.970	100	0
2.0	0.5	-779.370	74.4	25.6
3.0	1.0	-565.470	54.0	46.0
4.0	1.5	-420.670	40.2	59.8
5.0	2.0	-308.370	29.5	70.5
6.0	2.5	-233.270	22.3	77.7
7.0	3.0	-177.970	17.0	83.0
8.0	3.5	-137.370	13.1	86.9
9.0	4.0	-106.640	10.2	89.8
10.0	4.5	-83.330	8.0	92.0
11.0	5.0	-64.910	6.2	93.8
12.0	5.5	-50.720	4.8	95.2
13.0	6.0	-39.770	3.8	96.2
14.0	6.5	-31.230	3.0	97.0
15.0	7.0	-24.470	2.3	97.7
16.0	7.5	-19.480	1.9	98.1
17.0	8.0	-15.230	1.5	98.5
18.0	8.5	-11.930	1.1	98.9
19.0	9.0	-9.400	0.9	99.1
20.0	9.5	-7.390	0.7	99.3
21.0	10.0	-5.840	0.6	99.4
22.0	10.5	-4.580	0.4	99.6
23.0	11.0	-3.630	0.3	99.7
24.0	11.5	-2.860	0.3	99.7
25.0	12.0	-2.260	0.2	99.8

Tabla 5.12: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 3 y I= 150 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-1555.600	100	0
2.0	0.5	-1138.200	73.2	26.8
3.0	1.0	-825.600	53.1	46.9
4.0	1.5	-621.300	39.9	60.1
5.0	2.0	-465.900	29.9	70.1
6.0	2.5	-354.700	22.8	77.2
7.0	3.0	-264.700	17.0	83.0
8.0	3.5	-207.000	13.3	86.7
9.0	4.0	-159.000	10.2	89.8
10.0	4.5	-123.200	7.9	92.1
11.0	5.0	-96.930	6.2	93.8
12.0	5.5	-75.700	4.9	95.1
13.0	6.0	-59.300	3.8	96.2
14.0	6.5	-46.570	3.0	97.0
15.0	7.0	-36.800	2.4	97.6
16.0	7.5	-28.820	1.9	98.1
17.0	8.0	-22.780	1.5	98.5
18.0	8.5	-17.720	1.1	98.9
19.0	9.0	-14.120	0.9	99.1
20.0	9.5	-11.160	0.7	99.3
21.0	10.0	-8.730	0.6	99.4
22.0	10.5	-6.870	0.4	99.6
23.0	11.0	-5.460	0.4	99.6
24.0	11.5	-4.290	0.3	99.7
25.0	12.0	-3.420	0.2	99.8

Tabla 5.13: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 3 y I= 200 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-2058.410	100	0
2.0	0.5	-1517.810	73.7	26.3
3.0	1.0	-1112.710	54.1	45.9
4.0	1.5	-816.910	39.7	60.3
5.0	2.0	-613.610	29.8	70.2
6.0	2.5	-462.910	22.5	77.5
7.0	3.0	-354.510	17.2	82.8
8.0	3.5	-273.910	13.3	86.7
9.0	4.0	-211.610	10.3	89.7
10.0	4.5	-164.410	8.0	92.0
11.0	5.0	-128.710	6.3	93.7
12.0	5.5	-100.380	4.9	95.1
13.0	6.0	-78.640	3.8	96.2
14.0	6.5	-61.880	3.0	97.0
15.0	7.0	-48.920	2.4	97.6
16.0	7.5	-38.660	1.9	98.1
17.0	8.0	-30.320	1.5	98.5
18.0	8.5	-24.150	1.2	98.8
19.0	9.0	-19.190	0.9	99.1
20.0	9.5	-15.110	0.7	99.3
21.0	10.0	-12.010	0.6	99.4
22.0	10.5	-9.570	0.5	99.5
23.0	11.0	-7.630	0.4	99.6
24.0	11.5	-6.040	0.3	99.7
25.0	12.0	-4.880	0.2	99.8

Tabla 5.14: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 200 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

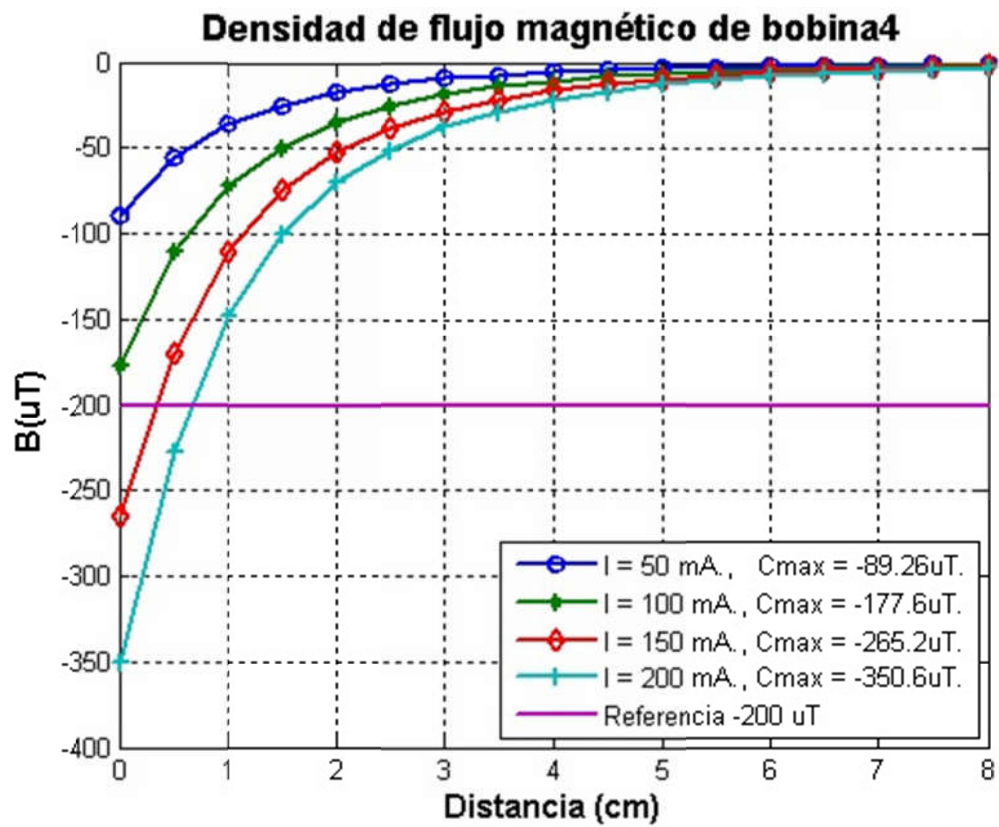


Figura 5.5: Gráfica de la densidad de flujo magnético de la bobina 4 para diferentes intensidades de corriente vs distancia desde la bobina a la punta de prueba.

Densidad de flujo magnético de la bobina 4 y I= 50 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-89.260	100	0
2.0	0.5	-55.040	61.7	38.3
3.0	1.0	-36.000	40.3	59.7
4.0	1.5	-24.580	27.5	72.5
5.0	2.0	-17.440	19.5	80.5
6.0	2.5	-12.620	14.1	85.9
7.0	3.0	-9.160	10.3	89.7
8.0	3.5	-7.030	7.9	92.1
9.0	4.0	-5.320	6.0	94.0
10.0	4.5	-4.070	4.6	95.4
11.0	5.0	-3.180	3.6	96.4
12.0	5.5	-2.470	2.8	97.2
13.0	6.0	-1.920	2.2	97.8
14.0	6.5	-1.510	1.7	98.3
15.0	7.0	-1.180	1.3	98.7
16.0	7.5	-0.930	1.0	99.0
17.0	8.0	-0.720	0.8	99.2
18.0	8.5	-0.570	0.6	99.4
19.0	9.0	-0.450	0.5	99.5
20.0	9.5	-0.350	0.4	99.6
21.0	10.0	-0.280	0.3	99.7
22.0	10.5	-0.220	0.2	99.8
23.0	11.0	-0.170	0.2	99.8
24.0	11.5	-0.140	0.2	99.8
25.0	12.0	-0.110	0.1	99.9

Tabla 5.15: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 4 y I= 100 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-177.600	100	0
2.0	0.5	-110.550	62.2	37.8
3.0	1.0	-71.380	40.2	59.8
4.0	1.5	-49.210	27.7	72.3
5.0	2.0	-34.070	19.2	80.8
6.0	2.5	-25.050	14.1	85.9
7.0	3.0	-18.430	10.4	89.6
8.0	3.5	-13.650	7.7	92.3
9.0	4.0	-10.570	6.0	94.0
10.0	4.5	-8.110	4.6	95.4
11.0	5.0	-6.270	3.5	96.5
12.0	5.5	-4.920	2.8	97.2
13.0	6.0	-3.900	2.2	97.8
14.0	6.5	-3.030	1.7	98.3
15.0	7.0	-2.370	1.3	98.7
16.0	7.5	-1.870	1.1	98.9
17.0	8.0	-1.490	0.8	99.2
18.0	8.5	-1.160	0.7	99.3
19.0	9.0	-0.910	0.5	99.5
20.0	9.5	-0.720	0.4	99.6
21.0	10.0	-0.560	0.3	99.7
22.0	10.5	-0.440	0.2	99.8
23.0	11.0	-0.350	0.2	99.8
24.0	11.5	-0.280	0.2	99.8
25.0	12.0	-0.220	0.1	99.9

Tabla 5.16: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 100 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 4 y I= 150 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-265.200	100	0
2.0	0.5	-170.400	64.3	35.7
3.0	1.0	-110.260	41.6	58.4
4.0	1.5	-74.210	28.0	72.0
5.0	2.0	-52.610	19.8	80.2
6.0	2.5	-37.830	14.3	85.7
7.0	3.0	-28.100	10.6	89.4
8.0	3.5	-21.350	8.1	91.9
9.0	4.0	-15.850	6.0	94.0
10.0	4.5	-12.360	4.7	95.3
11.0	5.0	-9.610	3.6	96.4
12.0	5.5	-7.580	2.9	97.1
13.0	6.0	-5.810	2.2	97.8
14.0	6.5	-4.580	1.7	98.3
15.0	7.0	-3.580	1.3	98.7
16.0	7.5	-2.840	1.1	98.9
17.0	8.0	-2.210	0.8	99.2
18.0	8.5	-1.740	0.7	99.3
19.0	9.0	-1.370	0.5	99.5
20.0	9.5	-1.080	0.4	99.6
21.0	10.0	-0.850	0.3	99.7
22.0	10.5	-0.670	0.3	99.7
23.0	11.0	-0.540	0.2	99.8
24.0	11.5	-0.420	0.2	99.8
25.0	12.0	-0.330	0.1	99.9

Tabla 5.17: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 4, para una intensidad de corriente constante de 150 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobina 4 y I= 200 mA.				
Medición	Distancia (cm)	B(μ T)	%Bt	Atenuación (%)
1.0	0.0	-350.600	100	0
2.0	0.5	-227.300	64.8	35.2
3.0	1.0	-148.400	42.3	57.7
4.0	1.5	-100.230	28.6	71.4
5.0	2.0	-70.010	20.0	80.0
6.0	2.5	-50.760	14.5	85.5
7.0	3.0	-37.420	10.7	89.3
8.0	3.5	-28.410	8.1	91.9
9.0	4.0	-21.630	6.2	93.8
10.0	4.5	-16.500	4.7	95.3
11.0	5.0	-12.710	3.6	96.4
12.0	5.5	-9.900	2.8	97.2
13.0	6.0	-7.760	2.2	97.8
14.0	6.5	-6.070	1.7	98.3
15.0	7.0	-4.730	1.3	98.7
16.0	7.5	-3.760	1.1	98.9
17.0	8.0	-2.940	0.8	99.2
18.0	8.5	-2.300	0.7	99.3
19.0	9.0	-1.830	0.5	99.5
20.0	9.5	-1.430	0.4	99.6
21.0	10.0	-1.130	0.3	99.7
22.0	10.5	-0.890	0.3	99.7
23.0	11.0	-0.700	0.2	99.8
24.0	11.5	-0.560	0.2	99.8
25.0	12.0	-0.440	0.1	99.9

Tabla 5.18: Densidad de flujo magnético producido por la bobina 3, para una intensidad de corriente constante de 50 mA, %Bt porcentaje del total de densidad de flujo de campo y porcentaje de atenuación.

