



DESARROLLO DE UN SENSOR PARA LA DETECCIÓN DE NANOPARTÍCULAS MAGNÉTICAS BASADO EN UN MICROHILO AMORFO FERROMAGNÉTICO CON MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE (GMI).

Beatriz Duato Olmos

Tutor: Dr. Héctor García Miquel

Dpto. Ingeniería Electrónica

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2021-22

Valencia, 3 de julio de 2021



Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado muestra el estudio sobre el comportamiento de los microhilos amorfos ferromagnéticos como sensores. Para ello, se han empleado nanopartículas magnéticas como materiales de investigación.

El uso de este tipo de materiales requiere adquirir previamente una base de conceptos teóricos como son, el efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI), las propiedades de los materiales amorfos, profundizando en los vidrios metálicos en forma de microhilos y, para concluir, detallar los diferentes materiales magnéticos y las principales características que presenta el magnetismo.

Este estudio tiene como principal objetivo establecer una síntesis acerca de cómo la detección de las nanopartículas magnéticas incide en el mundo sensorial, tanto a nivel tecnológico como biomédico.

De manera análoga, resulta interesante la idea de implementar un acondicionador capaz de detectar las variaciones obtenidas tras la deposición de las nanopartículas en los microhilos ferromagnéticos a diferentes concentraciones.

Sin duda, tras conocer los resultados obtenidos, resulta sugerente continuar descubriendo nuevas aplicaciones sobre la detección de nanopartículas. Indagando, a nivel personal, en el mundo de la nanotecnología y los nanobiosensores.

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau mostra l'estudi sobre el comportament dels microfils amorfs ferromagnètics com sensors. Per eixe motiu, s'han utilitzat nanopartícules magnètiques com materials d'investigació.

L'ús d'aquest tipus de materials requereix adquirir prèviament una base de conceptes teòrics com són, l'efecte de la Magnetoimpedancia Gegant (GMI), les propietats dels materials amorfs, profunditzant en els vidres metàl·lics en forma de microfils i, per a concloure, detallar els diferents materials magnètics i les principals característiques que presenta el magnetisme.

Aquest estudi té com objectiu principal establir una síntesi sobre com la detecció de les nanopartícules magnètiques incideix en el món sensorial, tant a nivell tecnològic com biomèdic.

De manera anàloga, resulta interessant la idea d'implementar un condicionador capaç de detectar les variacions obtingudes després de la deposició de les nanopartícules en els microfils ferromagnètics a diferents concentracions.

Sens dubte, després de conèixer els resultats obtinguts, resulta sugerent continuar descobrint noves aplicacions sobre la detecció de nanopartícules. Indagant, a nivell personal, en el món de la nanotecnologia i els nanobiosensors.

Abstract

This Final Degree Project shows the study on the behavior of ferromagnetic amorphous microwires as sensors. For this reason, magnetic nanoparticles have been used as research material.

The use of this type of material requires previously acquiring a base of theoretical concepts such as the effect of the Giant Magnetoimpedance (GMI), the properties of amorphous materials, delving into the metallic glasses in the form of microwires and, to conclude, detailing the different magnetic material and the main characteristics of magnetism.



The main objective of this study is to establish a synthesis on how the detection of magnetic nanoparticles affects the sensory world, both at a technological and biomedical level.

Similarly, the idea of implementing a conditioner capable of detecting the variations obtained after the deposition of the nanoparticles in the ferromagnetic microwires at different concentrations is interesting.

Without a doubt, after knowing the results obtained, it is suggestive to continue discovering new applications on the detection of nanoparticles. Researching, on a personal level, the world of nanotechnology and nanobiosensors



Índice

Capítulo 1.	Objetivos	3
Capítulo 2.	Introducción	4
2.1	Historia del magnetismo.....	4
Capítulo 3.	Microhilos amorfos ferromagnéticos	5
3.1	Materiales amorfos.....	5
3.2	Efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI)	6
3.2.1	Historia: Efecto de la Magnetorresistencia Gigante (GMR)	6
3.2.2	Magnetoimpedancia Gigante (GMI)	7
3.3	Materiales magnéticos.....	8
3.3.1	Diamagnéticos.....	9
3.3.2	Paramagnéticos.....	9
3.3.3	Ferromagnéticos.....	9
3.4	Histéresis magnética.....	10
Capítulo 4.	Metodología de trabajo.....	12
4.1	Organigrama.....	12
Capítulo 5.	Sistema de medidas	13
5.1	Método de medida.....	13
5.2	Instrumentos de medida	14
Capítulo 6.	Sistema de calibración.....	16
Capítulo 7.	Caracterización estructural y morfológica del microhilo	18
7.1	Introducción	18
7.2	Proceso del montaje de muestras	18
Capítulo 8.	Partículas magnéticas y ferrofluido.....	21
8.1	Ferrofluido.....	21
8.1.1	Proceso de elaboración.....	21
Capítulo 9.	Análisis del efecto GMI	24
9.1	Deposición de partículas	27
9.1.1	Partículas de hierro, Fe (tamaño entre 50µm y 80µm).....	28
9.1.2	Partículas de carbonil de hierro, FeO ₂ (tamaño entre 5µm y 8µm	31
9.1.3	Nanopartículas o ‘nanotinta’ (tamaño entre 10nm y 90nm).....	34
Capítulo 10.	Diseño de un sensor y acondicionador para la detección de nanopartículas magnéticas	37
10.1	Diseño. Etapas del acondicionador.	37
10.1.1	Fuente de corriente	37



10.1.2	Rectificador de media onda con salida positiva	39
10.1.3	Filtro paso bajo.....	40
10.1.4	Amplificador	42
10.1.5	Restador.....	43
10.2	Resultados experimentales	45
10.3	Diseño en el entorno Pspice	49
Capítulo 11.	Resultados y Conclusiones.....	50
11.1.1	Primera hipótesis: Desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados).....	53
11.1.2	Segunda hipótesis: Variación decreciente de la impedancia que presenta la muestra.	54
Capítulo 12.	Bibliografía.....	56
ANEXO A.	Inserción del código de calibración en Labview	58
ANEXO B.	Manual del software de medida. Programa LabView.....	59
ANEXO C.	Diseño del circuito acondicionador en OrCAD.....	62



Capítulo 1. Objetivos

Uno de los requisitos fundamentales a la hora de iniciar un proyecto es identificar y detallar los objetivos a alcanzar.

En primer lugar, uno de los objetivos es aprender a desarrollar técnicas para el montaje y caracterización eléctrica, magnética y morfológica de microhilos amorfos ferromagnéticos, y a realizar un estudio teórico de los vidrios metálicos. Junto con esto, se realizará un breve estudio del efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI) en este tipo de materiales magnéticos y, a continuación, representando dicho efecto para diferentes frecuencias de trabajo y corrientes de excitación se podrá comprobar la variación de GMI en función de ambos parámetros.

En segundo lugar, se abarca el objetivo principal del proyecto haciendo uso de nanopartículas magnéticas de distintos tamaños, propiedades magnéticas y concentraciones. Se realizará un estudio sobre los microhilos amorfos con GMI para comprobar si son capaces de detectar dichas partículas y qué comportamiento adquieren tras su deposición.

Finalmente, a raíz del fenómeno descrito en todo el proyecto (GMI) se diseñará un sensor/acondicionador para la detección de nanopartículas magnéticas. Dentro de la variedad existente de partículas, se han empleado partículas magnéticas de hierro (tamaño entre 50 μm y 80 μm), partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre 5 μm y 8 μm), y nanopartículas magnéticas (tamaño entre 10nm y 90nm).



Capítulo 2. Introducción

2.1 Historia del magnetismo

El ser humano conoce el magnetismo desde épocas tempranas. El fenómeno del magnetismo era conocido desde la antigua Grecia y fue el filósofo griego Tales de Mileto quien observó la atracción del imán natural, la magnetita con el hierro. Se observaba que algunos materiales, como ciertos metales ferromagnéticos (en especial el hierro, níquel, cobalto y sus aleaciones) poseen la capacidad de ser atraídos por un imán. [1]

No fue entonces hasta finales del siglo XII, llegó la brújula a Occidente. La invención de la brújula y su uso para orientarse fue clave en el desarrollo de la navegación y en la exploración del mundo, aunque actualmente es sustituido por sistemas de posicionamiento como el GPS. Las aplicaciones que se realizan en la actualidad son variadas y la ciencia del magnetismo se ha vuelto central en nuestra vida cotidiana. Desde su uso en objetos como el altavoz, las tarjetas de crédito o en el almacenamiento de datos en cintas magnéticas, hasta en aplicaciones tecnológicas más avanzadas como equipos de diagnóstico médico.

No obstante, en la última década los fenómenos de Magnetotransporte se han tornado un tópico de alto interés científico y tecnológico. Este interés surgió debido al descubrimiento de los fenómenos de Magnetorresistencia Gigante (GMR) y la Magnetoimpedancia Gigante (GMI) en aleaciones magnéticamente blandas en forma de hilos, cintas, películas y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino. El interés del efecto GMI [2] en hilos ferromagnéticos se encuentra en la sensibilidad ante la aplicación de un campo superpuesto a un campo circunferencial de baja amplitud. Los hilos amorfos basados en cobalto son el mejor ejemplo de una respuesta óptima de GMI, característicos por su baja magnetostricción, $\lambda_s = 10^{-7}$, siendo esta la propiedad que poseen los materiales magnéticos para hacer variar su volumen cuando se encuentran sometidos a un campo magnético.

Capítulo 3. Microhilos amorfos ferromagnéticos

En este capítulo se presentan algunos conceptos teóricos necesarios para la comprensión de los resultados obtenidos experimentalmente.

En primer lugar, se encuentra brevemente explicado el concepto de los materiales amorfos, dándole hincapié al caso particular de los vidrios metálicos en forma de microhilos [3]. Posteriormente, se abordará el efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI) y para concluir esta sección, se detallarán los diferentes materiales magnéticos y las principales características que presenta el magnetismo.

3.1 Materiales amorfos

Los materiales amorfos presentan una disposición interna de átomos, moléculas o iones desordenada a diferencia de los materiales cristalinos, que son aquellos materiales sólidos cuya estructura atómica interna se repite de manera ordenada y siguiendo una simetría. Los materiales amorfos son conocidos como *metales vítreos* o *vidrios metálicos*, debido a su estructura desordenada producida de forma directa desde el estado líquido durante la solidificación por subenfriamiento.

Para la fabricación de los metales vítreos el método clásico es el enfriamiento ultrarrápido. El objetivo de este método es lograr condensar los átomos en un estado de desorden evitando la cristalización natural. Los vidrios metálicos muestran valores de resistividad propios de un conductor debido a su composición. De esta forma los vidrios metálicos con proporciones alrededor del 80% de metales nobles o de transición (Co, Fe) y del 20% de metaloides (B, Si) pueden ser fabricados con tasas de enfriamiento de 10^6 Ks^{-1} . Debido a este proceso de fabricación aparecen entre ambas capas, la aislante y la conductora, tensiones en el material que logran condicionar los dominios de los vidrios metálicos.

En la figura 1, se muestra de forma clara el proceso que siguen los materiales para alcanzar el enfriamiento ultrarrápido.

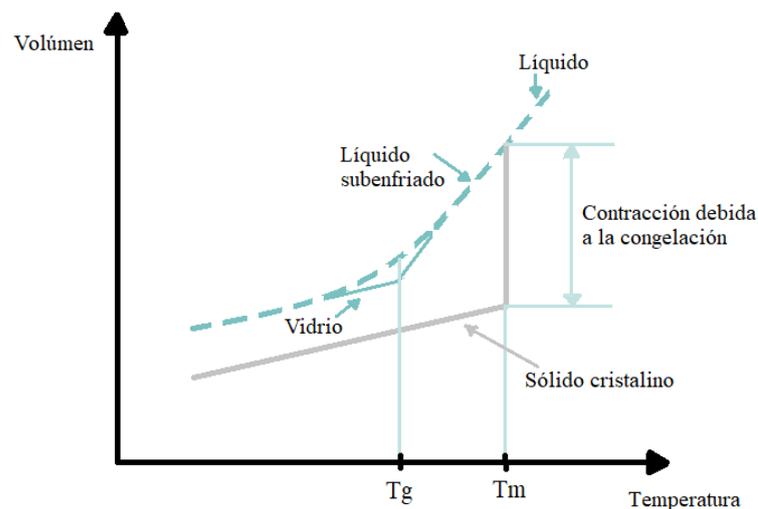


Figura 1. Proceso de los materiales para obtener el enfriamiento ultrarrápido.

En color gris se muestra el comportamiento de un material cristalino durante la solidificación, mientras que en color azul se muestra el proceso de un material amorfo. En un sólido cristalino, se conoce el valor de la temperatura a la cual realiza la solidificación (T_m). De forma opuesta, el material no cristalino se vuelve más blando a medida que la temperatura va disminuyendo, pasando de un estado blando a un estado rígido o vítreo en un intervalo pequeño de temperatura. Dicho cambio de estado se denomina temperatura de transición vítrea (T_g).

En el desarrollo de este proyecto, la estructura empleada para las muestras está formada por un núcleo ferromagnético amorfo y cubierto por una capa aislante de vidrio. En la figura 2, se muestra una imagen SEM (Scanning Electron Microscope) realizada en el servicio de microscopía de la UPV de un microhilo.

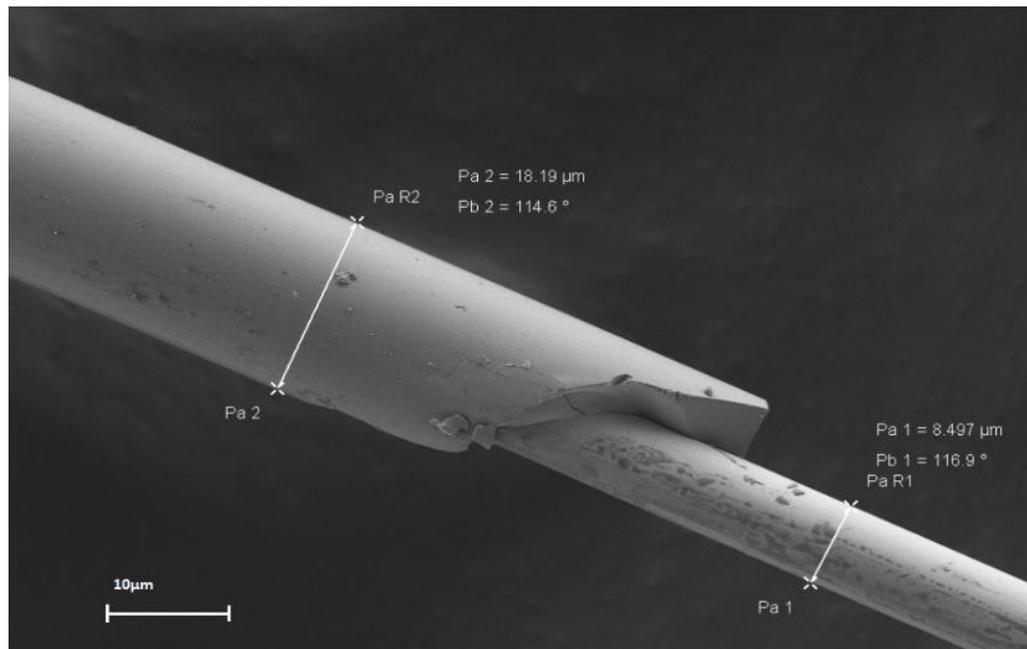


Figura 2. Imagen SEM del microhilo realizada en el servicio de microscopía de la UPV. Se observa un diámetro del núcleo ferromagnético amorfo de 8.5 μm y un diámetro total (junto con la capa aislante de vidrio) de 18.2 μm .

La combinación de las muestras empleadas está formada por materiales ferromagnéticos como el hierro y cobalto, y de metaloides como el silicio y el boro. Dependiendo de la combinación entre los materiales, las muestras presentan diferentes anisotropías (Capítulo 3, sección 3.2). En este caso, las muestras utilizadas tienen un 94% de Co y un 6% de Fe, presentando una magnetostricción prácticamente nula ($\lambda_s \sim 0$). [4]

3.2 Efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (GMI)

3.2.1 Historia: Efecto de la Magnetorresistencia Gigante (GMR)

La magnetorresistencia es una propiedad que poseen ciertos materiales de variar su resistencia eléctrica a consecuencia de ser sometidos a un campo magnético. Dependiendo del aumento o disminución de dicha resistencia, la magnetorresistencia se divide entre positiva o negativa, así como transversal o longitudinal en función del ángulo entre la corriente y el campo magnético.

Posteriormente, dos científicos descubrieron de forma independiente, lo que se conoce como Magnetorresistencia Gigante. El efecto de la Magnetorresistencia Gigante consiste en una estructura multicapa compuesta por un material ferromagnético, seguida de un material conductor y posteriormente de nuevo el ferromagnético. Dicho descubrimiento, realizado por Albert Fert y Peter Grünberg a quienes se les otorgó el premio nobel de física del 2007, cambió la visión de forma positiva para la tecnología originando una revolución en la informática, facilitando así, la lectura de datos en los discos duros (hard disk, HD).

Tras algunos estudios, en los inicios de la década de los noventa se observó que el fenómeno de Magnetoimpedancia Gigante (*Giant Magnetoimpedance o GMI*) presenta una mayor variación de impedancia (~100%) dependiente de un campo magnético. A partir de ese momento, se han estado realizando numerosos estudios teóricos y experimentales sobre distintos materiales magnéticamente blandos en forma de hilos, cintas, películas, y multicapas, en el estado amorfo, nanocristalino y cristalino.

3.2.2 Magnetoimpedancia Gigante (GMI)

El efecto GMI consiste en el cambio elevado de la impedancia, $Z = R + jX$ (donde R es la parte real o resistiva, y X es la parte imaginaria o reactancia), que experimentan los materiales ferromagnéticos blandos, cuando por dicho material fluye una corriente en alterna y, a su vez, es sometido a un campo magnético externo H_0 . El efecto de la Magnetoimpedancia Gigante (normalmente expresado en porcentaje) se puede definir mediante la ecuación 3.1.

$$\frac{\Delta Z}{Z} (\%) = \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} 100 \quad (3.1)$$

Siguiendo la ecuación 3.1, ΔZ es la variación de impedancia en la muestra del microhilo, Z representa el valor absoluto de la impedancia y H_{max} es el máximo campo magnético aplicado donde la muestra se encuentra saturada.