Densidad de flujo magnético de la bobinas B(μT)						
Medición	I (mA)	b1 B(μ T)	b2 B(μ T)	b3 B(μ T)	b4 B(μ T)	b5 B(μ T)
1.0	10.0	16.35	9.590	104.350	17.440	
2.0	20.0	32.64	19.050	207.750	34.820	
3.0	30.0	49.02	28.630	310.750	52.170	
4.0	40.0	65.33	38.220	415.650	69.850	
5.0	50.0	81.68	47.830	518.550	87.000	
6.0	60.0	98.00	57.370	621.250	104.310	
7.0	70.0	114.30	66.980	722.650	122.050	
8.0	80.0	131.18	76.960	824.950	139.380	
9.0	90.0	147.49	86.500	925.850	156.610	
10.0	100.0	163.92	96.030	1026.750	173.600	
11.0	110.0	180.05	105.560	1127.550	191.200	
12.0	120.0	196.60	115.130	1228.350	208.200	
13.0	130.0	212.80	124.780	1328.250	225.900	
14.0	140.0	229.00	134.300	1429.050	243.100	
15.0	150.0	245.30	143.940	1528.650	260.300	
16.0	160.0	261.50	153.420	1628.450	277.400	
17.0	170.0	277.90	162.950	1727.950	294.800	
18.0	180.0	294.10	172.570	1826.450	312.000	
19.0	190.0	310.40	182.120	1925.350	329.000	
20.0	200.0	326.40	191.670	2025.350	346.400	

Tabla 5.19: Densidad de flujo magnético producido por la bobinas, para distintas intensidad de corriente constante.

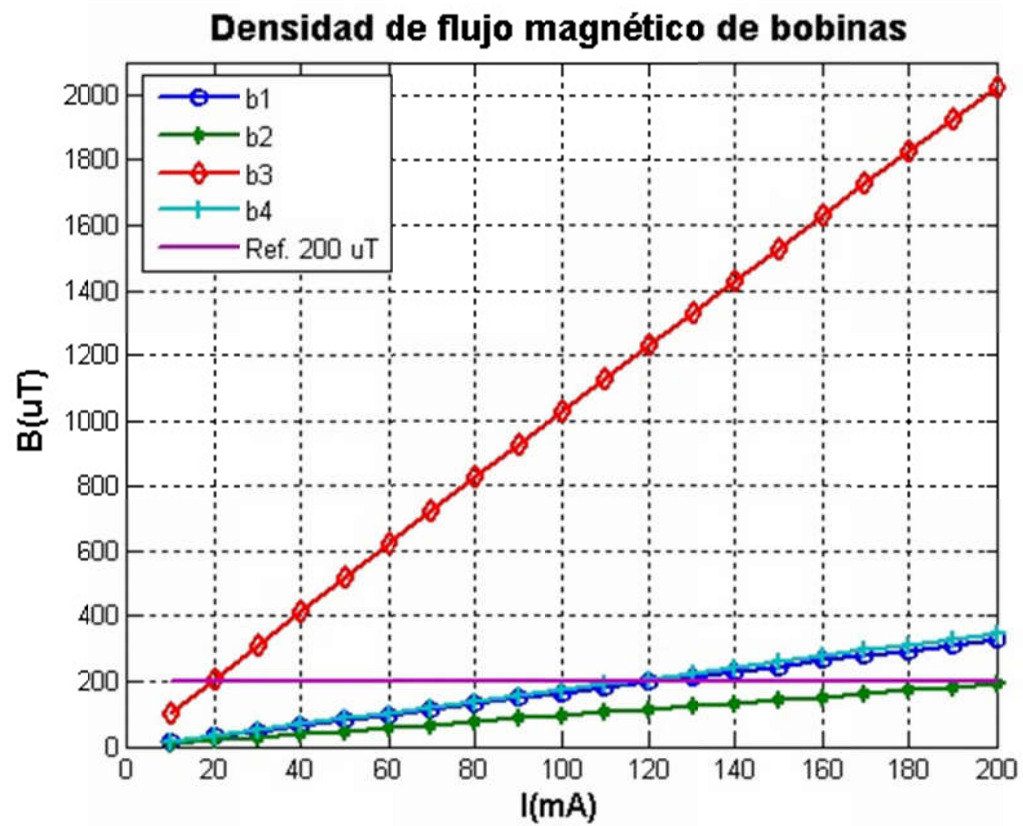


Figura 5.6: Gráfica de la densidad de flujo magnético de las bobinas vs diferentes intensidades de corriente.

5.3 Convolución de campos magnéticos.

En este apartado se muestra el campo resultante de la convolución dos campos magnéticos distintos entre sí.

En la Tabla 5.20 y Tabla 5.21 se presenta las convolución entre dos campos magnéticos, generados al alimentar a dos bobinas con corrientes con forma senoidal, frecuencia de oscilación 1 Hz y 3 Hz y con distintos desfases entre sí. Las bobinas fueron colocadas de tal manera que los polos magnéticos de estas fueron opuestos y coincidentes entre sí para los campos de 1 Hz y 3 Hz respectivamente.

Densidad de flujo de campo magnético entre 2 campos de 1 Hz y desfasados.		
	Amplitud de onda (μT)	Desfasamiento (grados)
1	386	0
2	358	43.2
3	324	72
4	282	86.4
5	224	100.8
6	182	115.2
7	180	129.6
8	160	144
9	154	158.4
10	134	172.8

Tabla 5.20: Densidad de flujo de campo magnético resultante de la convolución en el espacio de 2 campo variantes de 1 Hz y distintas fases entre sí y polaridad opuesta para las bobinas.

Densidad de flujo de campo magnético entre 2 campos de 3 Hz y desfasados.		
	Amplitud de onda (μT)	Desfasamiento (grados)
1	44	0
2	216	63.5294118
3	360	127.058824
4	384	169.411765
5	392	180

Tabla 5.21: Densidad de flujo de campo magnético resultante de la convolución en el espacio de 2 campo variantes de 3 Hz y distintas fases entre sí y polaridad coincidente para las bobinas.

En las siguientes figuras se muestran oscilogramas de la convolución en el espacio de dos campos magnéticos variantes en el tiempo con una frecuencia de 1 Hz y con diferentes desfasamientos. La Figura 5.7 y Figura 5.8 muestran la densidad de flujo de campo magnético detectada para cada uno de las señales que intervienen en esta observación y las señales que lo generan. La señal 1 de 612 mV pico a pico genera una señal de 181 mV pico a pico en la señal analógica de salida del magnetómetro y según el fabricante esta medición equivale medir un campo de 181 μT de pico a pico, igualmente la señal 2 de 1.91 V pico a pico genera un campo de 206 μT pico a pico.

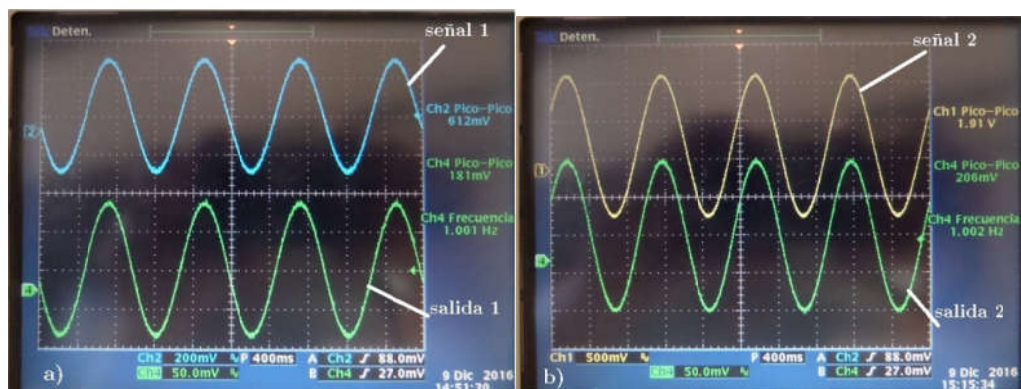


Figura 5.7: Oscilogramas de: a) señal 1 de 612 mV pico a pico genera salida 1 de 181 μT pico a pico, b) señal 2 de 1.91 V pico a pico genera salida 2 de 206 μT pico a pico.

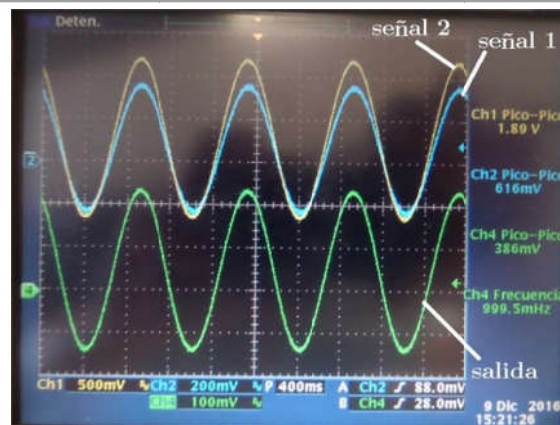


Figura 5.8: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos variantes en el tiempo, con frecuencia de 1 Hz y en fase.

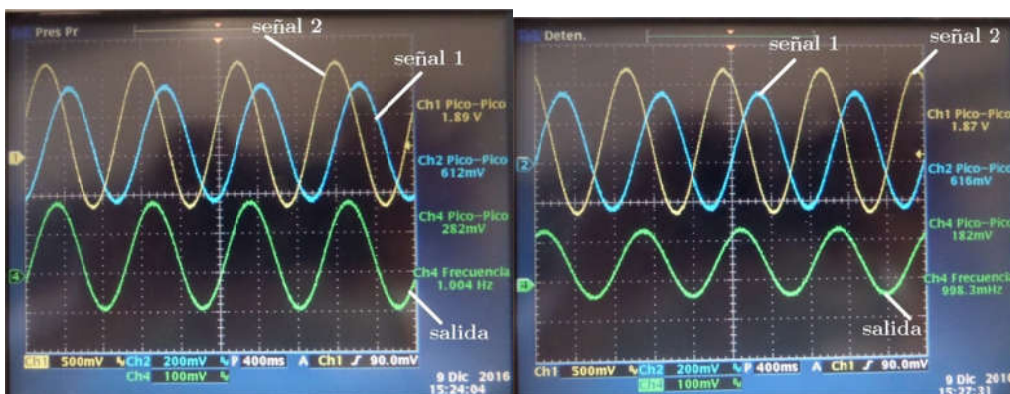


Figura 5.9: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos con frecuencia de 1 Hz, desfase de 86.4 grados (izquierda) y 115.2 grados (derecha).

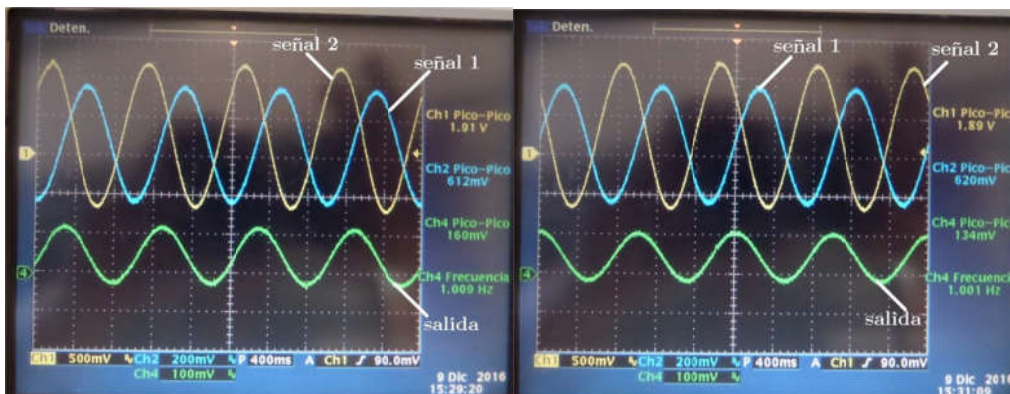


Figura 5.10: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos con frecuencia de 1 Hz, desfase de 144 grados (izquierda) y 172.8 grados (derecha).

En la Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13 y Figura 5.14 se muestra la salida analógica del magnetómetro para la convolución de dos

campos magnéticos cuando a dos bobinas diferentes se les inyecta corrientes variantes en el tiempo de diferentes frecuencias y formas.

Las señales inyectadas en las bobinas que se muestran en las figuras llevan el nombre de “señal 1”, “señal 2” y la salida analógica del magnetómetro lleva el nombre de “salida”. Según las especificaciones del fabricante 2 mT (militeslas) equivalen a 2 V en la señal analógica.

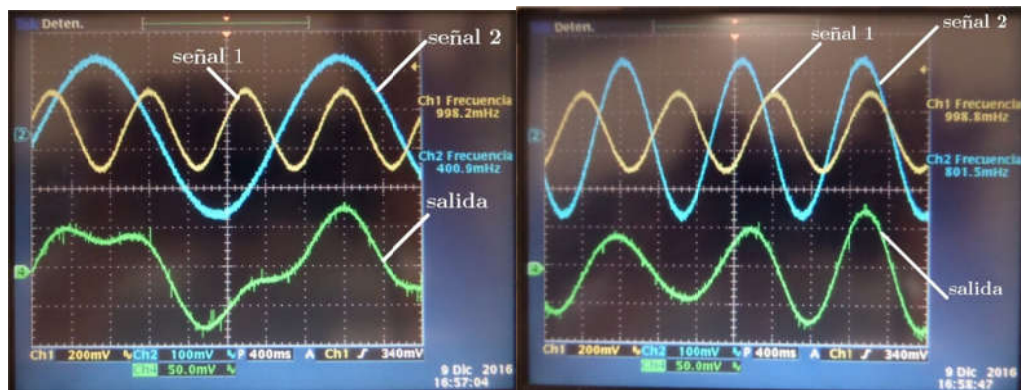


Figura 5.11: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 0.4 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.8 Hz.

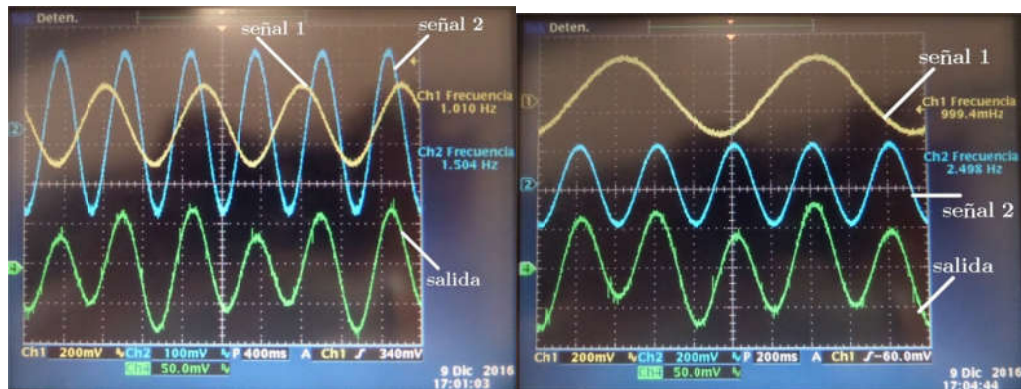


Figura 5.12: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 1.5 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 2.5 Hz.

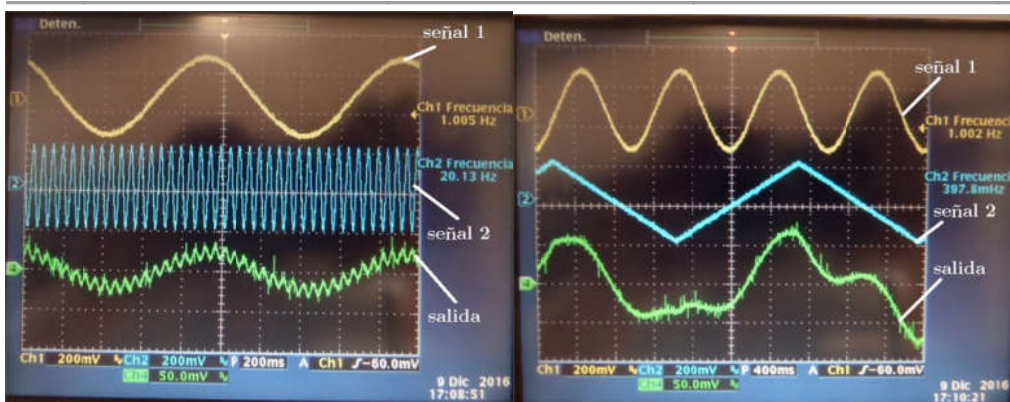


Figura 5.13: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 20 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.8 Hz.

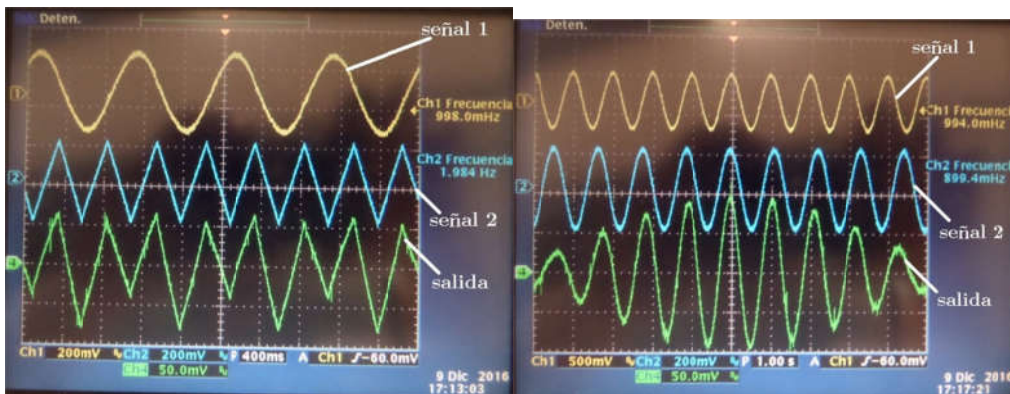


Figura 5.14: Oscilograma de la convolución de dos campos magnéticos para: (izquierda) señal 1 a 1 Hz y señal 2 a 2 Hz, (derecha) señal 1 a 1 Hz y señal 2 0.9 Hz.

5.4 Resonancia estocástica magnética

Para validar y cuantificar el fenómeno de resonancia estocástica magnética es necesario contar con el nivel de ruido magnético que se adiciona al sistema, desafortunadamente, para esta etapa de observación fue imposible medir o cuantificar la cantidad de ruido magnético que era introducido al sistema, ya que el equipo disponible y utilizado para ese fin contaba con la característica de atenuar campos magnéticos que estuvieran por arriba de los 7 Hz. La Figura 5.15, Figura 5.16 y Figura 5.17 se muestran oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para ciertos niveles de ruido magnético introducidos al sistema.

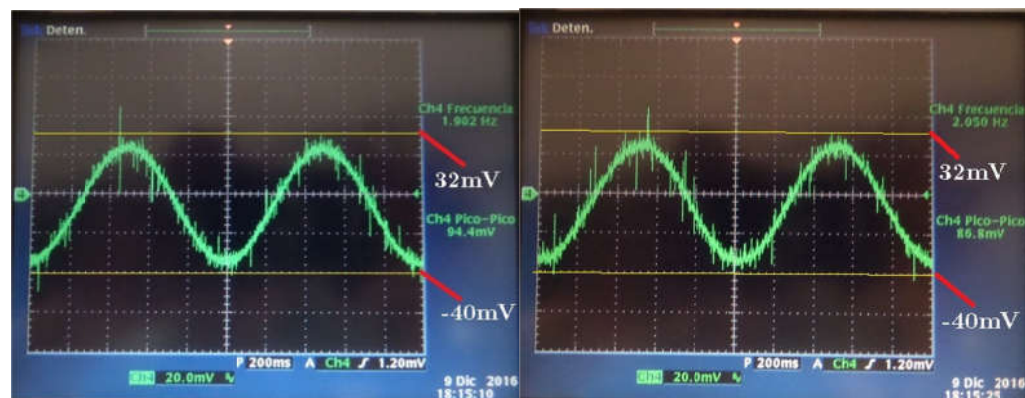


Figura 5.15: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.