El efecto GMI genera una variación de impedancia ante la presencia de un campo magnético. Existen dos tipos de Magnetoimpedancia Gigante. En primer lugar, cuando una muestra de microhilo es rica en Co contiene anisotropía circular (double-peak), dando lugar a dos máximos de impedancia cuando el campo externo aplicado compense el campo de anisotropía transversal interno, figura 3.a. Y, en segundo lugar, cuando una muestra de microhilo es rica en Fe contiene anisotropía axial (*single-peak*), la respuesta de su impedancia presenta un único máximo cuando el campo externo es nulo ($H=0$), figura 3.b.

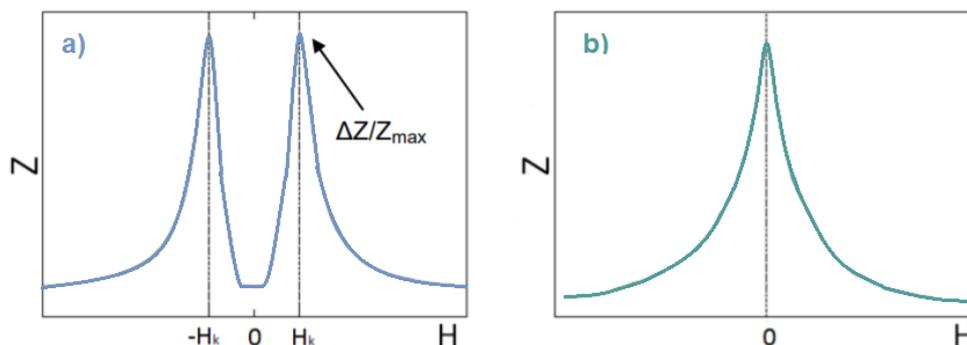


Figura 3. Representación gráfica de la magneto-impedancia en función del campo. GMI con dos picos (3.a) y GMI de un solo pico (3.b).

El proyecto está focalizado para frecuencias bajas y medias (es decir, entre 7MHz y 15MHz). Para este rango de frecuencias, el responsable del efecto GMI es el efecto pelicular, o también conocido como *skin depth*. Cuando a través de un material se hace pasar una corriente en alterna (de alta frecuencia), se produce un campo magnético perpendicular a la corriente con amplitud y fase variantes en el tiempo. En altas frecuencias, la corriente que circula por un conductor no se distribuye de forma homogénea por la sección de dicho conductor, sino que, tiende a concentrarse toda la corriente sobre su superficie. La distribución de la corriente en el interior de un conductor viene confinada a su superficie con la profundidad de penetración descrita en la ecuación 3.2:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_{\varphi} \omega \sigma}} [m] \quad (3.2)$$

donde,

- σ pertenece a la conductividad del material.
- μ_{φ} es la permeabilidad dinámica circular.
- ω es la frecuencia angular. Relacionada con la frecuencia de trabajo mediante la ecuación 3.3.

$$\omega = 2\pi f [\text{rad/s}] \quad (3.3)$$

La profundidad de penetración es el área efectiva por la que circula corriente en el conductor y, a su vez, es inversamente proporcional a la conductividad del material, su permeabilidad magnética circular y a la frecuencia angular.

Dado que la impedancia es inversamente proporcional al área efectiva del material, ecuación 3.4 y de acuerdo con la ecuación 3.3, cuanto más elevados sean los valores de la frecuencia angular, de la conductividad del material o de la permeabilidad magnética circular, menor penetración (menor área efectiva, S) y, por lo tanto, mayor impedancia.

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (3.4)$$

donde,

- ρ pertenece a la resistividad del material [$\Omega \text{ m}$]. La inversa de la resistividad es la conductividad (σ).
- l es la longitud del material [m].
- S es el área transversal [m^2].

Cuando la muestra se ve afectada por un campo magnético externo, el material ferromagnético conductor cambia su permeabilidad magnética circular, suponiendo esto una nueva distribución de la corriente, y por lo tanto, una variación en la impedancia.

3.3 Materiales magnéticos

Los materiales magnéticos forman parte de numerosos equipos y dispositivos industriales en el entorno de la Ingeniería eléctrica y electrónica.

La presencia de un campo magnético afecta, en mayor o menor medida, a todos los materiales magnéticamente permeables. No obstante, la presencia de fenómenos como la distorsión y alineación en dichos materiales causan una variedad de comportamientos dependientes del campo magnético aplicado. Dependiendo de cómo reacciona el material ante una excitación externa H (líneas de campo magnético), los materiales se clasifican en diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos.

3.3.1 *Diamagnéticos*

Para explicar de una forma más concisa en qué consisten este tipo de materiales, debemos indagar en el mundo de la física. El fenómeno del diamagnetismo fue descubierto en 1845 por Michael Faraday, tras observar como un trozo de bismuto era repelido por un polo del imán al aplicarle un campo magnético externo.

El diamagnetismo es una propiedad que poseen algunos materiales y se caracterizan por la débil magnetización en sentido contrario al campo magnético aplicado, siendo estos repelidos por cualquier polo de un imán. Es decir, cuando a dicho material se le aplica un campo magnético, sus líneas de fuerza son repelidas hacia fuera. Dichos materiales poseen una susceptibilidad magnética, χ (grado de magnetización de un material, en respuesta a un campo magnético) negativa y pequeña, y la permeabilidad relativa (μ) es entonces ligeramente menor que uno. Ambos parámetros están relacionados por la ecuación 3.5:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (3.5)$$

siendo, μ_0 la permeabilidad del vacío.

Uno de los fenómenos más interesantes que presentan los materiales diamagnéticos es la levitación diamagnética. Es un fenómeno por el cual un objeto es suspendido en el aire por acción únicamente de un campo magnético (es decir, la presión magnética se contrapone a la gravedad).

3.3.2 *Paramagnéticos*

El paramagnetismo se produce cuando los momentos magnéticos libres (espín u orbitales) tienden a alinearse de forma paralela al campo magnético aplicado, consiguiendo que los dipolos y el campo se orienten en la misma dirección y sentido. Esto implica, un valor de susceptibilidad magnética (χ) positiva y pequeña [5].

Una observación bastante interesante en este tipo de materiales es la similitud que presentan con respecto los imanes. Ambos manifiestan el mismo tipo de atracción y repulsión en presencia de campo magnético. Sin embargo, en ausencia de campo, los momentos magnéticos de los materiales paramagnéticos tenderían a orientarse de forma aleatoria, haciendo desaparecer el alineamiento magnético.

3.3.3 *Ferromagnéticos*

Los materiales ferromagnéticos son elementos de transición. En este tipo de materiales, cuando se aplica un campo magnético externo, se produce una alineación de los momentos dipolares magnéticos agrupándose en dominios. Los dominios magnéticos están separados entre sí por unas superficies denominadas paredes de Bloch.

Tras aplicar un campo magnético intenso sobre un material de este tipo, los momentos tienden a alinearse con dicho campo aplicado, de forma que conforme va creciendo el campo, el volumen de los dominios que poseen la misma orientación (dirección y sentido) a este, empiezan a aumentar. Ese crecimiento es debido a las paredes de Bloch, ya que avanzan en dirección a los dominios, pero opuesta a los dipolos, produciendo un monodominio.

A continuación, en las figuras 4.a y 4.b, se muestra un material ferromagnético sin y con aplicar campo magnético.

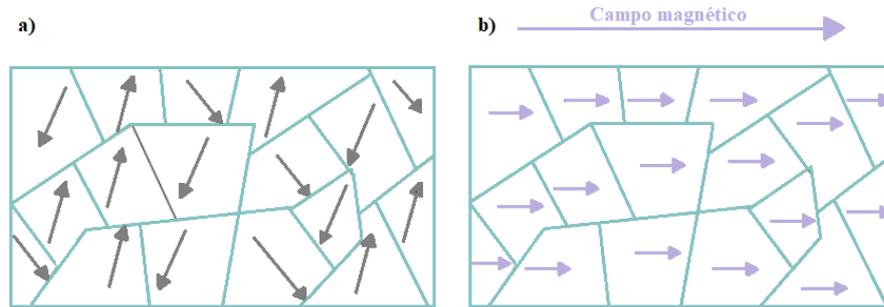


Figura 4. Material ferromagnético sin aplicar campo magnético (4.a) y aplicando campo magnético (4.b)

Además, una de las características que poseen dichos materiales es, en ausencia de campo externo, los efectos del campo aplicado no desaparecen del todo, quedando un magnetismo remanente. Este magnetismo se origina porque los momentos magnéticos de los dominios no vuelven a su orientación inicial, si no, que la mayoría se quedan en la misma dirección y sentido al campo. Estos materiales poseen unos valores de susceptibilidad magnética (χ) positiva y una permeabilidad relativa (μ) superior a la unidad. El ciclo completo de magnetización de un material ferromagnético se denomina ciclo de histéresis (Capítulo 3, sección 3.4).

3.4 Histéresis magnética

Una propiedad característica de los materiales ferromagnéticos es el ciclo de histéresis. De forma breve, se procede a explicar cómo se desarrolla el ciclo de histéresis.

Al aplicar un campo magnético creciente a un material ferromagnético, la imantación aumenta hasta la saturación (M_s), debido a la alineación de los dominios magnéticos (las regiones dentro de un material formados por los pequeños imanes permanentes que componen los imanes macroscópicos). De esta forma, se obtiene la primera curva de imantación. Seguidamente, cuando el campo magnético decrece hasta llegar a cero, la imantación no decrece de igual manera. Para observar la histéresis de un material se aplica un campo magnético hasta alcanzar al valor de saturación y posteriormente, se aplica el mismo valor del campo pero en sentido contrario. Es en ese instante donde los dominios magnéticos del material magnetizado se hallan totalmente distribuidos con el campo. Si no se elimina el estímulo, el material no es capaz de retornar a su estado de reposo.

Finalmente, si se continúa aplicando un valor de campo inverso al inicial (campo coercitivo, H_c) el material consigue desmagnetizarse del todo. En este proyecto, se hace referencia sobre la magnetización de materiales donde la señal magnética perdura una vez eliminado el campo magnético externo aplicado. En la figura 5, se muestra paso a paso el ciclo de histéresis.

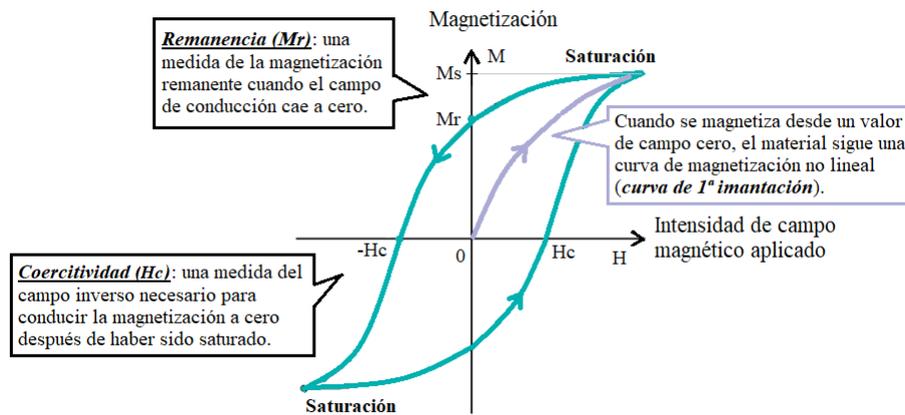


Figura 5. Ciclo de histéresis

Dependiendo el material con el que se trabaja, existen dos grupos de ciclo de histéresis, los materiales magnéticamente blandos y los materiales magnéticamente duros.

- ❖ **Magnéticamente blandos:** son materiales que suelen emplearse en aplicaciones donde el material debe imantarse y desimantarse de forma fácil. Poseen ciclos de histéresis estrechos y altos, con alta permeabilidad magnética y con pequeñas fuerzas coercitivas.

Suele utilizarse en núcleos de transformadores para la distribución de energía eléctrica y como materiales para rotores de motores y generadores.

- ❖ **Magnéticamente duros:** son materiales que no requieren de una rápida imantación y desimantación. Poseen ciclos de histéresis anchos y altos, con alto campo coercitivo (H) y una alta inducción magnética remanente (B_r). Estos materiales se iman tras aplicarle un campo magnético lo necesariamente intenso para orientar sus dominios magnéticos en la dirección del campo aplicado.

Suele emplearse en aplicaciones como en los imanes permanentes de los altavoces, receptores telefónicos, motores síncronos sin escobillas y motores de arranque para automóviles.

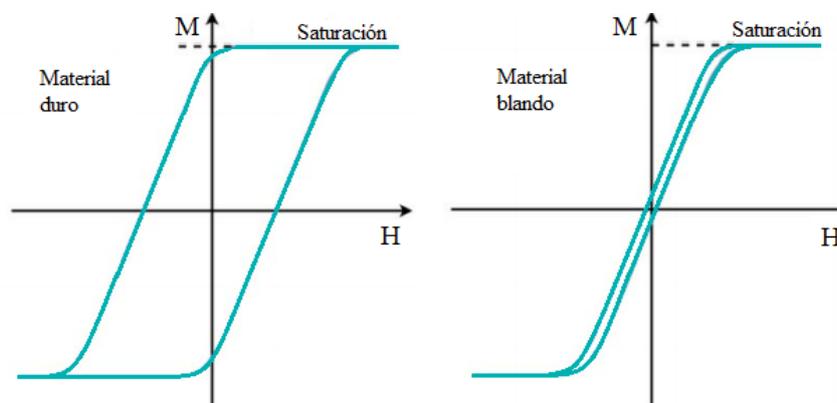


Figura 6. Lazo de histéresis para materiales duros y materiales blandos

Capítulo 4. Metodología de trabajo

4.1 Organigrama

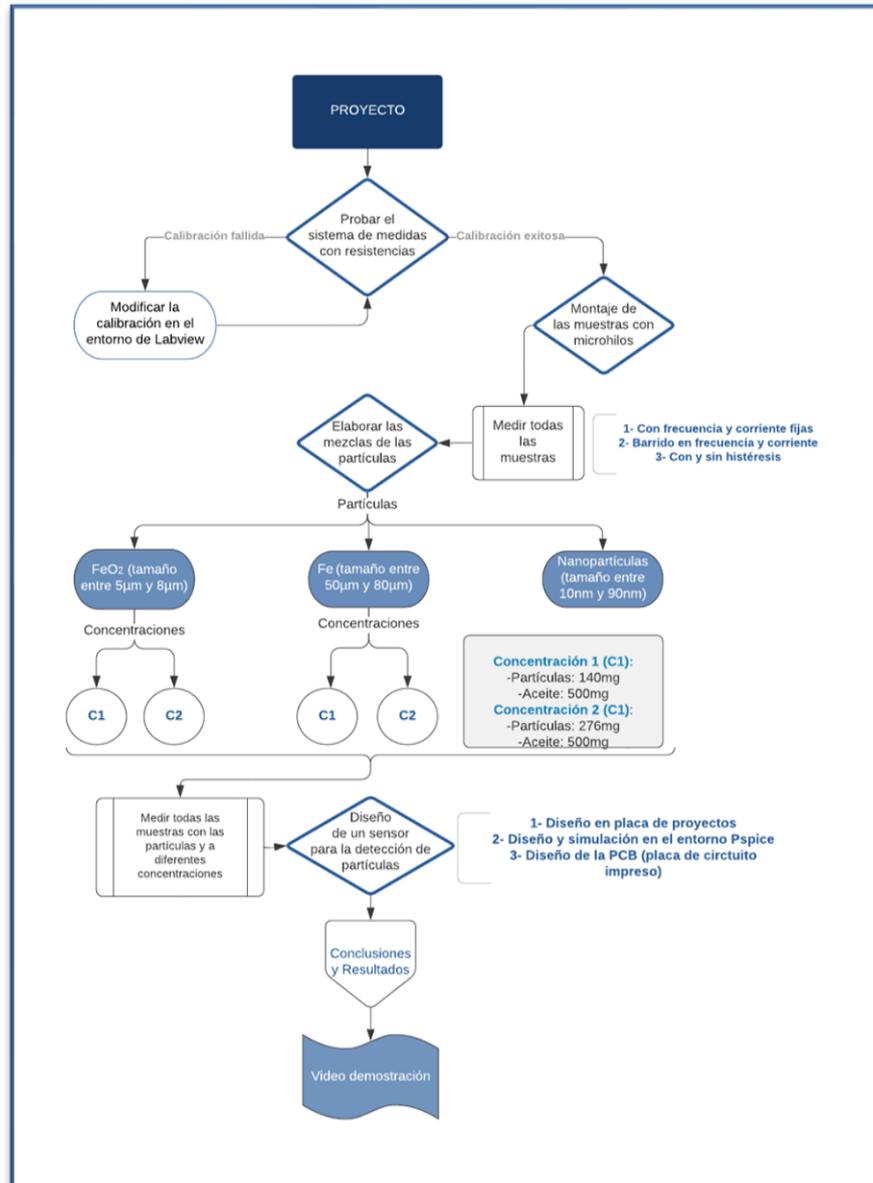


Figura 7. Organigrama propuesto para el desarrollo del proyecto

Capítulo 5. Sistema de medidas

En este capítulo se describe la caracterización del sistema de medida empleado para observar el efecto GMI en cada una de las muestras. Para ello, se utilizará un método de medida para obtener el valor de la impedancia que presenta la muestra, a diferentes corrientes y frecuencias, variándole, a su vez, el campo externo aplicado.

5.1 Método de medida

El objetivo es obtener la impedancia que presenta la muestra, en función de la corriente de excitación de la muestra y el campo generado.

En el proyecto, el método de medida se ha llevado a cabo mediante el uso de dos sondas activas diferenciales; una de ellas (canal 1 (CHI) del osciloscopio) se ha utilizado para medir la tensión en los bornes de la muestra (impedancias o microhilos); y la otra (canal 2 (CHII) del osciloscopio) en los bornes de la resistencia de referencia.

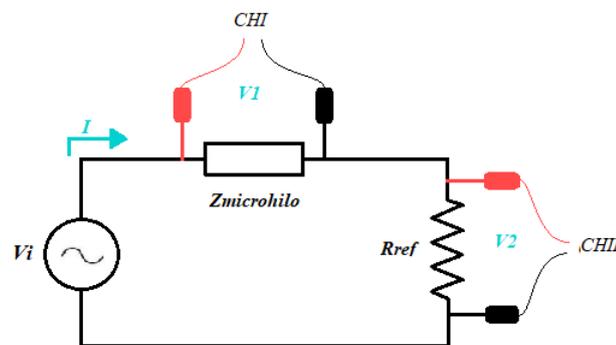


Figura 8. Esquema del método de medida. La corriente de excitación (I) que circula por todo el circuito debe ser un valor constante. El valor de la R_{ref} es de 94Ω .

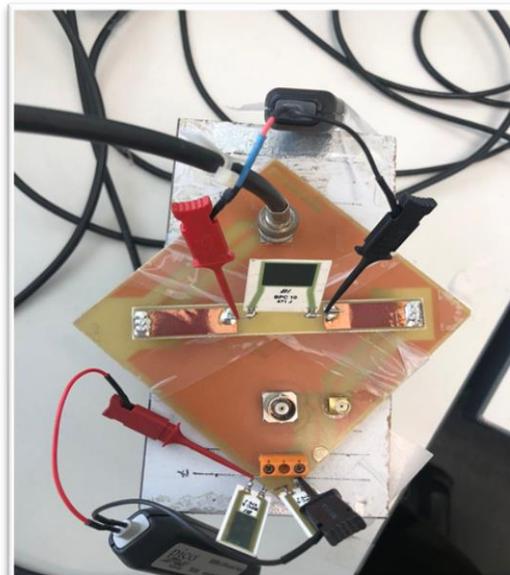


Figura 9. Placa de medición para la caracterización de microhilos

El método empleado consiste en obtener el valor de la impedancia de la muestra ($Z_{\text{microhilo}}$), midiendo la tensión en sus bornes, V_1 (en este caso, en la muestra del microhilo o en resistencias no inductivas de referencia), asegurando que la corriente de excitación sea constante. Generalizando las ecuaciones de la Ley de Ohm para circuitos en régimen permanente sinusoidal, la impedancia se calcula como un número complejo a partir de los fasores de tensión y corriente. Mediante la tensión medida en la resistencia no inductiva (R_{ref}), es posible obtener la corriente que circula por el circuito siguiendo la ecuación 5.1:

$$i = \frac{|V_2| e^{j\phi_2}}{R_{\text{ref}}} \quad I = \frac{|V_2|}{R_{\text{ref}}} \quad (5.1)$$

La resistencia no inductiva es de 94Ω y de valor fijo.

Conocida la corriente de excitación que circula por el circuito, mediante la ecuación 5.2 es posible calcular el valor de la impedancia de la muestra.

$$Z_{\text{microhilo}} = \frac{|V_1| e^{j\phi_1}}{I} \quad |Z_{\text{microhilo}}| = \frac{|V_1|}{I} \quad (5.2)$$

De esta forma, la impedancia de la muestra viene determinada por el cociente de la tensión de la muestra (V_1) y la corriente de excitación (I), la cual se ha asegurado que sea constante.

5.2 Instrumentos de medida

Para realizar la adquisición de los datos de todo el sistema, uno de los requisitos fundamentales es la monitorización del conjunto de los equipos necesarios. Dicha monitorización se ha realizado mediante un programa desarrollado en LabView.

Es necesario establecer una conexión entre todos los instrumentos de medida. A continuación, se describe cada uno de los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto.

- Un ordenador o PC. Sirve como controlador de todos los instrumentos. Siendo a su vez, desde donde se lanzan y se almacenan las medidas.
- Un gaussímetro. Medidor de campo magnético en la bobina mediante una sonda efecto Hall. Dicha sonda puede ser de tipo axial o transversal, siendo la primera de ellas la utilizada en el proyecto, ya que el campo que se pretende medir es paralelo al mango de la sonda.
- Un osciloscopio. Mediante el uso de dos sondas activas diferenciales se obtiene la tensión en cada una de las impedancias ($Z_{\text{microhilo}}$ y R_{ref}), y a través de este dispositivo se visualizan y captan las señales y los datos deseados. Las sondas diferenciales empleadas, presentan un ancho de banda de 800MHz, óptimo para medir señales de altas velocidades.
- Un generador de funciones. Encargado de suministrar una corriente en alterna a la muestra. El que se utiliza en el laboratorio (Agilent modelo 33120) tiene una frecuencia de trabajo máxima a 15 MHz.
- Una fuente de corriente variable entre un rango específico, mediante la cual se alimentan a las bobinas Helmholtz para generar un barrido de campo magnético. La fuente utilizada en el laboratorio tiene una resolución de 16 bits, y a su vez, permite realizar medidas con histéresis.

El uso de bobinas se utiliza para la generación de un campo magnético uniforme en su interior para que la muestra a estudiar se encuentre sometida a diferentes valores de campo magnético en función de la corriente.

- ✚ Tres bobinas Helmholtz. Utilizadas para anular el campo terrestre focalizado en la muestra. Son tres bobinas perpendiculares entre sí, cada una de ellas corresponden a un eje, es decir, X,Y,Z, anulando el campo magnético terrestre obteniendo en el centro un valor de campo nulo.
- ✚ Bobinas Helmholtz. Encargadas de generar un campo uniforme en el interior para que la muestra a estudiar se encuentre sometida a diferentes valores de campo en función de la corriente aplicada.

En la figura 10, se pueden observar las bobinas Helmholtz anteriormente descritas.

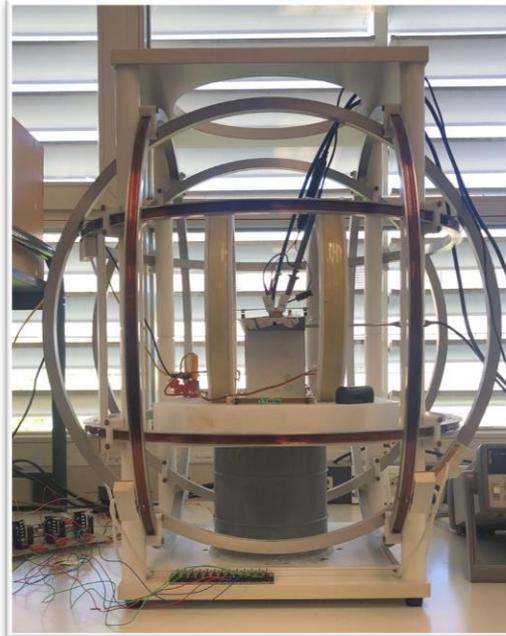


Figura 10. Bobinas Helmholtz para anular el campo terrestre y para generar un campo uniforme en la muestra.

Para ello, la conexión entre cada equipo se ha realizado mediante un bus GPIB (General Purpose Interface Bus). En la figura 11, se puede observar la topología empleada, en este caso se ha utilizado una conexión en línea de los instrumentos de medida.

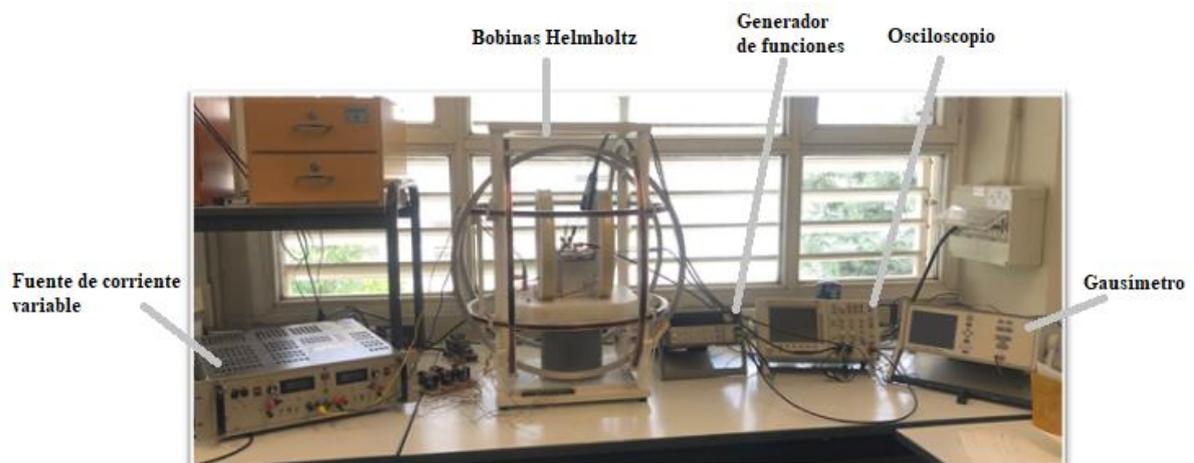


Figura 11. Topología en línea de los instrumentos de medida

Capítulo 6. Sistema de calibración

Con el objetivo de reducir el error en la medida de la impedancia de la muestra debido al ruido producido por el conjunto de instrumentos de medida y al efecto de carga de las sondas diferenciales a las frecuencias de trabajo, se realizaron diferentes medidas de impedancia sobre resistencias no inductivas. Se emplearon resistencias desde los 235Ω hasta los 1470Ω , con intervalos de 235Ω . Para ello, se hizo uso de dos sondas activas diferenciales, con una impedancia de entrada para cada una de ellas de $100k\Omega$ en paralelo con una capacidad de $2pF$ (disposición de las sondas explicada en el Capítulo 5, sección 5.1).

Comparando los valores de impedancia medidos, se observó que existía un error por encima del 3%, en función de la frecuencia de trabajo y la corriente de excitación. Teniendo esto en cuenta, y a su vez, sabiendo que el proyecto está enfocado para elevadas frecuencias, se implementó un sistema de medida. Para el desarrollo del sistema de calibración se empleó el Matlab como entorno de trabajo. Se hizo hincapié en el rango de frecuencias de trabajo de $7MHz$ a $15MHz$, con un salto de $2MHz$; y de $0.5mA$ a $3mA$ para la corriente de excitación. Para cada frecuencia, se representaron diferentes planos de impedancia y corriente, figura 12.

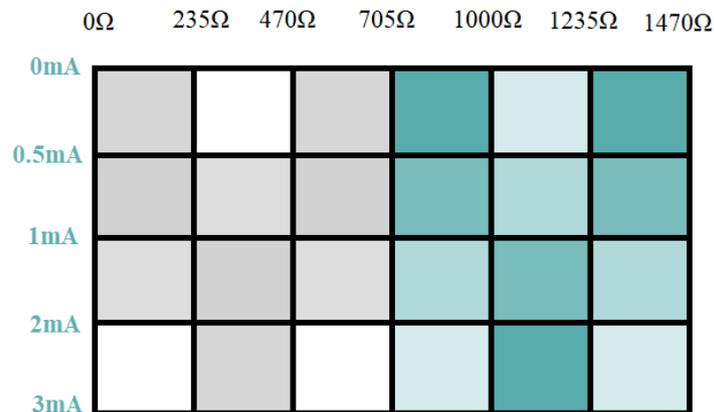


Figura 12. Diferentes planos formados por valores de impedancia (eje x) y corriente (eje y). Se obtiene un plano para cada frecuencia.

De forma individual, cada plano está limitado por unos valores de impedancia y de corriente, junto con los errores obtenidos de las impedancias medidas con respecto a su valor real. Se ha interpolado cada plano con 4 puntos distintos (los cuatro extremos del plano, entre dos impedancias y dos corrientes). Así mismo, se ha escogido un punto central de cada plano, para suavizar la representación de este, y evitar posibles desviaciones. Mediante un *script* de Matlab se obtienen los coeficientes de la función de interpolación para cada frecuencia (conjunto de planos) y, de esa manera, obtener el ajuste de error necesario. La función de interpolación utilizada es:

$$poly21(x, y) = p00 + p10 * x + p01 * y + p20 * x^2 + p11 * x * y \quad (6.1)$$

Siendo x la impedancia y y la corriente. Una vez obtenidos los coeficientes, se obtiene el ajuste de error necesario dependiendo de cada parámetro de entrada. Para una frecuencia de $15MHz$, obtenemos un conjunto de planos como el de la figura 12. A continuación, eligiendo un plano (ej. entre valores de 1235Ω y 1470Ω de impedancia, y $2mA$ y $3mA$ de corriente), y aplicando la función de interpolación para esos valores de frecuencia, corrientes e impedancias,

se han obtenido los valores mostrados en la tabla 1. Se muestra el archivo obtenido mediante el *script* de Matlab. Observándose el error medido, su ajuste necesario y el error final que se comete tras su ajuste para cierta corriente e impedancia.

Impedancia (ohms)	Corriente (mA)	Error (%)	Ajuste (%)	AjusteError (%)
1274.6	2	3.2399	3.2399	-1.3323e-15
1288.2	3	4.3415	4.3415	0
1507.8	2	2.5784	2.5784	4.4409e-16
1526.2	3	3.8302	3.8302	-4.4409e-16

Tabla 1. Valores obtenidos mediante un *script* de Matlab, para una frecuencia de 15MHz, una corriente de 2mA y 3mA, y entre las impedancias de 1235Ω y 1470Ω

Optando por la elección de un punto intermedio entre las dos impedancias y las dos corrientes limitantes del plano, se obtiene la representación del plano con el error obtenido. La suavidad que presenta el plano se debe al punto central calculado, observándose como el plano coincide en los cuatro vértices con los valores de impedancia y corriente insertados en el *script*

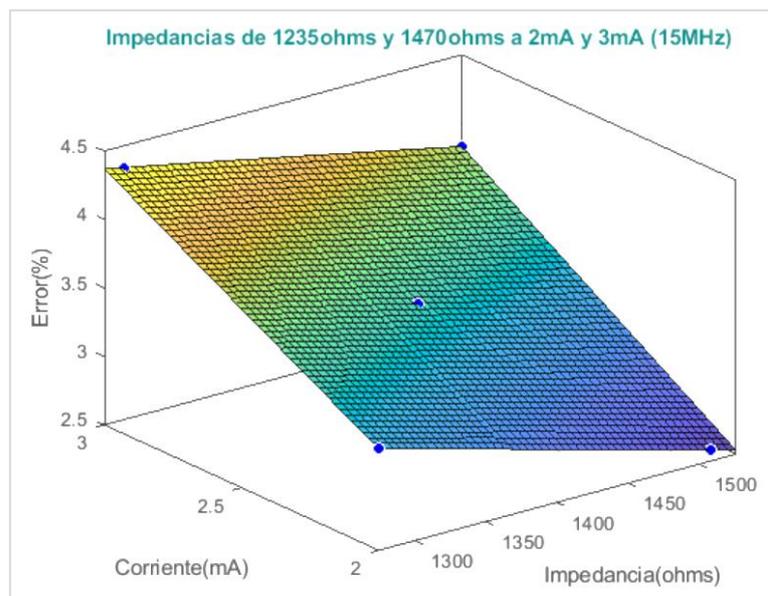


Figura 13. Interpolación 3D aplicando la función de Taylor para una frecuencia de 15MHz, una corriente de 2mA y 3mA, entre las impedancias de 1235Ω y 1470Ω y la elección de un punto central para la orientar la dirección del plano.

Finalmente, una vez aplicada la ecuación para todas las frecuencias y obtenidos todos los coeficientes, se observan las distintas representaciones de los planos obtenidos mediante la función de interpolación. Y como los cuatro puntos limitantes de cada plano, coinciden con su representación, a su vez, de mejorar el sistema de calibración obteniendo unos errores despreciables. Al final de proyecto, en el *Anexo A*, se explica de forma más detallada que parte del entorno de LabView se ha modificado, y que pasos se deberían seguir para añadir, eliminar o modificar nuevos rangos de frecuencia, corriente e impedancia.

Capítulo 7. Caracterización estructural y morfológica del microhilo

En este capítulo se presenta de forma detallada el tipo de muestra utilizada para el proyecto, el desarrollo del montaje de las muestras y las propiedades que las caracterizan [6].

7.1 Introducción

Los microhilos empleados para el proyecto son de composición rica en cobalto. Su composición molecular está formada por:



El proceso de montaje de las muestras se describirá en la sección posterior con más detalle (sección 7.2). A continuación, la figura 14 muestra una imagen SEM realizada en el servicio de microscopía electrónica de la UPV del tipo del materiales utilizados en el proyecto (microhilos amorfos ferromagnéticos). El diámetro total de la muestra es de $17.3\mu m$ y el diámetro del núcleo ferromagnético es de $7.6\mu m$.

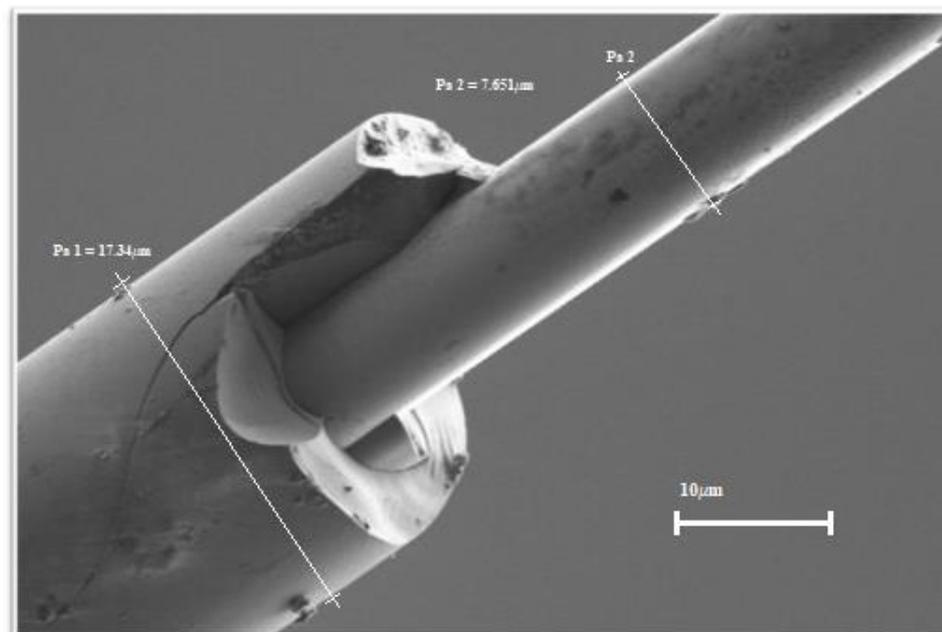


Figura 14. Imagen SEM realizada en el servicio de microscopía de la UPV de un microhilo amorfo ferromagnético. El diámetro total de la muestra es de $17.3\mu m$ y el diámetro del núcleo ferromagnético es de $7.6\mu m$.