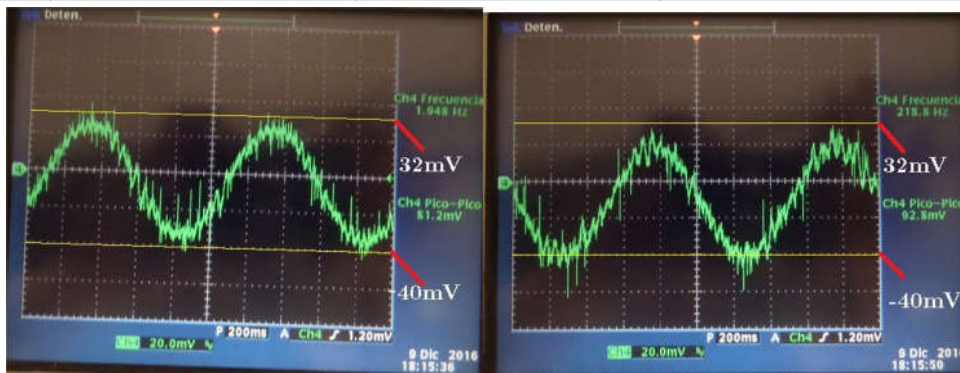


Figura 5.16: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.

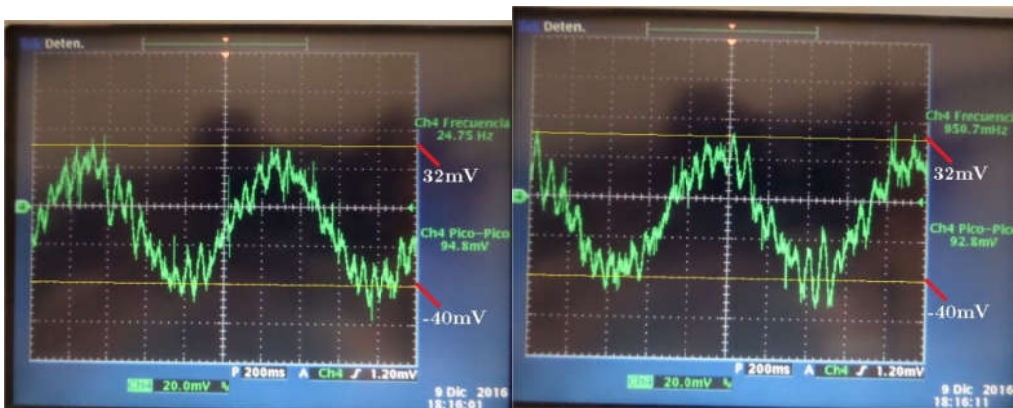


Figura 5.17: Oscilogramas de la salida analógica del magnetómetro para el monitoreo de un campo magnético periódico expuesto a ciertos niveles de ruido magnético.

5.5 Interpretación de resultados

Derivado de los resultados experimentales y las observaciones se tienen las siguientes:

La Tabla 5.1 y las observaciones experimentales nos muestran que el blindaje magnético no es uniforme en todo el interior y que la máxima atenuación se presenta a los 13 cm desde uno de los orificios de la caja de aislamiento, donde se midió que el ruido ambiental se redujo 79.5 veces con respecto al detectado en uno de los orificios, además durante esta actividad se pudo observar que la posición con respecto al piso de la caja de aislamiento y la orientación de la caja con respecto al polo norte magnético de la tierra influye en el nivel de ruido mínimo detectado en el interior de la caja.

Los datos recopilados en la caracterización de las bobinas nos muestran que, la forma cilíndrica contiene parámetros versátiles que nos permiten construir bobinas con distintas propiedades, aunque desafortunadamente este diseño es casi en su totalidad empírico. En cuanto a las mediciones de densidad de flujo de campo magnético se pudo observar que este se atenúa considerablemente cuando se aleja la punta de prueba de la bobina generadora, en particular para esta observación se encontró que el campo se atenúa un 35% a tan solo 0.5 cm de la bobina y casi un 100% para una distancia de 3 cm, aunque estas distancias pueden variar dependiendo del campo máximo que la bobina pueda producir.

Las observaciones y las mediciones realizadas en la etapa de estudio de la convolución de campos magnéticos muestran que, es posible realizar interferencia destructiva y constructiva entre dos campos magnéticos variables y distintos entre sí. Este resultado se considera importante ya que, sustenta el concepto de exponer a un campo magnético periódico a cierto nivel de ruido magnético con el fin de amplificarlo.

Para la etapa experimental sobre la resonancia estocástica magnética no se logró medir y validar el fenómeno, ya que el equipo utilizado en este estudio experimental cuenta con la característica de

atenuar los campos magnéticos variables periódicos mayores a los 7 Hz. Sin embargo como se puede observar en los oscilogramas de la Figura 5.15, Figura 5.16 , Figura 5.17 y los resultados observados en la etapa de convolución de campos magnéticos, se considera que con un nivel adecuado de ruido magnético puede ocurrir el fenómeno de resonancia estocástica magnética, ya que al observar los resultados anteriores la adición de ruido magnético puede amplificar o atenuar los campos magnéticos variantes y periódicos.

Conclusiones

El objetivo general de esta tesis, así como los objetivos particulares se han completado satisfactoriamente, ya que se cuenta con lo siguiente:

Diseño de bobinas que permiten generar campos magnéticos de múltiples intensidades y en particular para este trabajo hasta 200 micro Teslas, así como la caracterización de cada una de ellas en función de la densidad de campo magnético a diferentes distancias.

Diseño base de carrete en el software Solid Works que permite construir bobinas de múltiples características al variar proporcionalmente las dimensiones del diseño, además de contar con una extensión en el carrete que permite fijar y remover la bobina fácilmente del soporte, además de mantener la posición de la misma con respecto a la punta de prueba del magnetómetro, reduciendo errores por posición de la punta de prueba.

Diseño de una estructura o soporte de acrílico utilizado en el proceso experimental que permite manipular y asegurar, desde el exterior de la caja de aislamiento magnético la posición de las bobinas y la punta de prueba que se encuentran dentro. Esto permite disminuir los errores en la posición de la punta de prueba en las mediciones realizadas o por la interferencia de ruido magnético del medio ambiente.

Topologías de circuitos electrónicos que permiten: inyectar una intensidad constante y controlada de corriente eléctrica y una intensidad variante periódica controlada de corriente eléctrica. Estas topologías permiten que las bobinas generen campos magnéticos constantes o variantes en el tiempo con parámetros característicos controlados por el usuario.

Mediciones y observaciones realizadas que mostraron que: existe una gran influencia del ruido magnético del medio ambiente cuando se desea trabajar con campos menores al terrestre, este ruido puede provenir de múltiples fuentes, su intensidad varía con respecto al suelo y con respecto a su orientación con el polo norte magnético por lo que es necesario utilizar una protección magnética adecuada para

contrarrestarlo, también mediante las mediciones realizadas se observó, que se debería de asegurar la posición de la punta de prueba con respecto a la bobina generadora de campo magnético para evitar errores en las mediciones. Otras observaciones propiciadas por las mediciones realizadas en la convolución de campos magnéticos muestran que, es posible generar interferencia constructiva con campos magnéticos periódicos por debajo de los 4 Hz.

Recomendaciones para futuros estudio experimentales

Derivado de este estudio experimental se presenta a continuación algunas consideraciones que se deben tomar en trabajos futuros para continuar el estudio experimental de la resonancia estocástica magnética, como herramienta de optimización del sentido de señales eléctricas débiles. Estas recomendaciones no pretenden agotar en su totalidad todas las posibles consideraciones, el motivo de este apartado es solo contribuir con trabajos futuros.

Debido a las observaciones realizadas y los resultados experimentales obtenidos se identifica que se requiere separar o abordar los siguientes puntos por separado con el fin de estudiarlos más a fondo y así contar con las herramientas necesarias y suficientes para determinar la metodología correcta:

Ruido electromagnético

Durante la experimentación se analizaron distintos tipos de ruido que han sido utilizados en trabajos previos relacionados con la resonancia estocástica, pero ninguno de estos trabajos abordan un estudio realizado con ruido magnético, por lo que se invita a estudiar a fondo las fuentes de ruido magnético y las herramientas matemáticas que nos ayudan a su clasificación, así como también los circuitos electrónicos existentes que pueden generar la clase de ruido deseado. Esta recopilación de información permitirá desarrollar un dispositivo que

pueda generar distintos tipos de ruido, con diferentes características determinadas por el usuario.

Circuitos electrónicos

Una parte importante en la validación de la teoría es que los trabajos experimentales puedan ser repetidos por otras personas interesadas en el tema. Esto se logra controlando o identificando con precisión las variables deseadas o no que pueden afectar los resultados, por lo que se invita a identificar, anular o atenuar las señales electromagnéticas deseadas o no que pueden provenir de los distintos equipos de medición, alimentación y sobretodo revisar las técnicas de construcción de circuitos electrónicos y la atenuación de señales electromagnéticas no deseadas.

En particular durante este proceso experimental se pudo observar que la fuente de poder, el osciloscopio, las puntas de medición del osciloscopio y el ruido electromagnético del ambiente contribuían con señales indeseadas que afectaban el comportamiento y observación del estudio experimental. También se identificó la necesidad de contar con un dispositivo que genere múltiples señales electrónicas y que además pueda emular y controlar algunas señales características de la actividad biológica de los seres vivos, como son el ritmo cardiaco o la actividad cerebral, actividad muscular, etc.

Fuente generadora de campo magnético

La complejidad técnica en la construcción y la relativa exactitud de los parámetros característicos de las boinas como fuente generadora de campo magnético observadas en este estudio experimental, permiten identificar que se debe ampliar considerablemente la información teórica y técnica de las fuentes generadoras de campo magnético, con el fin de identificar las fuentes que mejor se adapten al estudio de la resonancia estocástica magnética y sus características.

Blindaje magnético

Las fuentes de campo magnético naturales y las creadas por el hombre, ha contribuido a que el ser humano este en constante exposición a señales electromagnéticas indeseadas, imperceptibles para el mismo hombre, pero que influyen de manera relevante en el desempeño de equipos y dispositivos, por lo que en esta primera aproximación y en base a las mediciones reportadas en el apartado de resultados de este trabajo se recomienda, ampliar la información sobre el funcionamiento, clasificación y geometría de los materiales aislantes de campos magnéticos no deseados.

En particular en este trabajo se atenuó el ruido magnético del medio ambiente utilizando una caja que estaba construida por tres capas de un material de muy alta permeabilidad llamado mu-metal, el cual tuvo un desempeño destacado al cambiar desde unas decenas de microteslas en el exterior de la caja hasta nanoteslas en la parte central interna de la caja, pero desafortunadamente las dimensiones físicas y el costo económico de este equipo y del material con el que estaba fabricado, no permitieron realizar arreglos experimentales que enriquecieran nuestros resultados. Por lo que se invita a extender la investigación de los materiales y la geometría adecuada del equipo de blindaje magnético con el fin de buscar la mejor opción entre desempeño de atenuación y costo.

Magnetómetro

Las limitaciones reportadas en este trabajo, sobre el equipo de medición de densidad de flujo magnético y propiedades eléctricas, nos exhibe la enorme necesidad de desarrollar o adquirir un equipo capaz de medir en los ejes X Y y Z con precisión y exactitud campos magnéticos constantes y variantes en el tiempo de múltiples y diferentes frecuencias, también es necesario que este equipo obtenga los resultados experimentales y los envíe directamente a una computadora para mejorar y agilizar el procesamiento de datos y la calidad de los mismos. En particular se recomienda utilizar sensores de densidad de flujo magnético llamados sensores flux-gate, el cual debido a su

funcionamiento permite medir campos constantes, variantes en el tiempo y de una intensidad mucho menor al de la tierra.

Estructura de experimentación

En este trabajo se presentó las complicaciones y los efectos que se originan cuando los sensores y las fuentes generadoras de campo magnético no comparten un mismo eje de referencia, por lo que se invita o recomienda utilizar un soporte que permita y asegure la posición de las fuente de campo magnético en un mismo eje de referencia con los sensores de densidad de flujo de campo magnético y que además el material con el que está construido no interfiera en la mediciones o fenómenos observados.

Bibliografía

- [1] Juan Carlos Cheang Wong, "Ley more, nanotecnología y nanociencias: síntesis y modificación de nanopartículas mediante la implantación de iones", Revista digital universitaria, vol. 6, núm. 7,(julio 2010).
- [2] Álvaro Bernal N., "Tendencia de la electrónica integrada y su interacción con la internet", Revista Colombiana de tecnologías avanzadas, vol. 1, núm. 9, 6-16,(2007)
- [3] Erika Póndigo de los Ángeles, "*Experimental characterization and analysis of magneto-conductance performance of 28 nm MOSFETs*", Tesis Doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, (2014).
- [4] F. Sandoval Ibarra, "*El silicio y sus propiedades como material sensor*", Revista Mexicana de Física, 47(2), 107-115,(2001).
- [5] Bowei Zhang, Can E. Korman, and Mona E. Zaghoul, Fellow, "*Circular MAGFET Design and SNR Optimization for Magnetic Bead Detection*", IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 48, No. 11, (2012)
- [6] Roberto Benzi, Giorgio Parisi, Alfonso Sutera, Angelo Vulpiani, "*Stochastic resonance in climatic change*", Tellus 34, 10-16, (1982).
- [7] Roberto Benzi, Alfonso Sutera, Angelo Vulpiani, "*The mechanism of stochastic resonance*", J. Phys. A: Math. Gen. 14, (1981).
- [8] Luca Gammaitoni, Peter Ha"nggi, Peter Jung, Fabio Marchesoni, "*Stochastic Resonance*", Reviews of Modern Physics, Vol. 70, No. 1, January (1998).

-
- [9] N. Grigorenko and P. I. Nikitin, A. N. Slavin, P. Y. Zhou, “*Experimental observation of magnetostochastic resonance*”, J. Appl. Phys. 76 (IO), 15 Noviembre (1994).
- [10] A.N. Grigorenko, P.I. Nikitin, “*Magnetostochastic resonance as a new method for investigations of surface and thin film magnetism*”, General Physics Institute, Applied Surface Science 92 (1996) 466-470.
- [11] Bruce J. Gluckman, Theoden I. Netoff, Emily J. Neel, William L. Ditto, Mark L. Spano, and Steven J. Schiff, “*Stochastic Resonance in a Neuronal Network from Mammalian Brain*”, Physical Review Letters, volume 77, number 19.(1996)
- [12] Haibin Zhang, Fanrang Kong, Siliang Lu, and Qingbo He, “*A Tri-Stable Stochastic Resonance Model and its Applying in Detection of Weak Signal*”, 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Beijing, China, (2013).
- [13] Alexandra Pinto Castellanos, “*Resonancia Estocástica En Red Neuronal Artificial*”, Tesis de Licenciatura, Universidad de los Andes Departamento de Física, 2011.
- [14] Dmitrii G. Luchinsky, Riccardo Mannella, Peter V. E. McClintock, and Nigel G. Stocks, “*Stochastic Resonance in Electrical Circuits—I: Conventional Stochastic Resonance*”, IEEE transactions on circuits and systems—II: analog and digital signal processing, vol. 46, no. 9, (1999)
- [15] Dmitrii G. Luchinsky, Riccardo Mannella, Peter V. E. McClintock, and Nigel G. Stocks, “*Stochastic Resonance in Electrical Circuits—II: Nonconventional Stochastic Resonance*”, IEEE Transactions On Circuits And Systems—II: Analog And Digital Signal Processing, Vol. 46, No. 9, (1999).
- [16] A.N. Grigorenko, P.I. Nikitin, G.V. Roschepkin, “A new technique for high-frequency sub-threshold magnetic field sensing in nanometer scale based upon magnetostochastic resonance,

-
- Sensors and Actuators”, *Sensors and Actuators A: Physical* 59, Issues 1–3, Abril (1997), 277 – 279.
- [17] L. Testa and M. Trapanese, “*Magnetic Stochastic Resonance in systems described by Dynamic Preisach Model.*”, Dipartimento di Ingegneria Elettrica Palermo University, Palermo, Italy, *Physica B* 403, 486–490, (2008).
- [18] Pedro Javier García Ramírez, Jaime Martínez Castillo and Edmundo A. Gutiérrez Domínguez, “*An on-chip magnetic probe based on MOSFET technology*”, *Revista Mexicana de Física* 56 (5) ,423–429(2010).
- [19] Gonzáles Arias ,”*Biomagnetismo vs Magnetobiología*”, *Revista Cubana de Física*, vol. 22, no, 2,188-191,(2005)
- [20] Modesto Sosa “*Biomagnetismo: El Magnetismo de Cuerpo Humano*”, *Acta Universitaria*, vol. 12, no 1,31-43, Abril 2002.
- [21] David Halliday, Robert Resnick, Kenneth S. Krane “*Física volumen 2*” Editorial Continental, sexta edición.
- [22] William H. Hayt Jr., John A. Buck “*Teoría Electromagnética*”, Editorial Mc Graw Hill, séptima edición, traducción Carlos Roberto Pedraza.
- [23] David J. G. “*Introduction to Electrodynamics*”. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall 1999.
- [24] Matthew N. O. Sadiku “*Elementos de electromagnetismo*”, Editorial Oxford University Press, tercera edición.
- [25] F. Langford Smith, “*Radiotron designer’s handbook*”. editorial Wireless Press ,cuarta edición
- [26] H. Wayne Beaty, “*Standard Hadbook for Electrical Engineers*”, editorial McGraw-Hill, sexta edición.
- [27] Robert L. Boylestad Nashelsky, Louis Nashelsky “*Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*”, Editorial Prentice Hall, octava edición.

-
- [28] Robert L. Boylestad, Rodolfo Navarro Salas, “*Introducción al Análisis de Circuitos*”, Editorial Prentice Hall, decimosegunda edición.
- [29] Bruno Ando and Salvatore Graziani, “*Stochastic Resonance, Theory and Applications*”, Kluwer Academic Publishers, (2000).
- [30] B. P. Lathi “Introducción a la Teoría y Sistemas de Comunicación”, Editorial Limusa, primera edición.
- [31] Sergio F. “Design whit operational amplifiers and analog circuits”. 3rd ed. San Francisco: McGraw-Hill 2002.
- [32] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith “*Circuitos Microelectrónicos*”, Editorial Oxford University Press, cuarta edición.

A. Presentación en congreso internacional



2^{do} CONGRESO IBEROAMERICANO DE INSTRUMENTACIÓN Y CIENCIAS APLICADAS
SOMI XXXI
 CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN



CD. DE GUATEMALA, GUA.,
 26 al 28 de octubre de 2016

La Sociedad Mexicana de Instrumentación, el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

a: Froylan Sergio Bello Olivos, Amparo Palomino Merino,
 Pedro Javier García Ramírez, Edmundo Antonio Gutiérrez Domínguez

por haber presentado su trabajo

Estudio experimental de la optimización en el sentido de señales eléctricas débiles mediante resonancia estocástica magnética

CD. DE GUATEMALA, GUA., 28 de octubre del 2016

Por el Comité Organizador

Dr. Rodolfo Zanello Specia
 Director

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

B. Artículo

SOMI XXXI CONGRESO DE INSTRUMENTACIÓN
XXXI Edición, Cd. de Guatemala, Gua., 26 al 28 de octubre de 2016

2 CONGRESO IBEROAMERICANO DE INSTRUMENTACIÓN Y CIENCIAS APLICADAS

ISSN 2395-8499



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA OPTIMIZACIÓN EN EL SENSADO DE SEÑALES ELÉCTRICAS DÉBILES MEDIANTE RESONANCIA ESTOCÁSTICA MAGNÉTICA

Froylan Sergio Bello Olivos, Amparo Palomino Merino
Facultad de Ciencias de la Electrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, Puebla, México,
froylanbello@gmail.com, palomino@ece.buap.mx

Pedro Javier García Ramírez
Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Av. S.S. Juan Pablo II. y Reyes Heróles, S/N, Boca del
Río, Veracruz, México, jagarcia@uv.mx

Edmundo A. Gutiérrez Domínguez
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Luis Enrique Erro # 1, Tonantzintla, Puebla, México,
edmundo@inaoep.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental de la aplicación del ruido magnético en la mejoría de la detección de señales de subumbral, en vez de estropearlas. En general, el experimento consiste en generar campos magnéticos variables en rangos de 50 a 200 micro-Teslas (μT) y en frecuencia entre 1 a 20 Hz.: dichas señales se aplican por medio de bobinas, lo que permitirá llevar a cabo un estudio de su convolución. De igual manera, en este trabajo se presenta un estudio del comportamiento de un campo magnético periódico superpuesto con una señal de ruido magnético, con la finalidad de hallar las condiciones en las cuales el sistema, presenta el fenómeno de resonancia estocástica magnética, permitiendo una amplificación de la señal de interés. El objetivo que se persigue es validar el uso de la resonancia estocástica magnética (R.E.M.), como una prueba de caracterización eléctrica innovadora de dispositivos semiconductores. Se presentan resultados del diseño, construcción y caracterización de las bobinas generadoras de campo magnético, el arreglo experimental para el estudio, se mencionan las características técnicas del equipo de medición y de blindaje magnético, además, los circuitos electrónicos que permiten a las bobinas utilizadas en el experimento, generar los campos magnéticos. Finalmente, se muestran algunos resultados previos sobre la superposición de los campos magnéticos generados por las bobinas.

PALABRAS CLAVE: Resonancia estocástica, ruido magnético, optimización de señales, señales de subumbral.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de sensor señales de pequeña amplitud es un común denominador en diversas disciplinas. El avance tecnológico en la fabricación de dispositivos semiconductores en cuanto al escalamiento de sus dimensiones, ha favorecido un incremento en el desempeño y complejidad de las funciones llevadas a cabo por un circuito integrado, así como también en su densidad. Esto ha generado nuevos retos en áreas como la fabricación, caracterización y confiabilidad, ya que, los equipos de medición junto con el setup experimental requeridos para cumplir con dichas tareas, en algunos casos son inexistentes, o bien su costo de adquisición es tan elevado que muy pocos laboratorios a nivel mundial pueden tener acceso a ellos.