7.2 Proceso del montaje de muestras

En este apartado se pretende describir de forma breve y concisa la caracterización del montaje. Las muestras empleadas están cubiertas por una fibra de vidrio que hace que no sean conductoras por la capa externa. Para poder colocarlas en un portamuestras y que hagan un buen contacto eléctrico es necesario pelar la cobertura de vidrio de los extremos de la muestra. Una vez pelado por ambos extremos, se suelda en el portamuestras. El proceso de soldadura se realiza mediante soldadura caliente (con estaño).

En la figura 15, se observan los diferentes microhilos soldados en los portamuestras. Se han utilizado portamuestras de dos tamaños de longitud para la zona donde se sitúa el microhilo de 1.5cm y 1cm, y de grosor 1.5cm y 1cm [7].

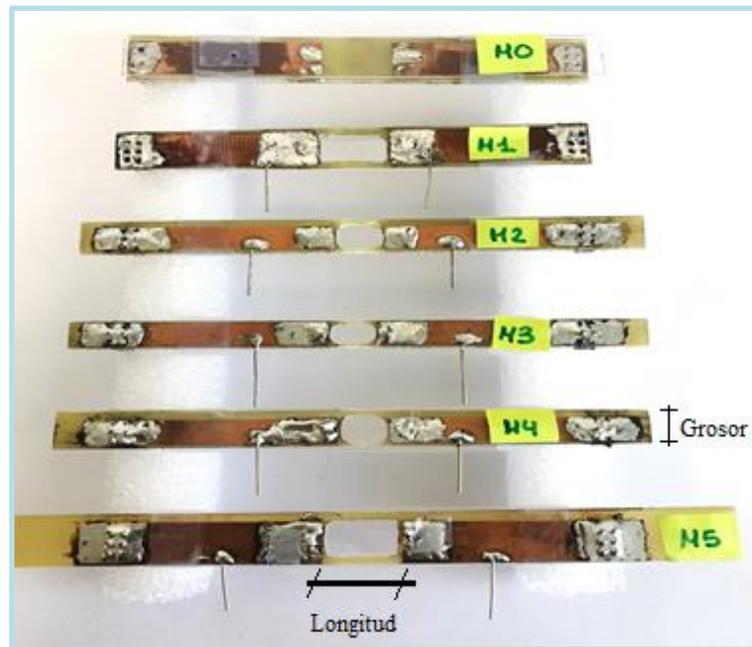


Figura 15. Conjunto de portamuestras elaborados con diferentes muestras

En la tabla 2, se muestran los valores óhmicos y el porcentaje de GMI de cada muestra, el tamaño de longitud del portamuestras y el tipo de soldadura utilizada.

Muestras	Impedancia (Ω)	Porcentaje de GMI	Longitud (cm)	Soldadura
M0	587.20	99.8%	1.5	Estaño
M1	811.33	72.4%	1.5	Estaño
M2	829.68	66.1%	1	Estaño
M3	471.97	75.2%	1	Estaño
M4	520.52	72.1%	1	Estaño
M5	754.77	46.7%	1.5	Estaño

Tabla 2. Se muestran los valores óhmicos y el porcentaje de GMI de cada muestra, el tamaño de longitud del portamuestras y la soldadura utilizada.

Para facilitar la deposición de nanopartículas sobre el microhilo, se realizó un pequeño agujero en la parte central del portamuestras, evitándose en mayor medida el contacto de la concentración con este. Así mismo, al retirar la concentración de nanopartículas resulta más eficiente la limpieza.

Observando los porcentajes de cada una de las muestras se puede afirmar que el valor de GMI obtenida es adecuada para el desarrollo del proyecto. El resultado se ha obtenido mediante la ecuación 7.2.



$$GMI(\%) = \frac{\text{Valor máximo de impedancia} - \text{Valor de impedancia (campo máximo)}}{\text{Valor de impedancia (campo máximo)}} \quad (7.2)$$

Para las diferentes muestras creadas, se puede observar que el tipo de soldadura no altera prácticamente la muestra. Las muestras empleadas tienden a cristalizar lentamente a temperatura ambiente, sin embargo, incrementando la temperatura hasta los 300°C, este proceso comienza a efectuarse en un menor tiempo. Los valores de GMI obtenidos superan en mayor proporción el 50%, resaltando la muestra M0 con un valor del 98.9%.

Capítulo 8. Partículas magnéticas y ferrofluido

En este capítulo se va a tratar todo lo relacionado con las partículas magnéticas y con el proceso de elaboración del ferrofluido. Las nanopartículas ferromagnéticas son pequeñas moléculas con núcleo magnético formadas por óxido de hierro. Son materiales variantes tras aplicarles un campo magnético externo.

Para el desarrollo del proyecto, se han empleado dos tipos diferentes de partículas magnéticas para la detección de GMI. Por un lado, unas partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), figura 16.a [8]; y, por otro lado, unas partículas de hierro, Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), figura 16.b [9].



Figura 16.a Partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$)



Figura 16.b. Partículas de hierro, Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$).

Las partículas de la figura 16.a están formadas de polvo de carbonil de hierro, FeO_2 (carbonyl-iron-powder). Esta composición se forma a través de la descomposición térmica de un tipo de hierro líquido. Las partículas de la figura 16.b, están compuestas por polvo de hierro, Fe (base metálica).

8.1 Ferrofluido

El ferrofluido es una mezcla donde las partículas de Fe sólidas se distribuyen en un medio líquido. Normalmente, la distribución no es uniforme, sino que se producen aglomeraciones de partículas. Por ello, para evitar los cúmulos tras aplicar un campo externo, dichas partículas están recubiertas por una sustancia, conocida comúnmente como surfactante [10], y son agregadas en agua o aceite. Sin embargo, estos materiales no poseen propiedades ferromagnéticas. Es decir, una vez se retira el campo externo aplicado, pierden su magnetización. Normalmente, son descritos como fluidos superparamagnéticos debido a la elevada susceptibilidad magnética. [11]

8.1.1 Proceso de elaboración

Haciendo uso de las partículas anteriormente mencionadas, se han realizado diferentes concentraciones de ferrofluido en función de la cantidad de aceite y de partículas empleadas. En la figura 17 se muestran los utensilios utilizados para la elaboración.

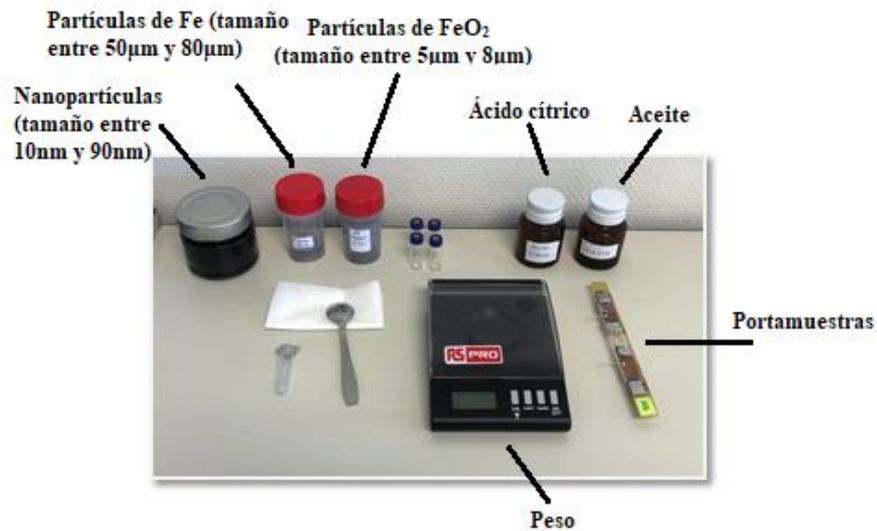


Figura 17. Materiales utilizados para la elaboración de la mezcla con partículas magnéticas

Como se menciona anteriormente, es necesario aplicar una sustancia surfactante para evitar las aglomeraciones de las partículas. Este paso es imprescindible a la hora de elaborar el ferrofluido. En las primeras pruebas que se llevaron a cabo, se hizo directamente la relación 1:1 de aceite y partículas. El resultado fue erróneo, debido a la aglomeración de partículas en el fondo del repositorio, quedando en la parte superior el aceite. En la figura 18. se puede comprobar el resultado obtenido.

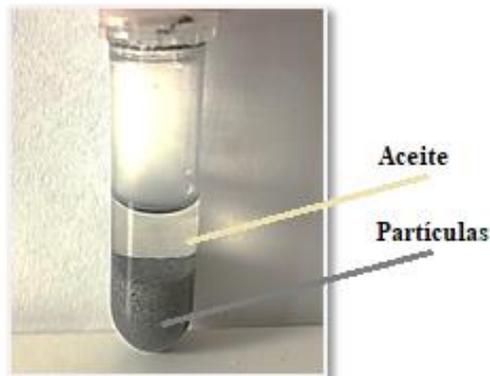


Figura 18. Partículas no disueltas en el aceite por la ausencia de la sustancia surfactante

Sin embargo, tras conocer dichos resultados, se recubrieron las partículas con una sustancia surfactante, en este caso, con ácido cítrico. Retomando la misma relación de volumen entre las partículas y el aceite, se realizó de nuevo el proceso de la mezcla. Una vez llegado al correcto equilibrio de sustancias (volumen, elección del surfactante...) para la elaboración del ferrofluido, se crearon varias concentraciones utilizando la misma cantidad de aceite, pero variando la cantidad de partículas de Fe. A continuación, en la figura 19.a se muestra la concentración de tipo 1 de aceite, ácido cítrico y partículas de Fe, y en la figura 19.b con la concentración de tipo 2. Además, en la tabla 3. se muestra el volumen que se ha empleada para cada concentración.

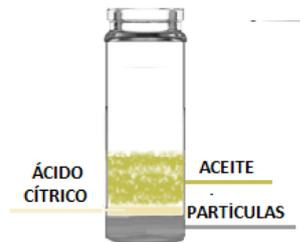


Figura 19.a Concentración de aceite, ácido cítrico y partículas tipo 1.

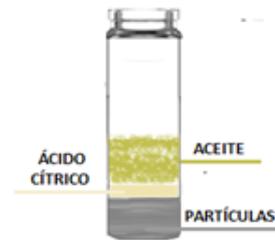


Figura 19.b Concentración de aceite, ácido cítrico y partículas tipo 2.

La cantidad de partículas empleada para las concentraciones se han calculado a peso. En la tabla 3, se muestran las cantidades de las partículas y de aceite que se han utilizado para las concentraciones.

Tipo	Distribución de las condensaciones			
	Partículas de Fe (entre 50µm y 80µm)	Aceite	Partículas de FeO ₂ (entre 5µm y 8µm)	Aceite
1	140mg	5.50mg	140mg	5.50mg
2	276mg	5.50mg	276mg	5.50mg

Tabla 3. Cantidades en peso utilizadas para las diferentes muestras de partículas y aceite

Para cada concentración se han variado las cantidades de partículas de Fe, manteniendo fija la cantidad de aceite y de ácido cítrico. Así mismo, entre partículas se han utilizado las mismas proporciones en función de la concentración. El objetivo principal de depositar diferentes cantidades de concentraciones sobre el microhilo nos proporciona información acerca de la sensibilidad que poseen los microhilos amorfos ferromagnéticos como sensores.

Capítulo 9. Análisis del efecto GMI

Una vez explicada y entendida la caracterización estructural y morfológica de los microhilos, se ha decidido realizar un estudio variando el rango de las frecuencias de trabajo y de las corrientes de excitación para ver de qué forma varía la impedancia que presentan las muestras. El rango de frecuencias es de 7MHz a 15MHz, con un paso de 2MHz; y el rango de corrientes es de 0.5mA a 3mA. En primer lugar, se han obtenido las diferentes representaciones de GMI mediante Origin, para diferentes frecuencias de trabajo a determinadas corrientes de excitación.

Tras analizar cada una de las muestras creadas, se eligió la muestra M0 para las gráficas de barrido, debido a su alto porcentaje de GMI (Capítulo 7, sección 7.2). En las figuras inferiores, se observan las diferentes respuestas obtenidas de GMI para diferentes frecuencias a determinadas corrientes.

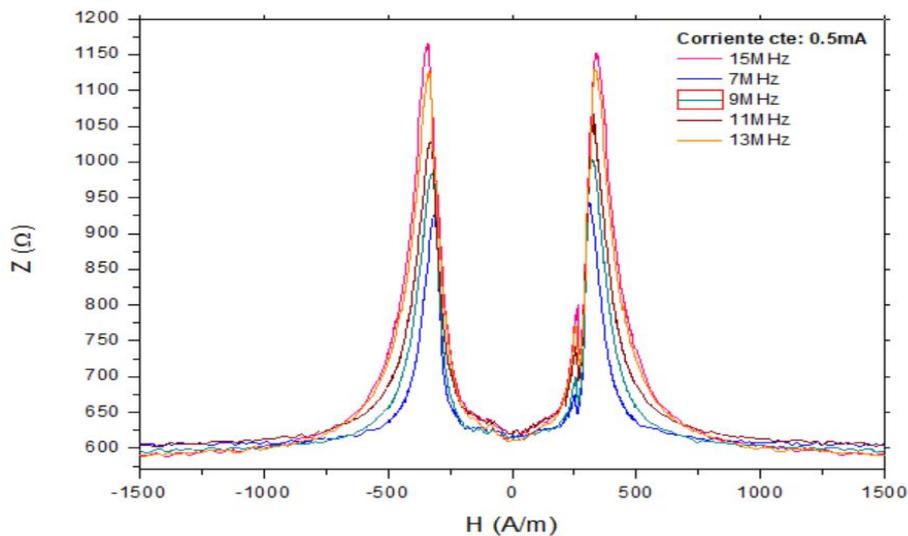


Figura 20. Barrido en frecuencia de 7MHz a 15MHz, con un step de 2MHz, a corriente constante de 0.5mA, y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

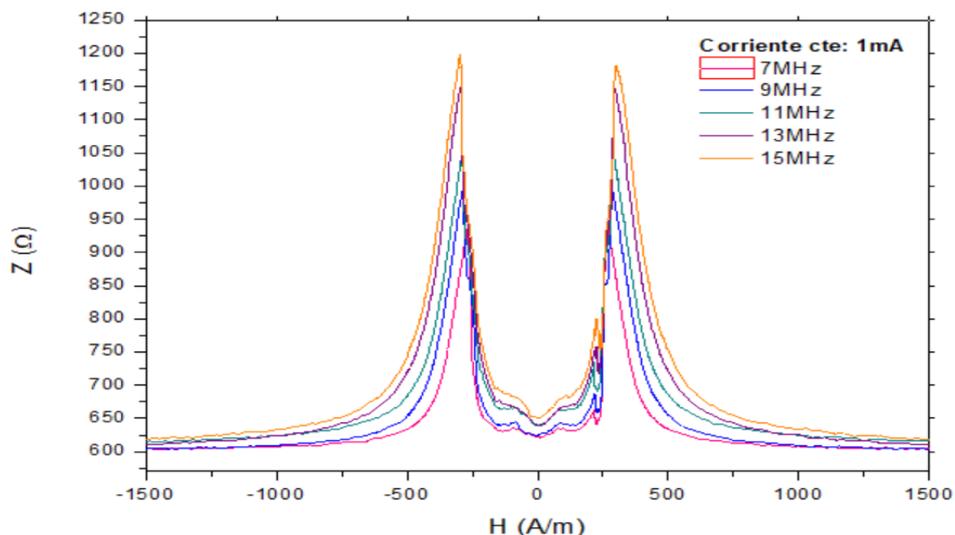


Figura 21. Barrido en frecuencia de 7MHz a 15MHz, con un step de 2MHz, a corriente constante de 1mA, y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

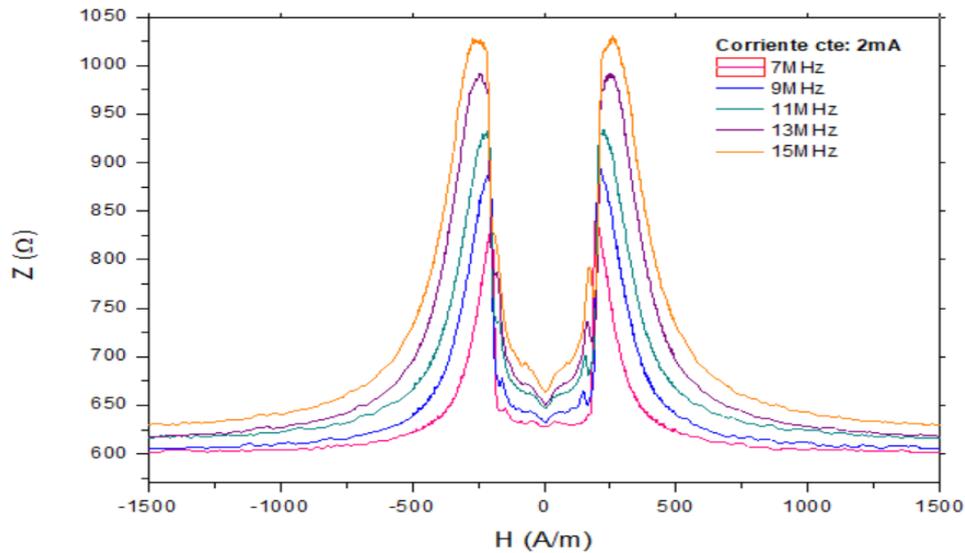


Figura 22. Barrido en frecuencia de 7MHz a 15MHz, con un step de 2MHz, a corriente constante de 2mA, y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

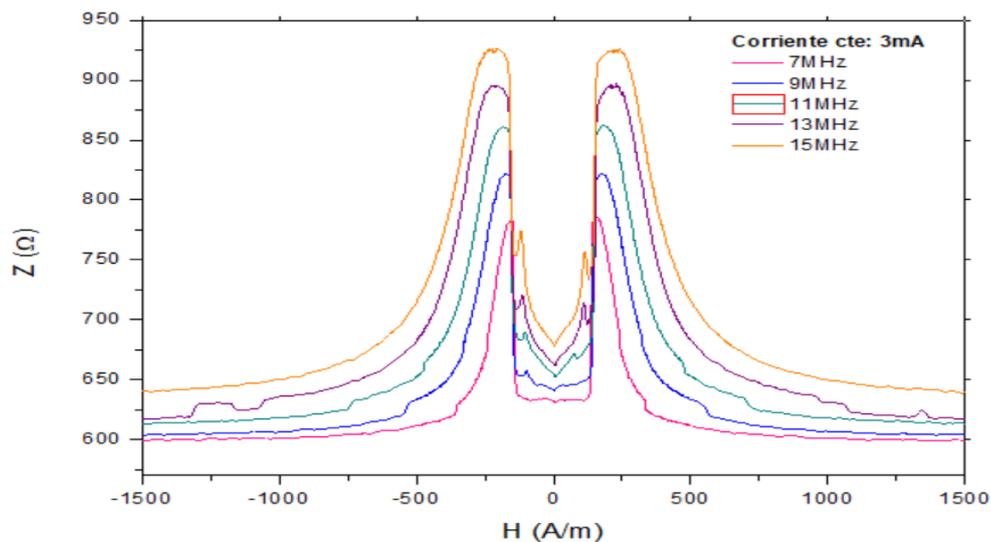


Figura 23. Barrido en frecuencia de 7MHz a 15MHz, con un step de 2MHz, a corriente constante de 3mA, y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

Una vez representados todos los barridos en frecuencia se observa que para una corriente fija de excitación en la muestra, el valor de la impedancia aumenta con la frecuencia. Esto es debido al efector pelicular, el cual es inversamente proporcional a la frecuencia. En alterna, la densidad de corriente se concentra en la superficie del conductor, reduciendo su área efectiva. Si la impedancia es inversamente proporcional al área efectiva, a mayor frecuencia de excitación mayor será el módulo de la impedancia. (Capítulo 3, sección 3.1.3).

A continuación, se realiza el mismo procedimiento que en el apartado superior, pero efectuando un barrido en corriente para valores fijos de frecuencia.

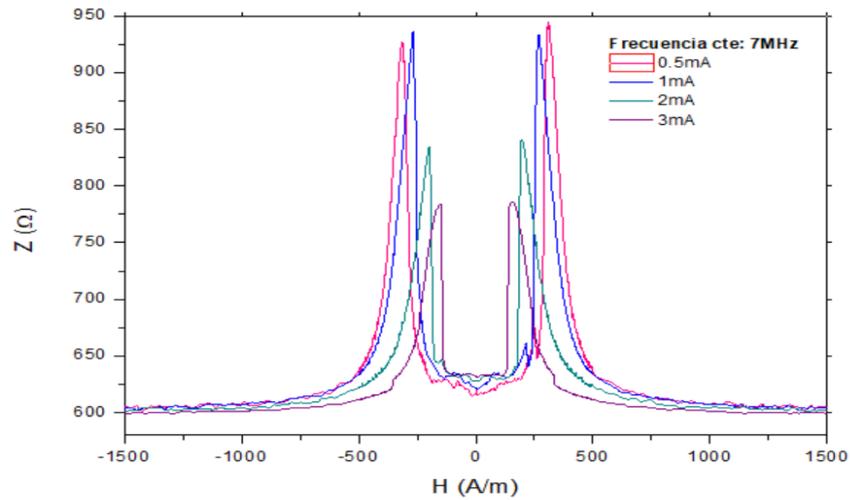


Figura 24. Barrido en corriente de 0.5mA a 3mA, a 7MHz de frecuencia constante y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

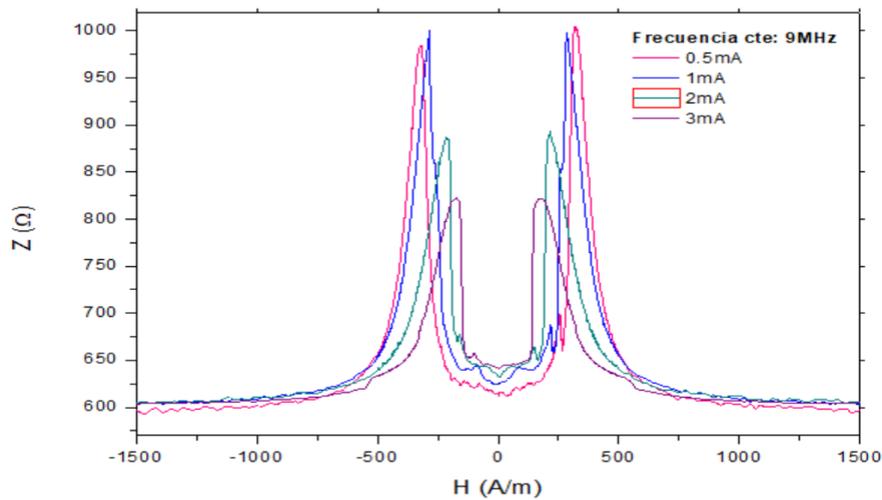


Figura 25. Barrido en corriente de 0.5mA a 3mA, a 9MHz de frecuencia constante y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

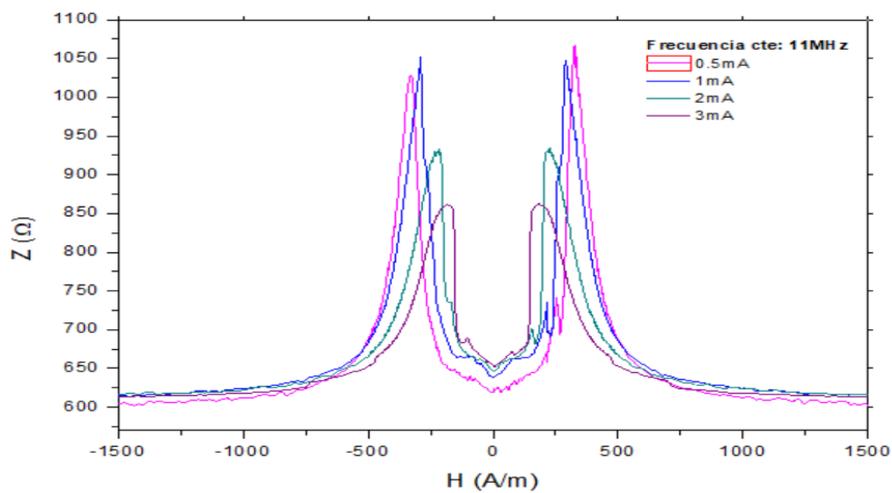


Figura 26. Barrido en corriente de 0.5mA a 3mA, a 11MHz de frecuencia constante y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

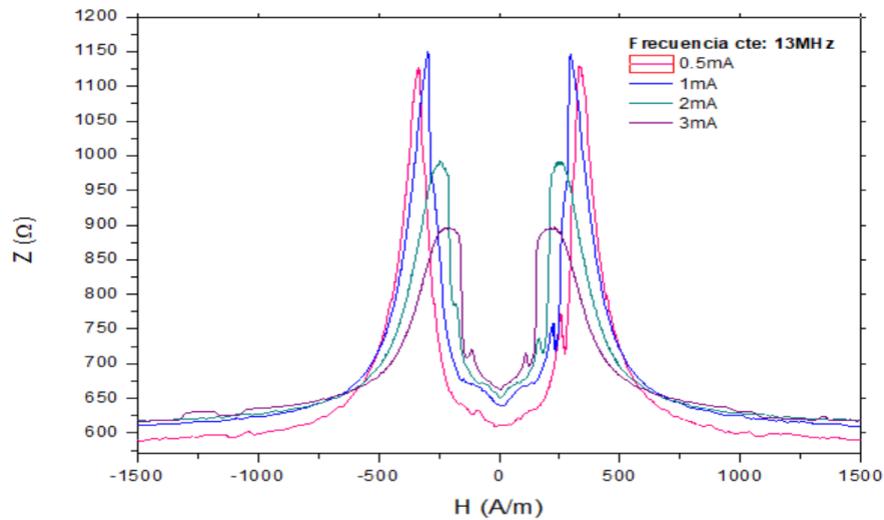


Figura 27. Barrido en corriente de 0.5mA a 3mA, a 13MHz de frecuencia constante y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

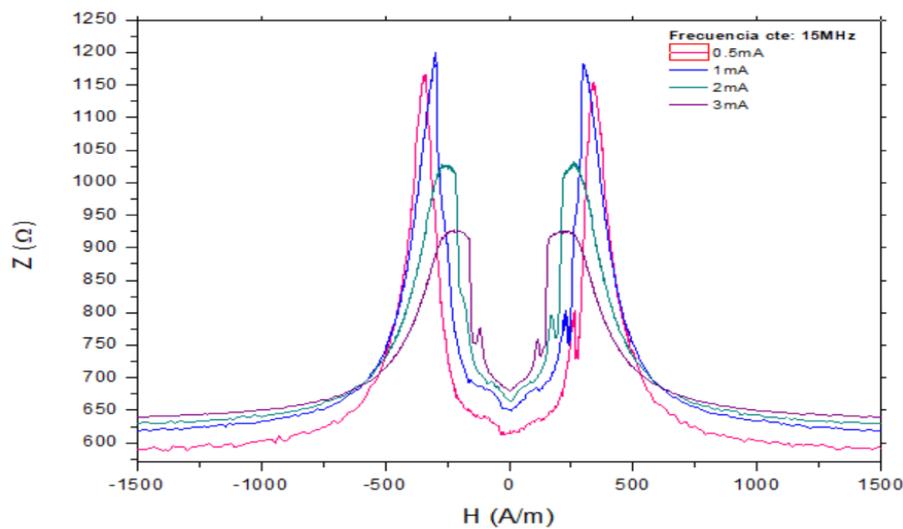


Figura 28. Barrido en corriente de 0.5mA a 3mA, a 15MHz de frecuencia constante y un campo entre -1500A/m y 1500A/m.

Para finalizar, observando los resultados obtenidos para el barrido de la corriente de excitación a frecuencia fija se obtiene que existe un aumento no lineal del efecto de GMI en función de la amplitud de la corriente de excitación.

9.1 Deposición de partículas

Tras observar las diferentes representaciones de GMI a diferentes corrientes de excitación y frecuencias de trabajo, en este apartado se pretende analizar el comportamiento de los microhilos amorfos ferromagnéticos como sensores mediante la deposición de nanopartículas

magnéticas. Para dicho análisis, se han empleado tres tipos de partículas magnéticas de hierro y se han elaborado distintas concentraciones.

9.1.1 Partículas de hierro, Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$)

Para las primeras mezclas se han empleado partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$) [8] con dos concentraciones diferentes. La deposición se realizó sobre la muestra M5 (Capítulo 7, sección 7.2).

En primer lugar, se llevó a cabo la deposición de partículas con la concentración 1, formada por 140mg de partículas de Fe y 5.5mg de aceite. En la figura 29 se observa la muestra junto con la deposición de la concentración 1 (140mg de partículas Fe y 5.5mg de aceite).

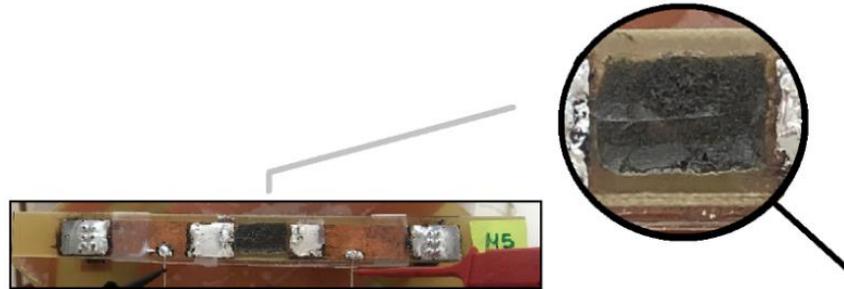


Figura 29. Muestra con las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$) con la concentración 1, formada por 140mg de partículas de Fe y 5.50mg de aceite.

Una vez depositada la mezcla sobre la muestra se ha representado en una misma gráfica el efecto de GMI obtenido antes y después de la deposición. En la figura 30, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas de Fe y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo.

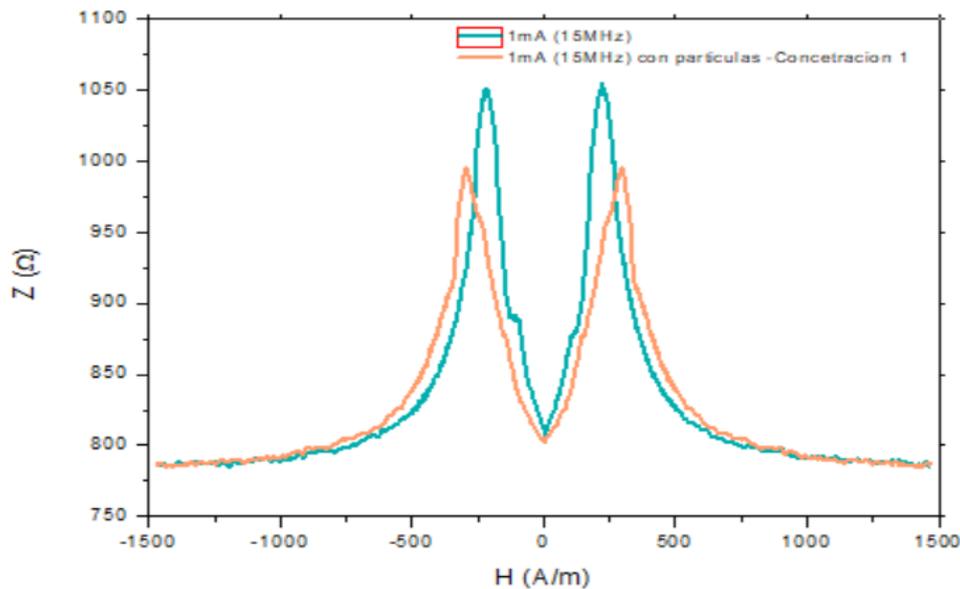


Figura 30. Se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color naranja, el resultado

obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas de Fe y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo mencionados.

Tras obtener la representación gráfica del efecto que producen las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$) sobre los microhilos amorfos ferromagnéticos, se observan comportamientos diferentes en las respuestas de GMI. La deposición de partículas de Fe sobre la muestra utilizando la concentración 1 (formada por 140mg de partículas de Fe y 5.5mg de aceite) produce un desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados). Así mismo, la muestra presenta un variación decreciente de impedancia.

Para continuar, empleando el mismo tipo de partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$) y haciendo uso de la concentración 2 (formada por 276mg de partículas de Fe y 5.5mg de aceite) se ha obtenido la siguiente deposición de partículas de Fe sobre el microhilo amorfo ferromagnético.

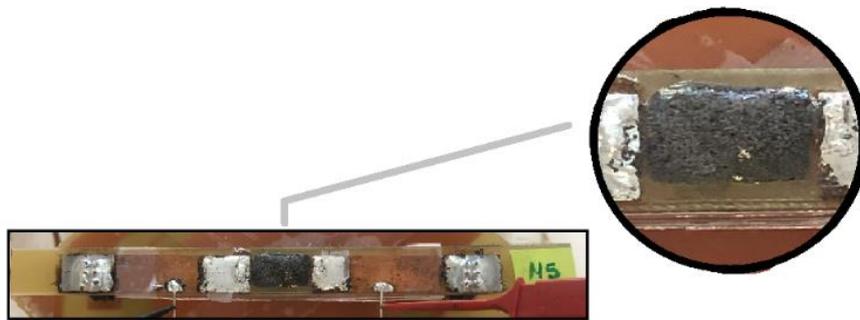


Figura 31. Muestra con partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$) con la concentración 2, formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite.

Con la mezcla formada por las partículas de Fe con la concentración 2 (276mg de partículas y 5.5mg de aceite), se han obtenido dos representaciones de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul, se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo.

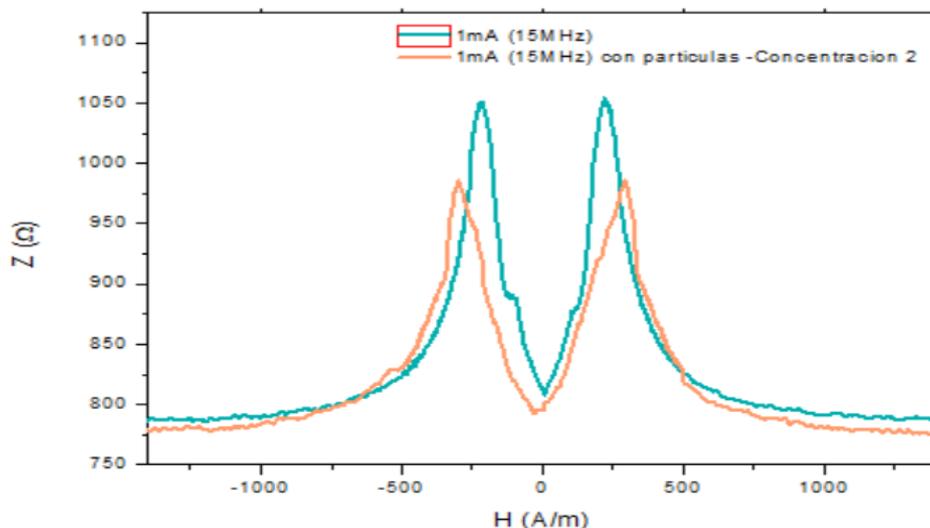


Figura 32, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo mencionados.

Evaluando la figura 32, se han obtenido dos respuestas diferentes de GMI. Al depositar la concentración 2 (276mg de partículas y 5.5mg de aceite) de partículas de Fe se observa una disminución en la representación de GMI, adquiriendo valores más pequeños de impedancia. A su vez, se produce un desplazamiento de los picos de GMI hacia campos mayores.

Finalmente, con las diferentes respuestas de GMI obtenidas para el mismo tipo de partículas de Fe pero empleando diferentes concentraciones, se han representado todas ellas en forma conjunta en una misma gráfica. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color morado, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.