El fenómeno de la resonancia estocástica R.E. [1,2] se presenta cuando a la señal de entrada de un sistema se le añade una señal de ruido externo o inherente al sistema, con la finalidad de amplificar su respuesta. Las condiciones para poder generar este fenómeno son que el sistema sea no lineal y la señal de entrada sea periódica y de subumbral. El cuantificador más aceptado para la R.E. se basa en la intensidad del pico de la relación señal a ruido del sistema.

Los primeros reportes de la observación de la resonancia estocástica fueron presentados en [3], donde se menciona la relación de la modulación periódica de la excentricidad orbital de la tierra y las fluctuaciones de la radiación solar como la causa de la periodicidad de las eras de hielo en la tierra.

Debido a los resultados tan prometedores de la R.E. ha llamado la atención de otras disciplinas, en las cuales se han desarrollado experimentos como [4] en el cual un campo eléctrico variante en el tiempo fue utilizado para entregar señal y ruido directamente a la red de neuronas de un cerebro de mamífero. Como resultado se pudo observar el fenómeno de resonancia estocástica en la respuesta de la red neuronal ante una señal periódica.

En el campo de la Electrónica, se han llevado a cabo experimentos para observar el fenómeno y así poderlo aplicar en el desarrollo de mejores dispositivos. En [5] y [6] se utilizan circuitos electrónicos que fungen el papel de sistemas no lineales para mostrar el desempeño de la resonancia estocástica eléctrica, como resultado, muestran la factibilidad de utilizar el fenómeno para amplificar la señal de salida y para ayudar a estabilizar a los sistemas.

2 MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Materiales

- Magnetómetro Mag-01H de Bartington Instruments con capacidad para medir campos magnéticos de 0.2 mT (milTeslas) a 2 mT, punta de prueba tipo axial y salida analógica de ±2 V para ±2mT.
- Caja de aislamiento magnético TLM5-0100 de Bartington Instruments, la cual está hecha de tres capas de mu-metal (una aleación recocida de 80% de níquel, 4.5% de molibdeno y hierro como equilibrio). Las capas protegen el contenido de un campo magnético externo mediante la desviación de las líneas de flujo magnético alrededor de sí mismos. Los cilindros están dentro de una carcasa de metal no magnético cuadrada, el interior es de forma cilíndrica de 30 cm. de largo por 10 cm. de diámetro.
- 2 Fuentes de voltaje E3630A de Agilent.
- 2 Generadores de funciones Hp 33120A.
- Osciloscopio Tektronix tds1054.
- Multimetro Klein Tool MM1000.
- Calibrador vernier.
- Bobinas generadoras de campos magnéticos en el rango de 50 a 200 micro-Teslas de forma cilíndrica y de dimensiones máximas de 30 cm. de largo y 10 cm. de diámetro.
- Estructura de acrílico que permita montar las bobinas, manipular su posición espacial en la cámara aisladora y además no genera perturbaciones magnéticas.

2.2 Método

El estudio experimental consiste en exponer una bobina, la cual genera un campo magnético periódico, a una señal controlada de ruido magnético generada por otra bobina. La convolución de los campos magnéticos es monitoreada por medio de la punta de prueba del magnetómetro Mag-01H. Para evitar o mantener constante la contaminación de las mediciones con ruido magnético del medio ambiente, se introdujo el arreglo experimental en una caja de aislamiento magnético. El estudio experimental consta generalmente de las siguientes actividades:

- Diseñar y construir estructuras que permitan montar las bobinas y manipular su posición espacial dentro y fuera de la caja de aislamiento magnético. Esto permite caracterizar las bobinas, estudiar el comportamiento tanto de la interferencia constructiva como destructiva de los campos generados por las bobinas y el estudio de la resonancia estocástica magnética.





- Diseñar, construir y caracterizar las bobinas que generan campos magnéticos en el rango de 50 a 200 μT y dimensiones que permiten introducirlas en la cámara de aislamiento magnético.
- Diseñar y construir fuentes de corriente constante y variable para alimentar las bobinas generadoras de campo magnético con una señal de ruido blanco y con una señal periódica no lineal.
- Observar la convolución del campo magnético de 2 bobinas cuando ambas generan campos magnéticos variables de diferente fase.
- Observar el fenómeno de R.E.M.: en esta etapa se utiliza diferentes magnitudes de ruido magnético para determinar las primeras aproximaciones de las condiciones para las cuales el fenómeno sucede.

Durante la realización del estudio experimental se colocó la punta de prueba del sensor de campo magnético o magnetómetro en el eje Z de la bobina, ya que, en ese lugar es en donde se concentra una mayor cantidad de líneas de campo [8-9]. En la Figura 1 se muestra la posición de la punta de prueba con respecto de la bobina.

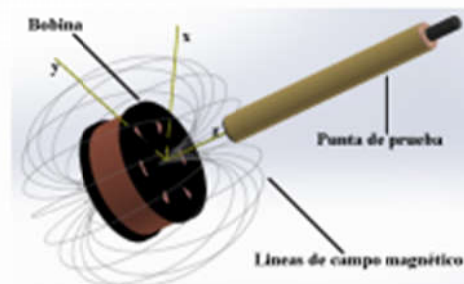


Figura 1: Representación de la posición de la punta de prueba del magnetómetro sobre el eje z de la bobina.

En la Figura 2 se muestra el arreglo experimental para el estudio, así como el soporte dentro de la caja de aislamiento para proteger al experimento del ruido magnético ambiental, incluyendo el terrestre.

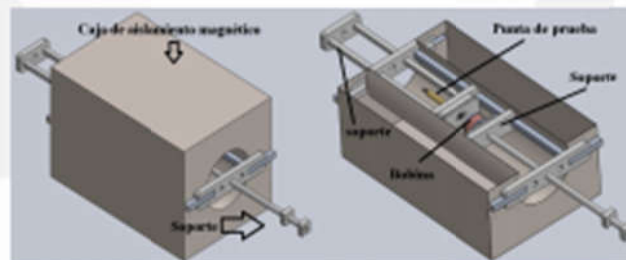


Figura 2: Montaje experimental dentro de la caja de aislamiento magnético y soporte para colocar las bobinas y la punta de prueba para realizar las mediciones.



2.2.1 Soporte para bobinas y punta de prueba.

El soporte para las bobinas está construido en su totalidad de acrílico; consta de dos partes, ver Figura 3. Este diseño permite montar y quitar con facilidad las bobinas y la punta de prueba, modificar la posición entre las mismas, también mantiene en un mismo eje a la bobina y a la punta de prueba, lo que evita cambios en la orientación de los mismos, reduciendo con esto el efecto del ruido que llega a penetrar el blindaje o manteniéndolo constante.

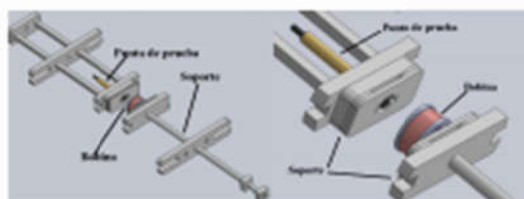


Figura 3: Soporte para las bobinas y la punta de prueba del magnetómetro

Para determinar la distancia en el interior de la caja de aislamiento se colocó una pieza de acrílico sobre el eje que modifica la distancia, esta pieza sirve como referencia móvil. En la Figura 4 se muestra que la distancia entre el punto B y el punto A se puede medir si se fija adecuadamente la referencia móvil y se mide del punto B1 al punto A1.

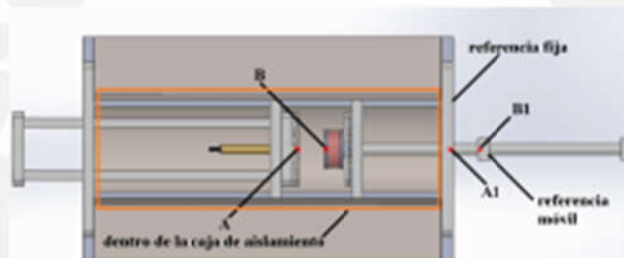


Figura 4: Soporte de acrílico para bobinas y punta de prueba con puntos de referencia, la distancia entre A y B puede ser medida colocando adecuadamente la referencia y midiendo del punto A1 al punto B1.

2.2.2 Bobinas generadoras de campo magnético

Las bobinas utilizadas en este estudio se muestran en la Figura 5. Fueron diseñadas y construidas con las siguientes características:

- Capacidad para generar campos magnéticos de hasta 2mT (militeslas). Para determinar las dimensiones aproximadas de la bobinas según los requerimientos del experimento se utilizó como apoyo la fórmula para determinar el campo magnético de un anillo circular de corriente[B].



- Para su construcción se usó alambre esmaltado calibre 24 y 25 (AWG); el alambre resiste una corriente máxima de 1 Ampere según la información del fabricante.
- El carrete donde se enrolló el alambre fue diseñado en el software Solidworks y construido especialmente en una impresora 3D. El diseño incluye una conexión que permite colocar y retirar con facilidad las bobinas del soporte, además evita cambios en la orientación de la bobina.
- Para mejorar la concentración de las líneas de campo magnético en el núcleo de la bobina, se enrolló el alambre esmaltado de tal manera que este formara aros o espiras de alambre con el menor espacio entre ellas y concéntricas.

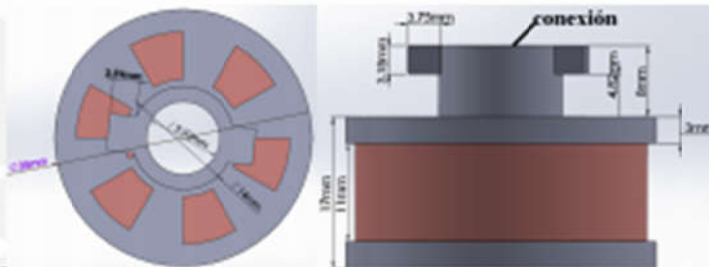


Figura 5: Diseño del carrete para las bobinas con conexión para el soporte que permite colocar y retirar con facilidad las bobinas.

2.2.3 Circuitos de alimentación para las bobinas

En la etapa de caracterización de las bobinas se utilizó el circuito convertidor de voltaje a corriente, también llamado amplificador de transconductancia, de manera más específica, el circuito llamado bomba de corriente Howland mejorado que se muestra en la Figura 6. Este circuito permite entregar una cantidad constante de corriente a la carga, independientemente del tipo o valor de resistencia de ésta [7].

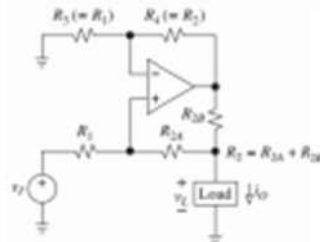


Figura 6: Circuito electrónico convertidor de voltaje a corriente, también llamado amplificador de transconductancia o bomba de corriente Howland mejorado.

Para garantizar que el circuito se comporte como una fuente de corriente es necesario que las cuatro resistencias que se muestran en la Figura 6, formen un puente balanceado como se muestra en la ecuación (1), el



voltaje de la carga V_L debe satisfacer la ecuación (2), donde V_i es el voltaje de entrada y V_{sat} es el voltaje de alimentación del amplificador operacional.