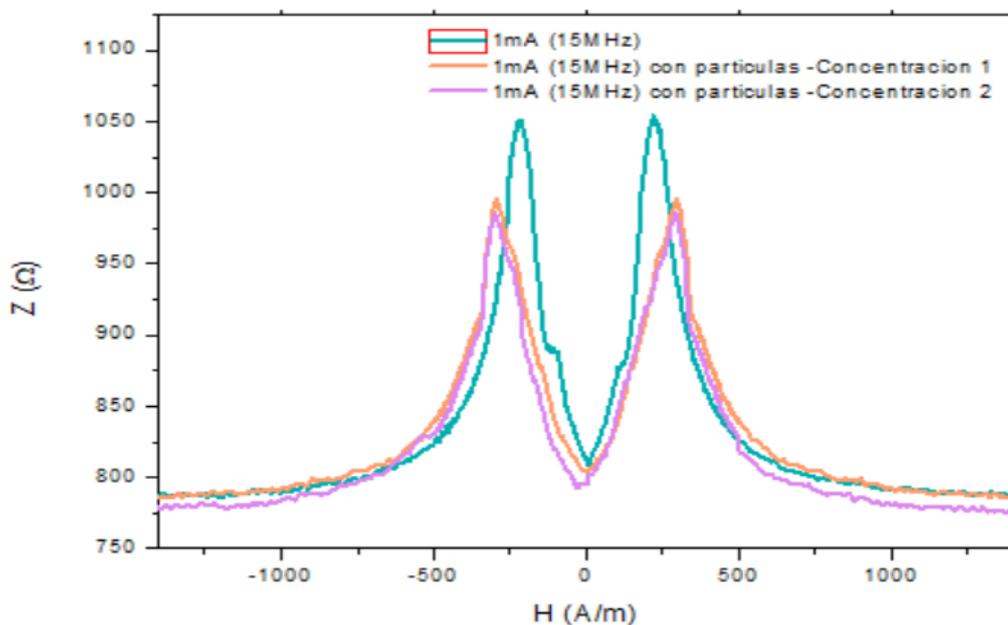


Figura 33. Se observan diferentes comportamientos de Magnetoimpedancia Gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color morado, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de Fe (tamaño entre $50\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.

Con el propósito de plantear unas hipótesis adecuadas acerca de los diferentes comportamientos presentes en los microhilos amorfos ferromagnéticos debido a la deposición de partículas, se han analizado de forma conjunta las respuestas de GMI obtenidas en la figura 33. En primer lugar, el desplazamiento de los picos de GMI hacia campos mayores ocurre indistintamente del tipo de concentración utilizada. En cambio, la variación de impedancia en la respuesta de GMI, se ve alterada por el tipo de concentración. La representación de GMI con valores de impedancia más pequeños se ha obtenido depositando la concentración 2 sobre la muestra. En definitiva, cuanta mayor concentración se deposita sobre el microhilo, menor valor de impedancia presenta la GMI.

9.1.2 Partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre $5\mu m$ y $8\mu m$)

Seguidamente, se hizo un estudio para otro tipo diferente de partículas, como son, las partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre $5\mu m$ y $8\mu m$) [9]. La deposición se realizó en la muestra M1 (Capítulo 7, sección 7.2). En la figura 34, se observa la mezcla formada por las partículas de carbonil de hierro, FeO_2 (tamaño entre $5\mu m$ y $8\mu m$) con la concentración 1 (Capítulo 8, sección 8.1.1) formada por 140mg de partículas de FeO_2 y 5.50mg de aceite.



Figura 34. Muestra con partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu m$ y $8\mu m$) con la concentración 1, formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite.

Una vez depositada la mezcla sobre la muestra se ha representado en una misma gráfica el efecto de GMI obtenido antes y después de la deposición. En la figura 35, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu m$ y $8\mu m$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo.

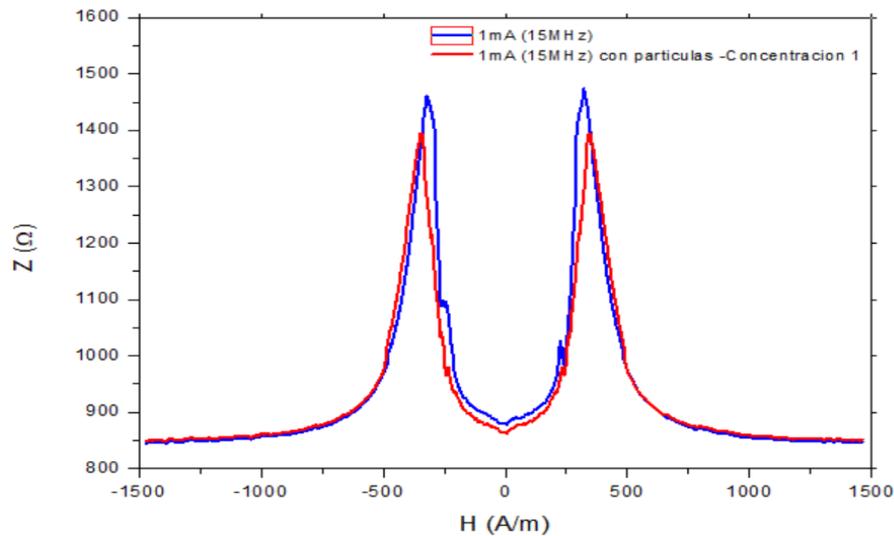


Figura 35. Se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo mencionados.

En la Figura 35, se obtiene la representación gráfica del efecto que producen las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$) sobre los microhilos amorfos ferromagnéticos. Del mismo modo, se observan comportamientos diferentes en las respuestas de GMI. La deposición de partículas de FeO_2 sobre la muestra utilizando la concentración 1 (formada por 140mg de partículas de FeO_2 y 5.5mg de aceite) produce un ligero desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados). Así mismo, la muestra presenta un variación decreciente de impedancia.

Haciendo uso del mismo tipo de partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$) y de la concentración 2 (formada por 276mg de partículas de FeO_2 y 5.5mg de aceite), en la figura 36 se muestra la deposición de partículas de FeO_2 sobre el microhilo amorfo ferromagnético.

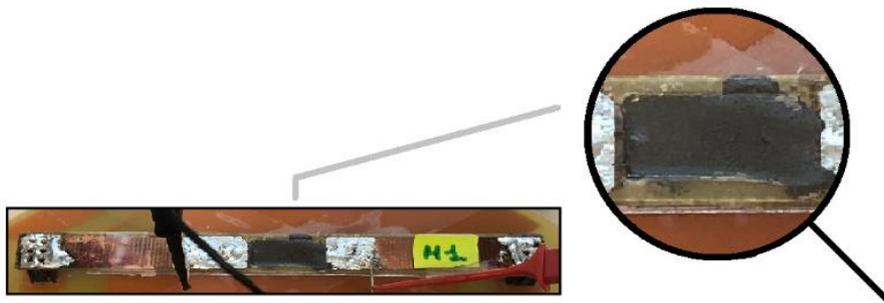


Figura 36. Muestra con partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$) con la concentración 2, formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite.

Una vez depositada la mezcla sobre la muestra se ha representado en una misma gráfica el efecto de GMI obtenido antes y después de la deposición. En la figura 37, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado

de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color verde, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo.

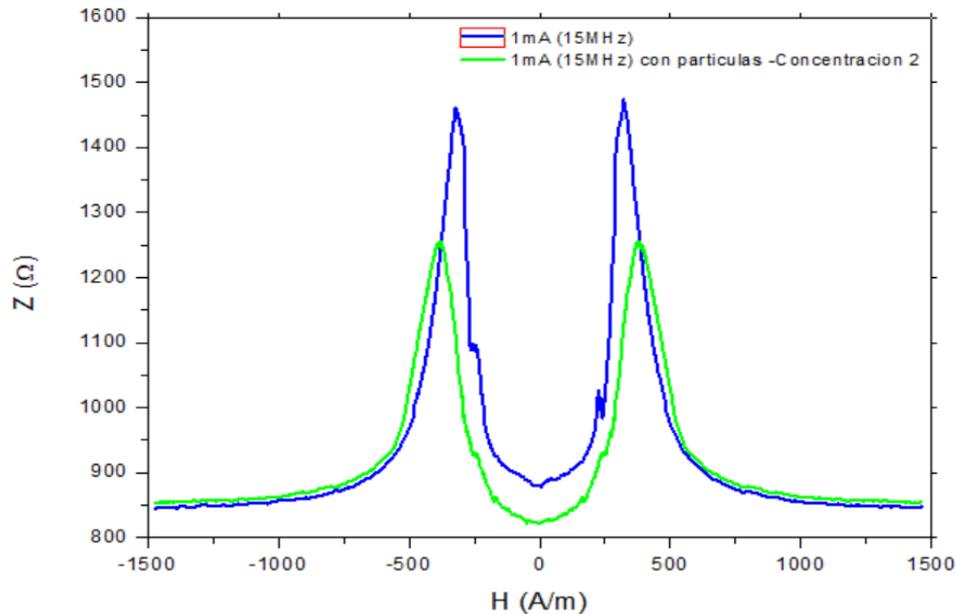


Figura 37. Se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color verde, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite, a la misma corriente de excitación y frecuencia de trabajo mencionados.

De manera análoga, observando las dos respuestas de GMI se analiza el comportamiento que adquiere el microhilo amorfo ferromagnético debido a la deposición de la concentración 2 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Teniendo en cuenta la figura 37, se han analizado ambas repuestas observando un desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados). Además, de una variación decreciente en la impedancia que presenta la muestra.

Siguiendo el mismo procedimiento planteado para las partículas de Fe, se han representado de forma conjunta las diferentes respuestas de GMI obtenidas utilizando las partículas de FeO_2 para las diferentes concentraciones. En la figura 38, en color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color verde, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.

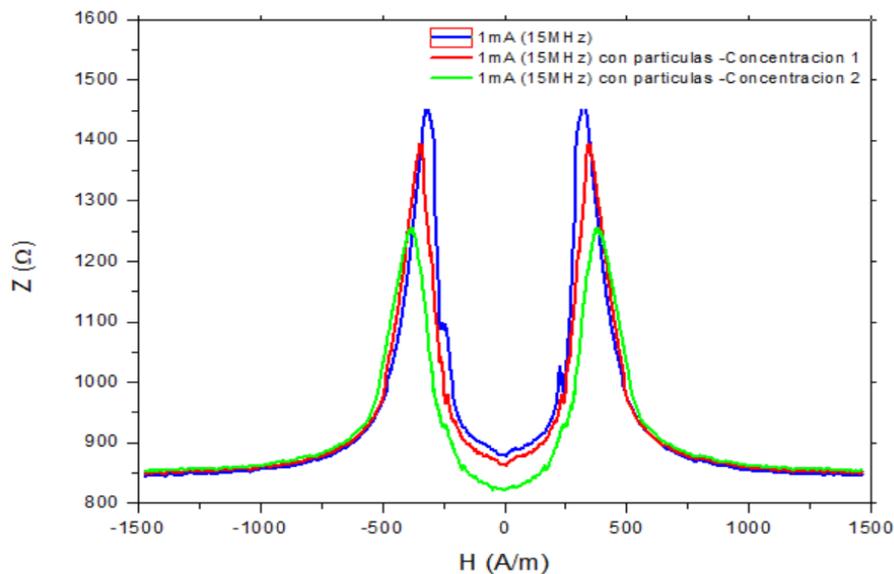


Figura 38. En color azul se muestra la respuesta de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color verde, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.

Con la idea de obtener unas conclusiones de los comportamientos presentes en los microhilos amorfos ferromagnéticos debido a la deposición de partículas, se han analizado de forma conjunta las respuestas de GMI obtenidas en la figura 38. En primer lugar, el desplazamiento de los picos de GMI hacia campos mayores se ve ligeramente más pronunciado en la respuesta de color verde que en la roja. En definitiva, cuanto mayor concentración se vierte sobre la muestra, los picos de GMI se sitúan en mayores valores de campo. Así mismo, la variación de impedancia en la respuesta de GMI, también muestra dependencia del tipo de concentración depositada en la muestra. La representación de GMI con valores de impedancia más pequeños se ha obtenido depositando la concentración 2 sobre la muestra. En definitiva, cuanto mayor concentración se deposita sobre el microhilo, menor valor de impedancia presenta la GMI.

9.1.3 Nanopartículas o 'nanotinta' (tamaño entre 10nm y 90nm)

Otro tipo de partículas empleadas para el estudio sobre la detección basado en microhilos amorfos ferromagnéticos son las nanopartículas con tamaño entre 10nm y 90nm, o también conocidas como nanotinta [12]. Tras el estudio realizado mediante la utilización de partículas sólidas como sensores, se hizo una breve investigación sobre la nanotinta, cómo afecta su detección y qué diferencias existen entre ambos procesos. La nanotinta está compuesta de una composición de partículas de pigmento y un conjunto de compuestos químicos que hacen que su textura no sea compacta, presentando posible viscosidad con relación a su concentración. Los tamaños empleados de las partículas de pigmento están en el intervalo de 10-90nm. La nanotinta empleada para el estudio como sensor se muestra en la figura 39.



Figura 39. Tinta empleada para la variación de GMI formada por nanopartículas de tamaño entre 10nm y 90nm.

A continuación, en la figura 40 se observa la muestra junto con la deposición de las nanopartículas (tamaño entre 10nm y 90nm). Para este proceso, únicamente se hizo uso de una única concentración. La deposición se realizó en la muestra M4 (Capítulo 7, sección 7.2).

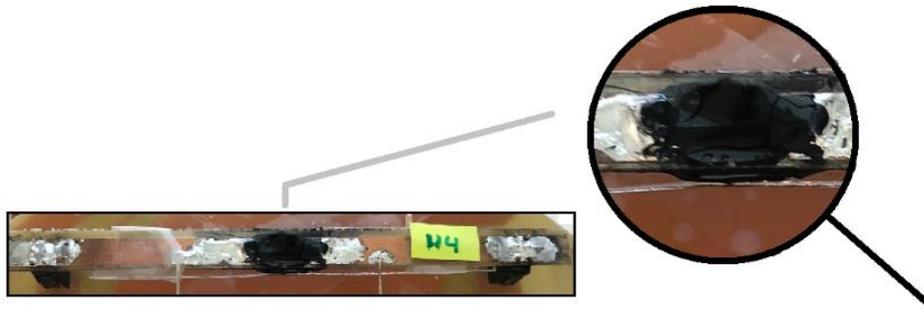


Figura 40. Muestra con nanotinta formada por una composición de partículas de pigmento de tamaño entre 10-90nm.

Una vez depositada la mezcla sobre la muestra se ha representado en una misma gráfica el efecto de GMI obtenido antes y después de la deposición. En la figura 41, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la mezcla de las nanopartículas (tamaño entre 10nm y 90nm).

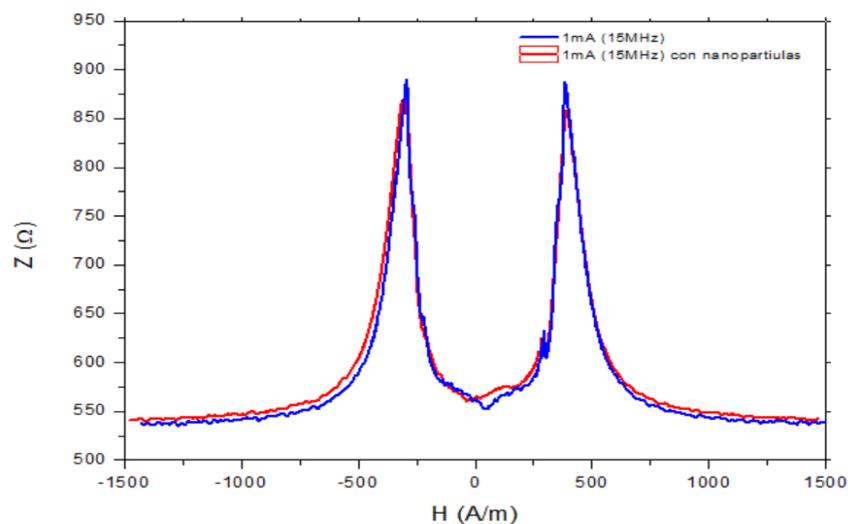




Figura 41, se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la mezcla de las nanopartículas (tamaño entre 10nm y 90nm).

Para finalizar, observando las dos respuestas de GMI obtenidas en la figura 41, se analiza el comportamiento que adquiere el microhilo amorfo ferromagnético debido a la deposición de nanopartículas magnéticas (tamaño entre 10nm y 90nm). Como se ha demostrado y analizado ambas repuestas, se observa una variación decreciente en la impedancia que presenta la muestra. Además de un desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados).

Capítulo 10. Diseño de un sensor y acondicionador para la detección de nanopartículas magnéticas

La idea principal de este diseño es poder comprobar con certeza la variación de impedancia que presentan los microhilos amorfos ferromagnéticos mediante la deposición de nanopartículas con diferentes concentraciones. A continuación, se explican de manera teórica cada una de las etapas que forman el acondicionador, junto con el montaje en la placa Bareboard y las simulaciones obtenidas mediante el osciloscopio.

10.1 Diseño. Etapas del acondicionador.

10.1.1 Fuente de corriente

Debido al uso de una corriente de excitación fija en la muestra, se ha diseñado el circuito mostrado en la figura 42.

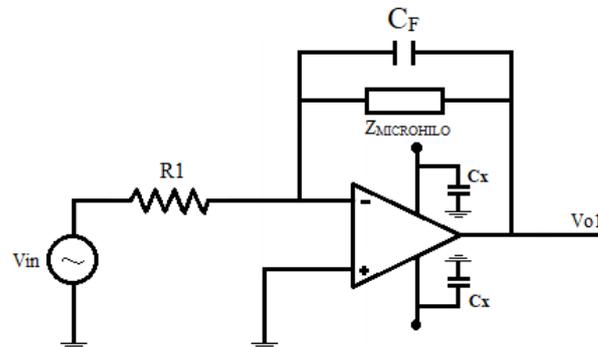


Figura 42. Esquema fuente de corriente

La configuración superior está formada por el operacional LM7171 [13], adecuado para trabajar a altas frecuencias; una resistencia de carga (R_1) con un valor de $1k\Omega$ (resistencia de carga recomendada por el fabricante); el microhilo que se desea medir y un condensador en paralelo a la muestra. El uso del condensador (C_F) ayuda a disminuir las oscilaciones producidas por el polo dominante al trabajar en altas frecuencias. Además, tanto en la entrada de tensión positiva como negativa de cada uno de los operacionales, se han empleado dos condensadores (C_x) en serie, un condensador electrolítico de $4.7\mu F$ y otro cerámico de $100nF$ para evitar la inserción de posibles interferencias.

10.1.1.1 Bobinas Helmholtz

Para el diseño del acondicionador, se han empleado unas bobinas Helmholtz para polarizar a la muestra en un punto tras comprobar que el campo en el interior de estas es prácticamente uniforme en el tramo en el que se encuentra el microhilo. Las bobinas Helmholtz están formadas por dos bobinas circulares coaxiales sobre un eje común con corrientes idénticas fluyendo en el mismo sentido. Conociendo el radio de la bobina, se puede calcular la separación necesaria para conseguir un campo más uniforme en la parte central de esta. En la figura 43, se muestran las líneas de campo magnético generado por unas bobinas Helmholtz.

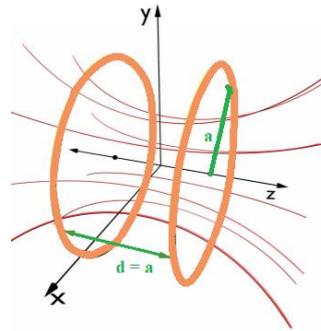


Figura 43. Simulación de las líneas del campo magnético generado por unas bobinas Helmholtz separadas a una distancia d , de igual valor que el radio, a , de cada bobina.

Por último, para comprobar que funcionan correctamente se realiza la caracterización de las bobinas. Introduciendo la sonda del gausímetro en el centro de las bobinas ($z=0$) y variando la corriente, se comprueba que el campo en el interior es el esperado. La relación corriente-campo obtenida tiene un comportamiento lineal. En la figura 44 se muestran ambas bobinas Helmholtz empleadas en el proyecto.



Figura 44. Bobinas Helmholtz para la excitación de corriente de la muestra.

La resistencia total que presentan las bobinas es de 4.67Ω . Una de ellas posee 2.31Ω y la otra 2.36Ω .

10.1.1.2 Diseño y simulaciones en la placa bareboard

En la figura 45.a se implementa el diseño teórico de la fuente de corriente en la placa bareboard, y en la figura 45.b se muestra la señal obtenida mediante el osciloscopio a la salida de esta etapa.

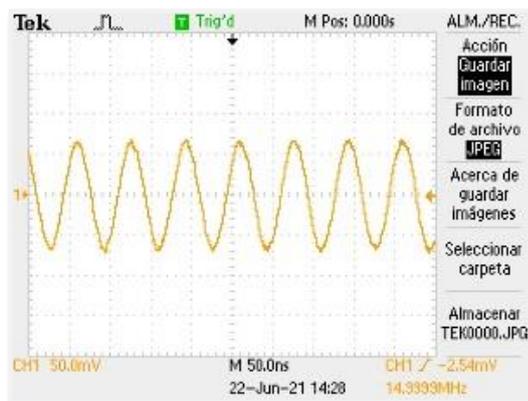
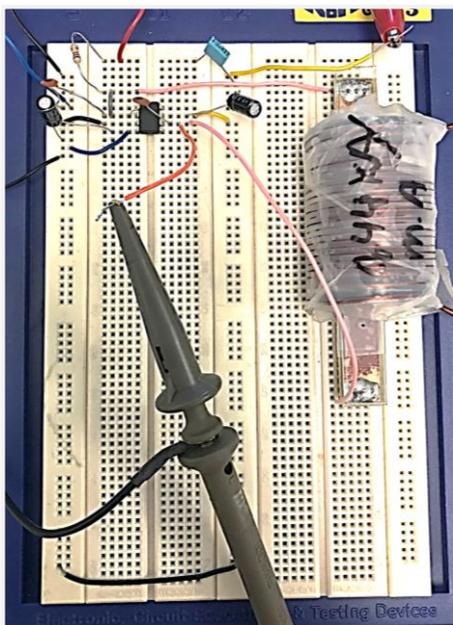


Figura 45.a. Montaje de la fuente de corriente en la placa Bareboard

Figura 45.b. Señal a la salida de la fuente de corriente obtenida mediante el osciloscopio, observándose una señal sinusoidal de amplitud en torno a $1.4V_{pp}$ y una frecuencia de 15MHz.

En la figura 45.b se muestra la señal obtenida mediante el osciloscopio a la salida de la primera etapa del acondicionador. En la parte inferior de la figura se observa que la frecuencia de trabajo es a 15MHz y la amplitud de la señal es de $1.4V_{pp}$. Como bien se ha documentado en la parte teórica, el uso de los condensadores tanto en la entrada de tensión positiva como negativa del operacional disminuyen la inserción de las posibles interferencias, observando una señal de salida sin ondulaciones.

10.1.2 Rectificador de media onda con salida positiva

A continuación, a la salida de la configuración anterior, se ha empleado un circuito rectificador de media onda. Para la conversión de un amplificador operacional inversor en un circuito rectificador, se han añadido dos diodos, como se muestra en la figura 46.

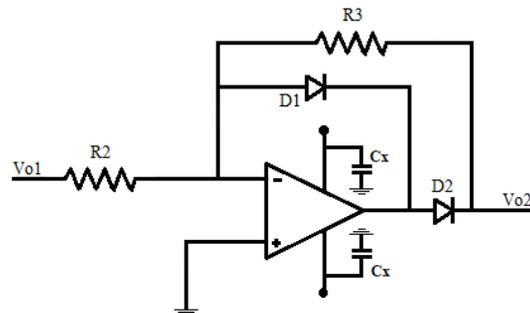


Figura 46. Circuito rectificador de media onda

Los diodos requeridos para el montaje del rectificador tienen que presentar una frecuencia de trabajo aproximadamente a los 10MHz. Para ello, estudiando el comportamiento de diferentes clases de diodos mediante las hojas de los fabricantes, se probaron diferentes componentes.

En un principio se utilizaron dos diodos BAS70 [14], sin embargo, la señal obtenida a la salida del rectificador no era del todo limpia. No se apreciaba de forma clara la señal rectificada, mostrando diferentes oscilaciones. A continuación, se sustituyeron por dos diodos 1N4148 [15]. Tras observar de nuevo la señal de salida se comprobó de forma más clara la señal rectificada con salida positiva, dejando ambos componentes como parte del diseño.

Por otro lado, mediante los valores de las resistencias R_2 y R_3 se ha amplificado la ganancia en un orden de dos. Eligiendo unos valores de $R_2 = 470\Omega$ y $R_3 = 1000\Omega$.

10.1.2.1 Diseño y simulaciones en la placa bareboard

En la figura 47.a se implementa el montaje del circuito rectificador de media onda diseñado de forma teórica; y en las figuras 47.b y 47.c se muestran las señales obtenidas a la salida del rectificador. En la Figura 47.b se observa la señal a una frecuencia de trabajo de 1MHz, mientras que en la Figura 47.c, se obtiene la señal a una frecuencia de 15MHz de trabajo.

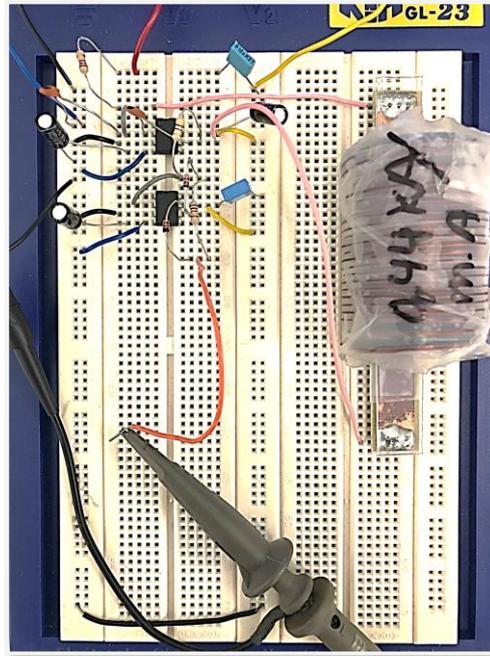


Figura 47.a Montaje en la placa bareboard de la etapa formada por el rectificador de media onda

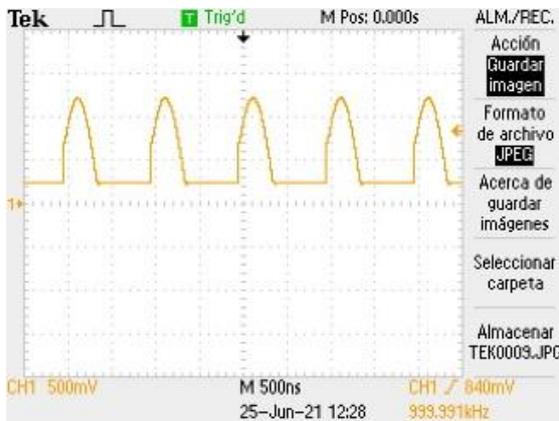


Figura 47.b. Imagen capturada mediante el osciloscopio a una frecuencia de 1MHz.

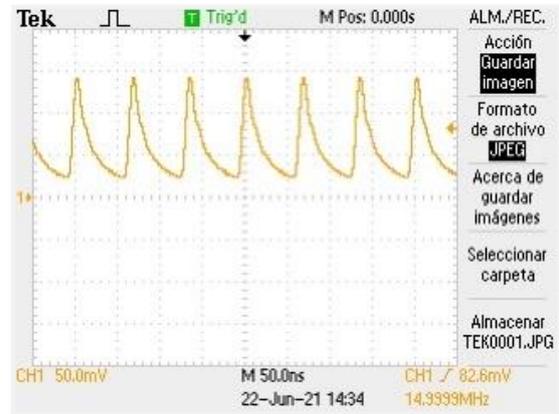


Figura 47.c. Imagen capturada mediante el osciloscopio a una frecuencia de 15MHz.

Comparando las Figuras 47.b y 47.c, se observa que la respuesta obtenida a frecuencias bajas tiene mejor comportamiento que a frecuencias elevadas. Cuando la frecuencia de trabajo es de 15MHz la señal obtenida se encuentra recortada, mientras que a 1MHz se obtiene toda el ciclo positivo de la señal rectificadora. Cuanto mayor valor de frecuencia, mayores efectos del conjunto de componentes empleados en la placa interfieren en la señal capturada.

10.1.3 Filtro paso bajo

Para el diseño del filtro paso bajo, se ha empleado un condensador en paralelo con una resistencia, como se muestra en la figura 48.

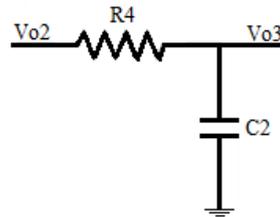


Figura 48. Circuito filtro paso bajo

El uso de este filtro permite el paso de las frecuencias bajas hasta una frecuencia elegida (frecuencia de corte, f_c) atenuando las frecuencias superiores a esta, y obteniendo a la salida de este una señal continua. La frecuencia de corte se puede calcular mediante la siguiente ecuación X.

$$f_{corte} = \frac{1}{2\pi C_2 R_4} \quad (10.1)$$

Eligiendo unos valores de $C_2 = 1 \mu\text{F}$ y $R_4 = 220\text{k}\Omega$, se obtiene una $f_{corte} = 0.723\text{Hz}$. La frecuencia de corte ha sido calculada de manera que las frecuencias superiores a esta se atenúen, permitiendo el paso de frecuencias inferiores, y así, conseguir un el funcionamiento del sensor planteado.

10.1.3.1 Diseño y simulaciones en la placa bareboard

En la figura 49.a se implementa el diseño teórico del filtro paso bajo en la placa bareboard, y en la figura 49.b se muestra la señal obtenida mediante el osciloscopio a la salida de esta etapa.

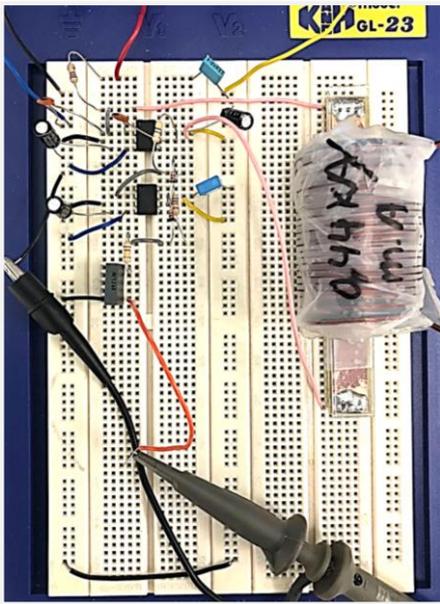


Figura 49.a. Montaje del filtro paso bajo en la placa bareboard.



Figura 49.b. Imagen capturada mediante el osciloscopio a la salida del filtro paso bajo.

En la Figura 49.b se observa la señal a la salida del filtro paso bajo. El uso de este filtro se debe al objetivo final del sensor, capaz de medir corriente continua. De este modo, se desea eliminar toda la alta frecuencia necesaria en las primeras etapas del acondicionador para el tratado de la señal.

10.1.4 Amplificador

A continuación, se ha diseñado un amplificador. Para observar la posible detección de las nanopartículas es conveniente aumentar la amplitud de la señal de salida.

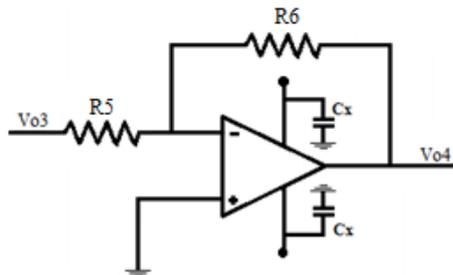


Figura 50. Circuito amplificador

Mediante la siguiente ecuación 10.2 y dependiendo el valor de ganancia buscado, se obtendrán los valores de las resistencias.

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-V_{in} \left(\frac{R_6}{R_5}\right)}{V_{in}} = -\frac{R_6}{R_5} \quad [lineal] \quad (10.2)$$

Para una ganancia de dos, se han elegido unos valores de $R_6 = 1000\Omega$ y de $R_7 = 470\Omega$.

10.1.4.1 Diseño y simulaciones en la placa bareboard

En la figura 51.a se implementa el diseño teórico del amplificador en la placa bareboard, y en la figura 51.b se muestra la señal obtenida mediante el osciloscopio a la salida de esta etapa.

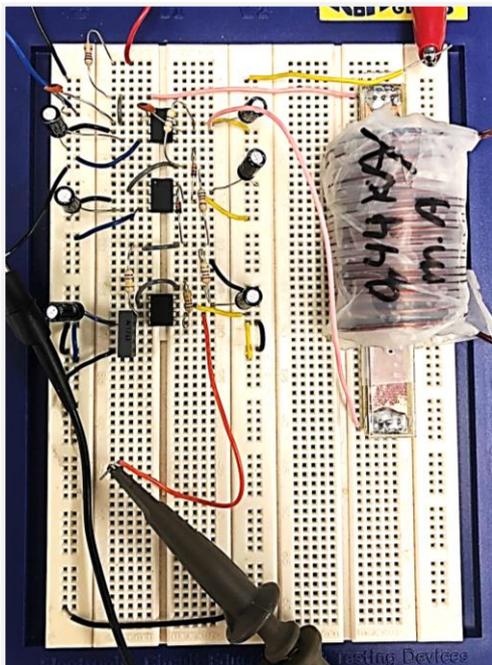


Figura 51.a. Montaje del amplificador en la placa bareboard.



Figura 51.b. Imagen capturada mediante el osciloscopio a la salida del filtro paso bajo.

En la Figura 51.b, se muestra la señal obtenida a la salida de la etapa amplificadora. A esta señal se le ha aplicada una amplificación de la señal con respecto a la etapa anterior, concretamente de una ganancia aproximadamente de 2.

10.1.5 Restador

A la salida del filtro paso bajo se ha añadido un restador. Haciendo uso de la entrada inversora y no inversora y restándolas, se obtiene a la salida la diferencia en continua. En la figura 52, se muestra la configuración empleada.

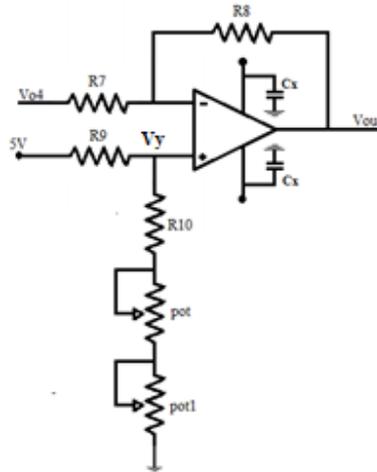


Figura 52. Circuito

Observando el esquemático de la figura 52 se pueden sacar un conjunto de expresiones que ayudaran a obtener los valores de los componentes. En cuanto al valor de la entrada positiva del operacional, se ha fijado que sea de 5V ya que todo el diseño está suministrado con esta alimentación y, a su vez, V_{04} es un valor conocido, la salida de la etapa anterior. Por lo tanto, el objetivo es obtener los valores de las resistencias para poder conseguir un valor de $V_{out} = 0$. En primer lugar, se obtiene la ecuación 10.3 a la salida del restador.

$$V_{out} = V_y \left(1 + \frac{R_8}{R_7} \right) - V_{04} \left(\frac{R_8}{R_7} \right) \quad (10.3)$$

Se eligen unos valores de R_8 y R_7 para una ganancia en concreto. En este caso, la ganancia buscada en la última etapa del acondicionador debe ser elevada para observar de forma clara la variación de GMI. Para unos valores de $R_8 = 47\text{k}\Omega$ y $R_7 = 1\text{k}\Omega$, la ganancia estimada es 47. A continuación, la tensión V_y corresponde a un divisor de tensión, obtenida en la ecuación 10.4.

$$V_y = 5V \left(\frac{R_9}{R_9 + R_{10}'} \right) \quad (10.4)$$

Siendo R_{10}' , el conjunto de la R_{10} , el potenciómetro y el potenciómetro1 en serie. Conociendo el valor de V_y , se puede obtener una relación entre R_9 y R_{10}' , y así obtener los valores de los componentes.

10.1.5.1 Diseño y simulaciones en la placa bareboard

En la figura 53.a se implementa el diseño teórico del circuito restador en la placa bareboard, y en la figura 53.b se muestra la señal obtenida a la salida del acondicionador.

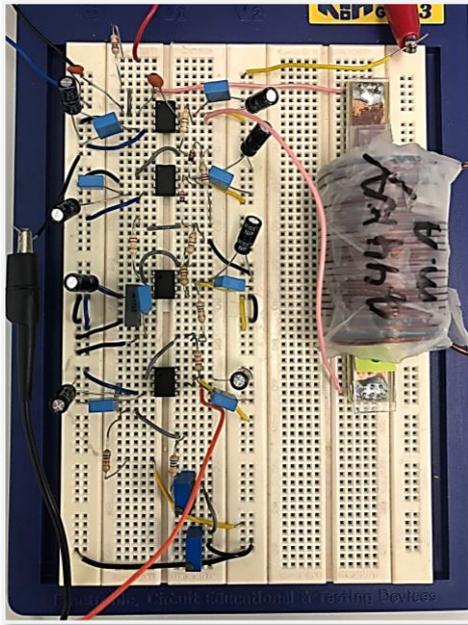


Figura 53.a. Montaje del circuito restador en la placa bareboard.