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \quad (1)$$

$$|V_L| \leq |V_{sat}| - (R_2/R_1)|V_i| \quad (2)$$

Cuando se cumplen las condiciones (1) y (2), la corriente i_b que entrega el circuito a la carga se puede expresar de la forma:

$$i_b = \frac{R_2 - R_1}{R_{2R}} \quad (3)$$

Las señales periódicas y la señal de ruido fueron obtenidas del generador de funciones Hp 33120⁶ y para suministrar la corriente adecuada a las bobinas se utilizó un circuito seguidor de voltaje con el amplificador operacional OPA564 de Texas Instruments, que tienen la capacidad de entregar 1.5 Amper, el circuito incluye una etapa de protección sugerida por el fabricante, también se utilizó el amplificador operacional LA6500 de On semiconductor. Para estudiar la convolución en el espacio se utilizó el circuito cambiador de fase [7].

3 RESULTADOS

Al momento de escribir el presente texto no se ha concluido el estudio experimental a la resonancia estocástica magnética, pero los resultados particulares que son presentados a continuación nos muestran que existe una gran posibilidad de observar el fenómeno en un corto plazo de tiempo.

En la figura 7 se muestra el soporte de acrílico para colocar las bobinas y la punta de prueba del magnetómetro durante el proceso de experimentación; también se muestra el soporte dentro de la caja de aislamiento magnético.



Figura 7: Soporte de acrílico, bobina y punta de prueba fuera (izquierda) y dentro (derecha) de la caja de aislamiento magnético.

Para el estudio experimental se construyeron bobinas con forma cilíndrica, núcleo de aire, multicapa, se utilizó alambre de cobre esmaltado de calibre 24 y 25; el alambre fue enrollado en carretes fabricados en plástico por una impresora 3D y se construyeron tres tamaños diferentes de bobinas, todas ellas con un diámetro interno de 10 mm y 10 mm de longitud. Las características de algunas bobinas se muestran en la Tabla 1.



Tabla 1: Características de 3 bobinas utilizadas en el estudio experimental de R.E.M.

Bobina	Calibre del alambre (AWG)	Diámetro externo (mm.)	Vueltas por capa	Número de capas de alambre	Resistencia Ω (Ω)	Inductancia mH.
1	24	34	26	22	10.8	6.89
2	25	34	15	22	3.3	2.0934
3	24	65	21	55	33.3	42.02

En la figura 8 se presenta la gráfica de la caracterización del campo magnético de la bobina 3. Para dicha prueba se alimentó a las bobinas con 4 distintos niveles de corrientes constantes. La gráfica muestra distintas condiciones de operación, esto es, campo magnético medido a diferentes distancias entre la punta de prueba y la bobina 3. Ya que uno de los objetivos es generar campos de hasta $200 \mu\text{T}$, se colocó en la gráfica de la figura 8 una línea de referencia en los $-200 \mu\text{T}$, con el objetivo de analizar la distancia a la cual la punta de prueba podría medir los $200 \mu\text{T}$ deseados.

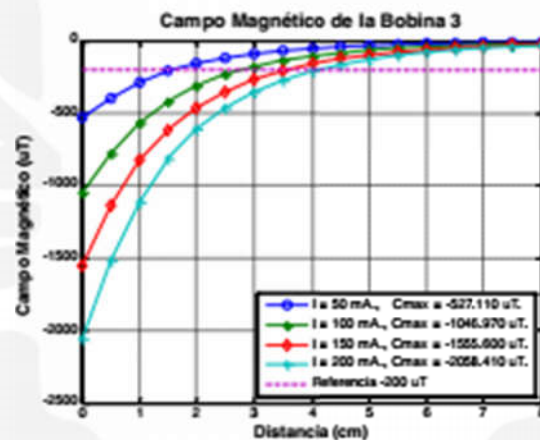


Figura 8: Campo magnético de la bobina 3 vs distancia entre la bobina y la punta de prueba del magnetómetro para diferentes corrientes eléctricas constantes.

En la figura 9 se presentan los oscilogramas obtenidos como resultado del estudio experimental de la convolución en el espacio entre campos magnéticos variables producidos por diferentes bobinas. Se puede observar en la parte superior de cada oscilograma la forma de las señales que son aplicadas a dos bobinas (I_{n1} e I_{n2}) y el desfaseamiento entre las mismas. En la parte inferior de cada oscilograma se muestra la señal Out que corresponde a la salida analógica del magnetómetro.



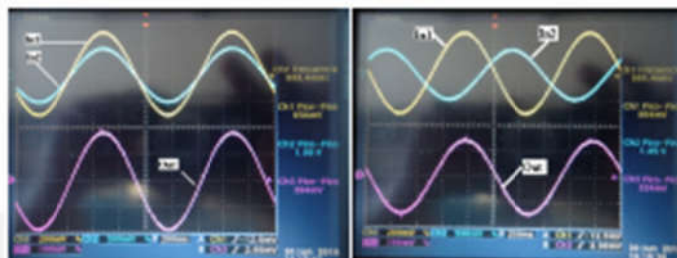


Figura 9: Oscilograma que muestra las señales con las que se estimulan las bobinas (In1 e In2), el desfaseamiento entre ellas y la respuesta del magnetómetro a este estímulo (Out) para dos distintos desfaseamientos de las señales.

Estos oscilogramas muestran que el campo magnético resultante de la convolución en el espacio es de 394 μT . de pico a pico cuando se encuentran en fase, y es de 324 μT . cuando existe un desfaseamiento de aproximadamente 144° o 400 ms.

4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados experimentales mostrados en osciloscopio, es factible la posibilidad que campos magnéticos interactuando en el espacio de manera constructiva y destructiva permita establecer las bases de operación de la R. E. M.

Se considera que el proceso de construcción de bobinas generadoras de campo magnético es crucial en la uniformidad e intensidad del campo magnético.

La caracterización de las bobinas que se presenta en este trabajo, muestra que la intensidad de campo magnético deseada puede ser alcanzada a distintas distancias, siempre y cuando se utilice la cantidad de corriente adecuada, se tome en cuenta las características físicas de los componentes que se utilizan para la construcción de las bobinas, la orientación espacial de las bobinas sea constante y se mantenga controlada la interferencia del ruido magnético del medio ambiente.

Se observa que el veloz decaimiento del campo magnético cuando se aleja la punta de prueba debe ser analizado minuciosamente en futuras aplicaciones, ya que como se muestra en los resultados, el campo magnético cambia bruscamente en posiciones relativamente cercanas al interior de la bobina.

Como trabajo a futuro queda observar y registrar las condiciones para las cuales se presenta el fenómeno de (R.E.M.).

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones por su apoyo académico y económico:

- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (B. U. A. P.).
- Maestría en Ciencias de la Electrónica, Opción Automatización de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la B. U. A. P.
- Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.
- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.


REFERENCIAS

- [1] Benzi R., Sutera A. and Vulpiani A., The Mechanism of Stochastic Resonance, *J. Phys. A: Math. Gen.*, 1981;14 :453-57.
- [2] Gammationi L.,Hänggi P., Jung P. and et al., Stochastic Resonance, *Rev. Mod. Phys.*, 1998; 70: 223-87.
- [3] Benzi R., Parisi G., Sutera A. and et al., Stochastic Resonance in Climatic Change, *Tellus*, 1982;34 :10-16.
- [4] Gluckman B. J., Theoden I. N., Neal E. J., and et al. , Stochastic Resonance in a Neuronal Network from Mammalian Brain, *Rev. Mod. Phys.*, 1996; 77: 4098-111.
- [5] Luchinsky D. G., Mannaella R, McClintock P. V. E., and et al., Stochastic Resonance in Electrical Circuits—It Conventional Stochastic Resonance , *IEEE transactions on circuits and systems—It: analog and digital signal processing*, 1999; 46: 1205-14.
- [6] Alexandra P.C. Resonancia Estocástica En Red Neuronal Artificial, Tesis de
- [7] Sergio F. Design whit operational amplifiers and analog circuits. 3rded. San Francisco: McGraw-Hill 2002.
- [8] David J. G. Introduction to Electrodynamics. 3rded. New Jersey: Prentice Hall 1999.
- [9] David H., Robert R.,Kenneth S.K. Physics vol. 2. Extended version. 4th ed. John Wiley & Sons. Michigan 1992.



C. Diseños

C.1 Diseño de carretes.

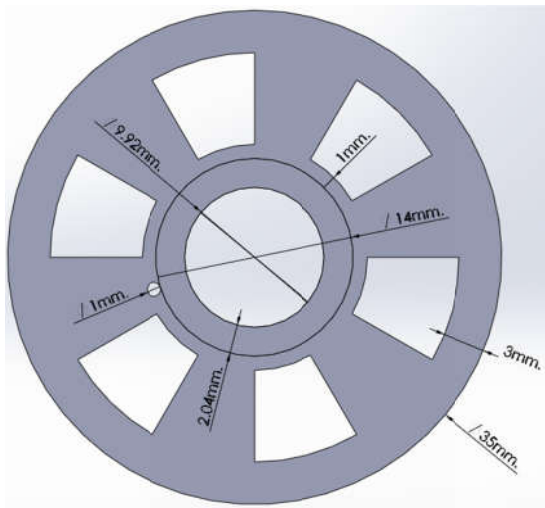


Figura C.1: Vista frontal de la pieza 1 del carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.

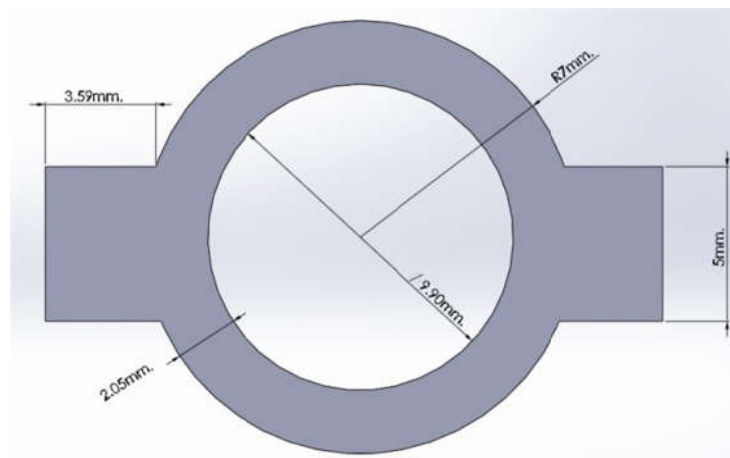


Figura C.2: Vista frontal del conector para el carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.



Figura C.3: Vista lateral de la pieza 1 del carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.

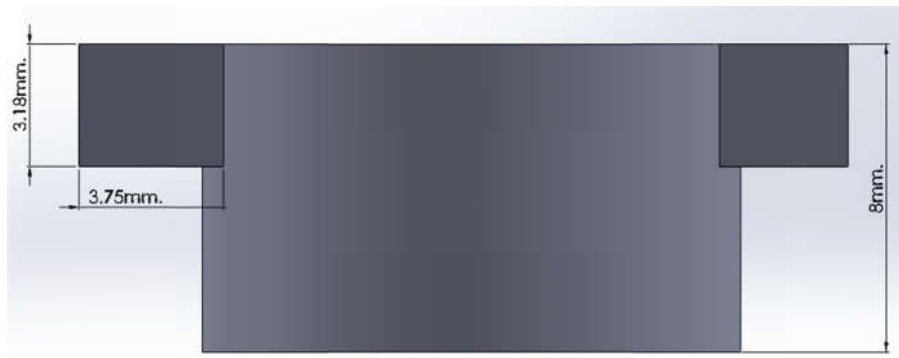


Figura C.4: Vista lateral del conector para el carrete diseñado en el software Solidworks y contruido por un aimpresora 3D.

C.2 Diseño del soporte.

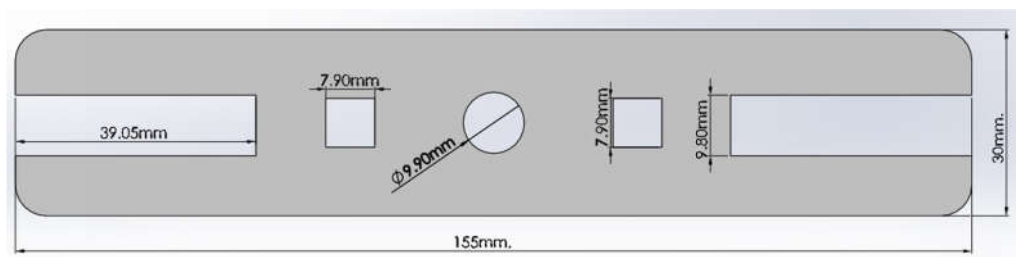


Figura C.5: Pieza 1 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.

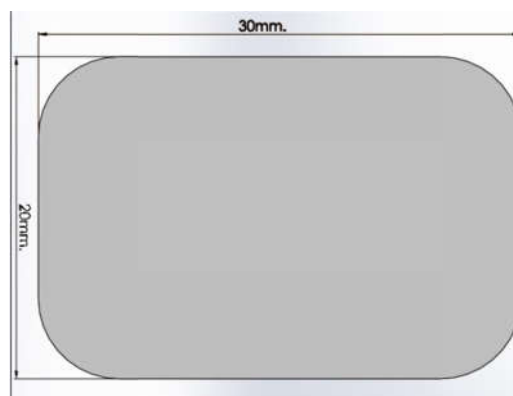


Figura C.6: Pieza 2 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.

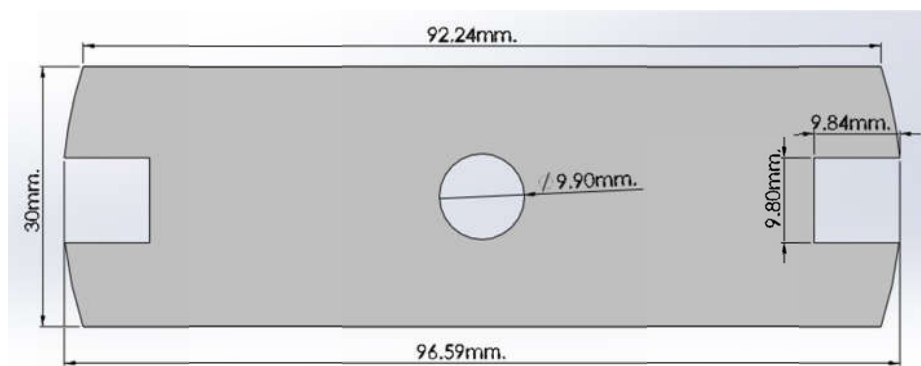


Figura C.7: Pieza 3 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.

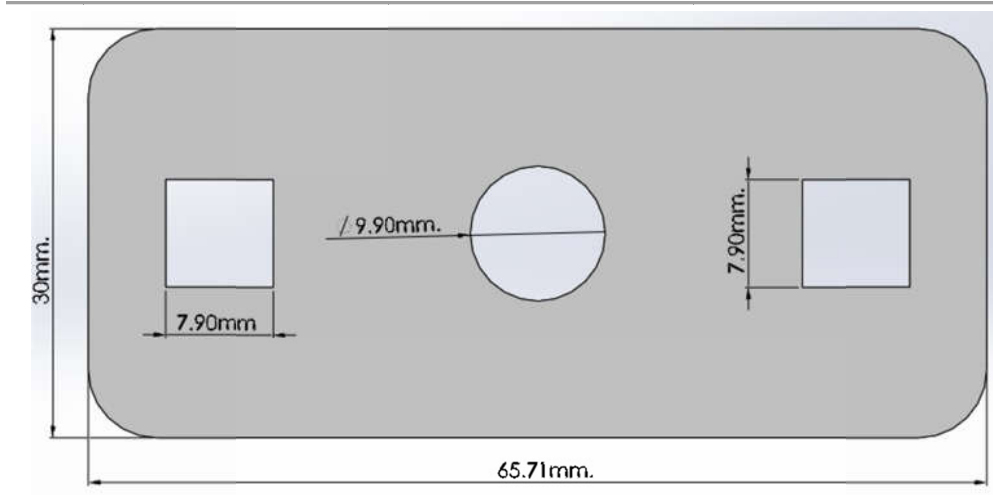


Figura C.8: Pieza 4 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.

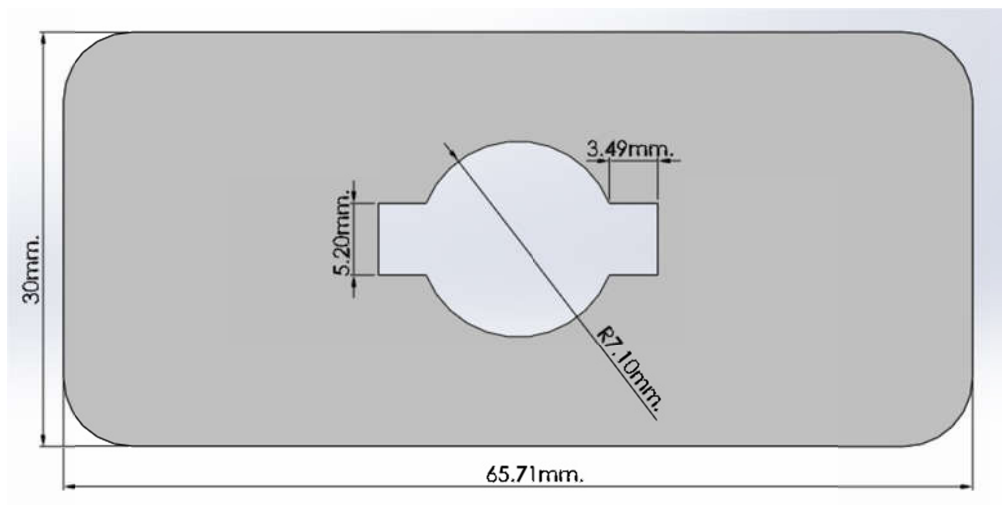


Figura C.9: Pieza 5 del soporte para introducir las bobinas y la punta de prueba al magnetómetro.

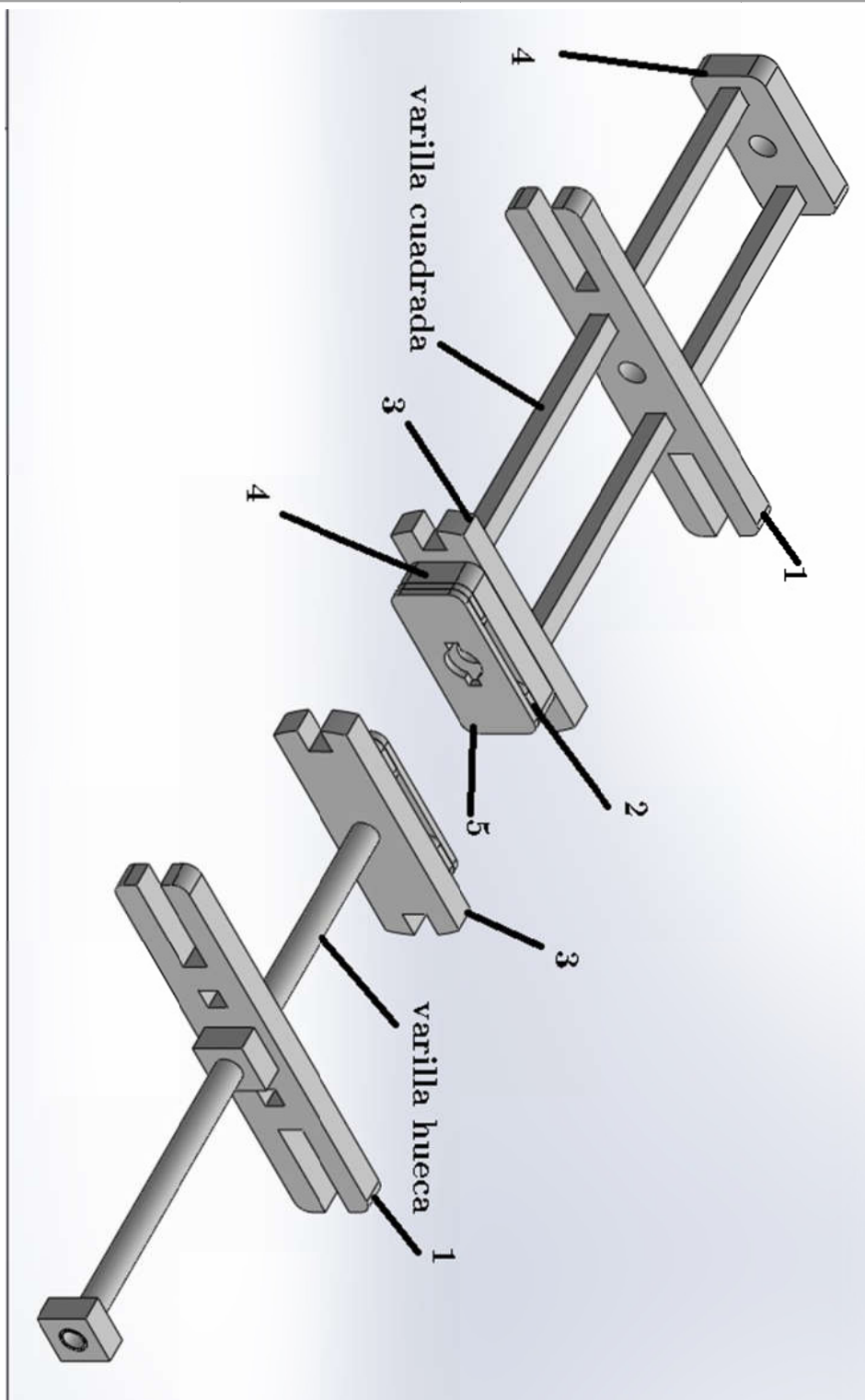


Figura C.10: Posición de las piezas que componen el soporte. La varilla hueca es de 9.5 mm. de diámetro y la varilla cuadrada es de 8 mm. X 8 mm.