Figura 53.b. Imagen capturada mediante el osciloscopio a la salida del acondicionador.

En la figura 53.b, se muestra la señal obtenida a la salida del acondicionador. Por lo tanto, eligiendo unos valores adecuados de resistencias, el objetivo es conseguir un valor de $V_{out} = 0$.

Para finalizar esta sección, en la figura 54 se muestra el conjunto de instrumentos utilizados para el desarrollo del sensor.

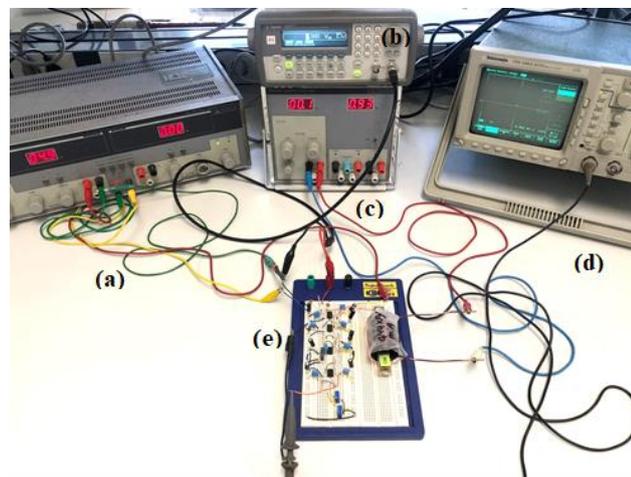


Figura 54. Instrumentos empleados para la implementación del acondicionador

- (a) Generador de tensión y corriente.
- (b) Generador de señales.
- (c) Fuente de corriente.
- (d) Osciloscopio.
- (e) Placa de montaje del acondicionador

10.2 Resultados experimentales

A continuación, introduciendo una señal triangular en el generador de corriente (*Kepeco Power Supply, BOP 72-14MG*) ha sido posible obtener de forma gráfica la representación de GMI en el osciloscopio. Variando la frecuencia y la amplitud de la corriente de excitación de la bobina, se han obtenido diferentes representaciones de GMI en el osciloscopio. Para ello, en primera instancia se ha empleado una bobina de 0.44kA/mA para inducir la corriente por el microhilo.

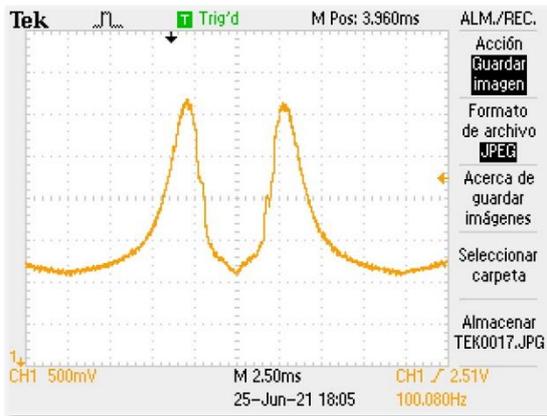


Figura 55. Respuesta del microhilo capturada en el osciloscopio introduciendo una señal triangular para excitar la corriente de la bobina que induce a la muestra a una frecuencia de 25Hz y una amplitud de corriente pico a pico de 5A.

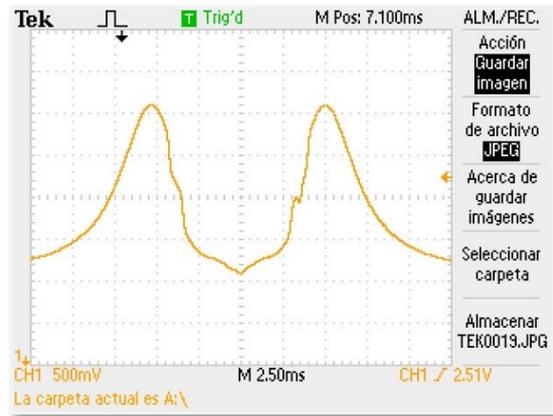


Figura 56. Respuesta del microhilo capturada en el osciloscopio introduciendo una señal triangular para excitar la corriente de la bobina que induce a la muestra a una frecuencia de 10Hz y una amplitud de corriente pico a pico de 7A.

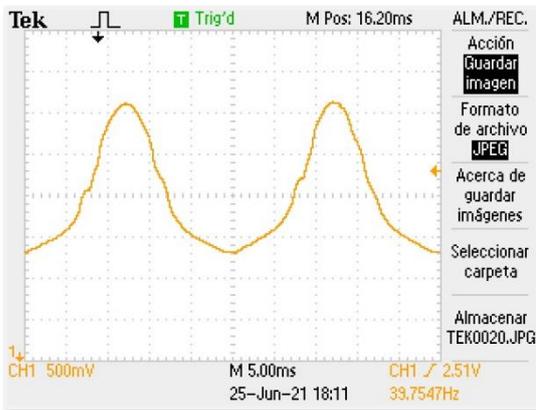
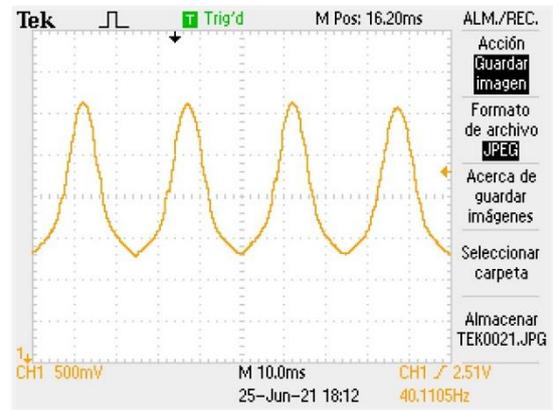


Figura 57. Respuesta del microhilo capturada en el osciloscopio introduciendo una señal triangular para excitar la corriente de la bobina que induce a la muestra a una frecuencia de 10Hz y una amplitud de corriente pico a pico de 3A.



Las figuras 55, 56 y 57 muestran las diferentes representaciones de GMI obtenidas tras variar la frecuencia y la amplitud de corriente de la señal triangular introducida para excitar la corriente de la bobina que induce la muestra. Cuanto mayor es la amplitud de corriente pico a pico, más longitudinal es la zona de los extremos. Así mismo, la frecuencia de la señal capturada aumenta con respecto al valor de frecuencia de la señal triangular.

A continuación, tras comprobar el correcto funcionamiento del circuito conjunto con el manejo de la fuente de corriente, se hizo uso de las bobinas Helmholtz mencionadas en el *Capítulo 10, sección 10.1.1.1*. En la figura 58, se muestra el circuito final empleado para analizar la posible detección de nanopartículas magnéticas basadas en microhilos amorfos ferromagnéticos.

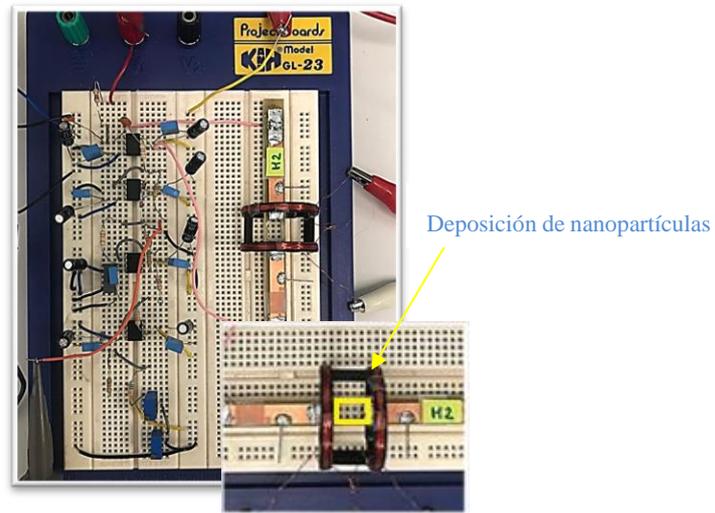


Figura 58. Circuito final para el estudio de la detección de nanopartículas magnéticas basado en microhilos amorfos ferromagnéticos.

Posteriormente, introduciendo una señal triangular para excitar la corriente de la bobina que induce a la muestra a una frecuencia de 6Hz y una amplitud de corriente pico pico de 1A, se observa la señal representada en la pantalla del osciloscopio, comprobando el funcionamiento de ambas bobinas Helmholtz.

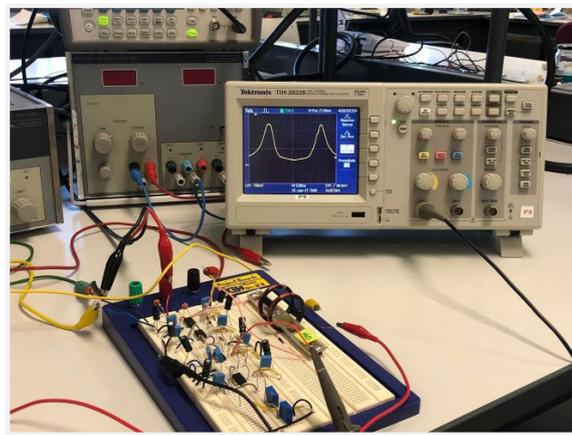


Figura 59. Representación gráfica mediante el osciloscopio de la GMI obtenida sin la inserción de partículas en la muestra, juntos a las pantallas de la fuente de corriente con la señal triangular insertada como entrada para la corriente de excitación de la bobina.

Para finalizar y concluir con dicho proyecto, se van a comprobar las posibles variaciones presentes en los microhilos amorfos ferromagnéticos tras la deposición de las nanopartículas magnéticas utilizando el sensor implementado en la placa Bareboard. De esta forma se podrá visualizar en el osciloscopio la variación de GMI. Para el desarrollo de este proceso se ha hecho uso de la muestra M5. En la figura 60, se observa la representación de GMI que presenta la muestra sin las deposición de nanopartículas.

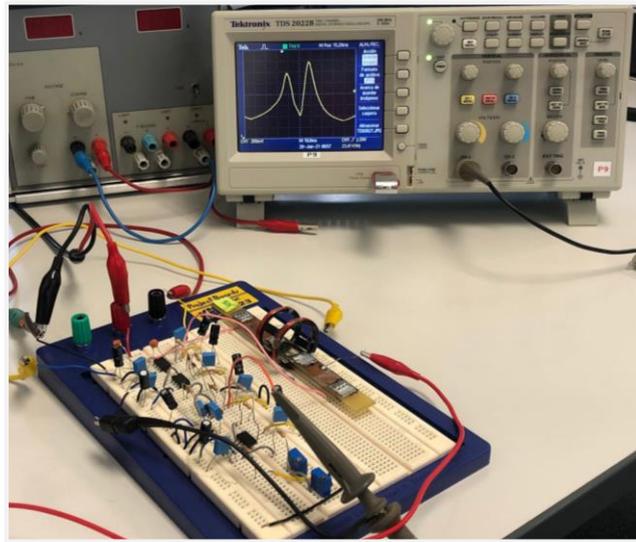


Figura 60. Representación de GMI de la muestra M5 sin la deposición de nanopartículas.

La GMI obtenida mediante el osciloscopio presenta una pequeña variación en los valores máximos de impedancia. Una solución para igualar ambos picos es la inserción de un valor de offset en el osciloscopio. Así mismo, en la figura 61.a, se observa el sensor con la deposición de nanopartículas sobre la muestra; y en la figura 61.b se obtiene el comportamiento de la muestra frente a las nanopartículas.

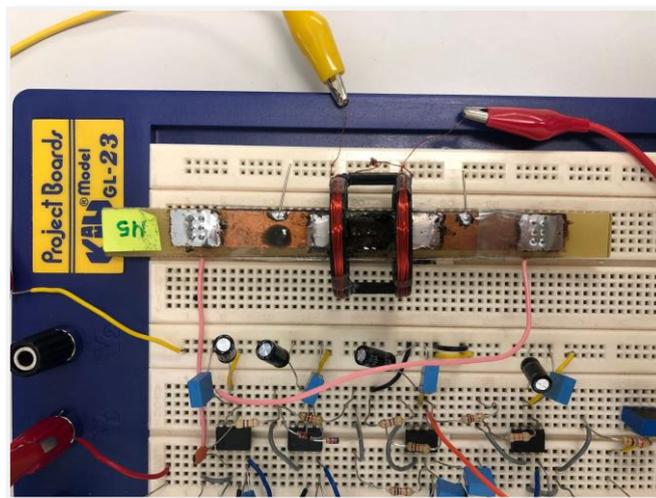


Figura 61.a. Muestra M5 con la deposición de partículas de Fe (tamaño entre $50\ \mu\text{m}$ y $80\ \mu\text{m}$) - Concentración 2 (formada por 276 mg de partículas y 5.50mg de aceite).

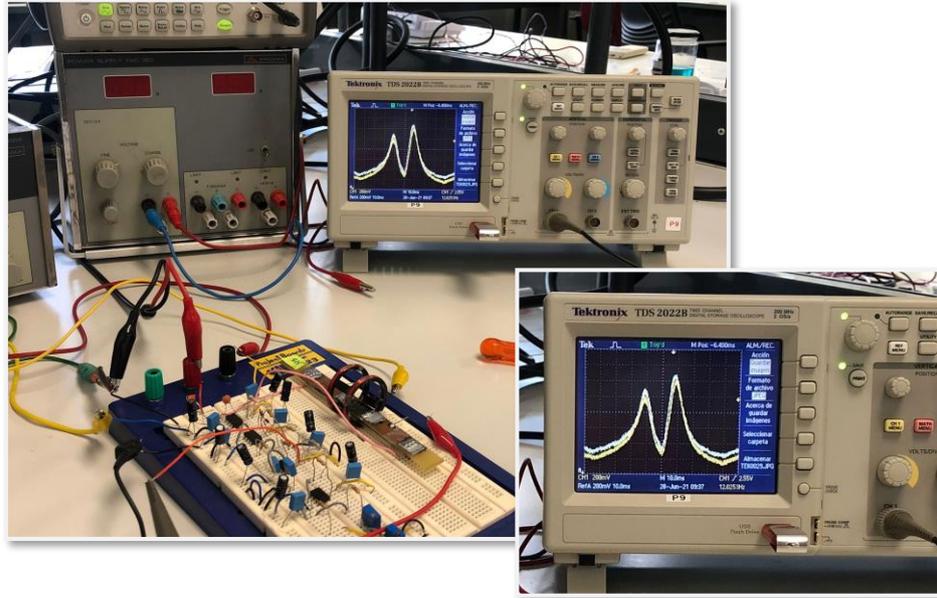


Figura 61.b. Implementación física del sensor junto con la deposición de nanopartículas magnéticas y la señal obtenida en el osciloscopio. En color blanco se obtiene la representación de GMI capturada sin la deposición de nanopartículas, y en color amarillo una vez se ha depositado la concentración.

Para comprobar de forma visual ambas señales, en la figura 62, se obtiene una imagen capturada directamente del osciloscopio, mostrando en color gris la representación de GMI capturada sin la deposición de nanopartículas, y en color naranja una vez depositada la concentración. [18]

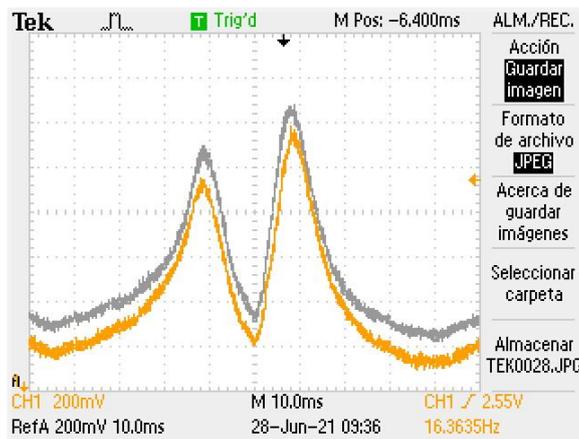


Figura 62. En color gris se obtiene la representación de GMI capturada sin la deposición de nanopartículas, y en color naranja una vez depositada la concentración.

Para finalizar, observando las dos respuestas de GMI obtenidas en la figura 62, se analiza el comportamiento que adquiere el microhilo amorfo ferromagnético debido a la deposición de partículas de Fe. Como se ha demostrado y analizado ambas repuestas, se observa una variación decreciente en la impedancia que presenta la muestra. Además de un desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados).



10.3 Diseño en el entorno Pspice

Una vez montado y verificado en el circuito de la placa bareboard que los resultados son los obtenidos de forma teórica y mediante el sistema de medidas en el entorno de Labview, se procedió al diseño del circuito en el entorno Pspice.

Dentro del Anexo C, se adjunta una vista conjunta del circuito implementado en OrCAD. Todo el diseño se ha implementado de forma que posteriormente se pudiese implementar de forma eficaz en una placa de circuito impreso.

La placa de circuito impreso o PCB es un soporte físico en el cual se instalan los distintos componentes eléctricos conectados entre ellos. En este caso, se diseñaría el sensor previamente estudiado. La idea principal era emplear una distribución a dos caras, top y bottom.

Debido a la falta de tiempo, se ha diseñado todo el circuito en OrCAD y, se han diseñado los footprints referentes a los componentes carentes de ellos.

Capítulo 11. Resultados y Conclusiones

Respecto al desarrollo del proyecto de un sensor para la detección de nanopartículas magnéticas basado en un microhilo amorfo ferromagnético con Magnetoimpedancia gigante, destacan dos partes importantes. Un estudio del efecto de GMI en las muestras empleadas, y el diseño de un sensor para la detección de nanopartículas magnéticas.

Por un lado, se encuentra el estudio realizado sobre la caracterización estructural y morfológica de los microhilos amorfos ferromagnéticos utilizados, y las diferentes medidas obtenidas mediante el sistema de adquisición de datos implementado mediante LabView. Previo a la toma de medidas, era necesario desarrollar un sistema de calibración mediante Matlab, para obtener unas medidas correctas de las muestras. Para ello, se usaron dos sondas activas diferenciales y un conjunto de resistencias no inductivas, donde finalmente, el error obtenido en la medida era cercano al 0%.

A continuación, se realiza el montaje de las muestras junto con sus portamuestras para ser medidos, y así obtener las diferentes respuestas de GMI en función de la frecuencia de trabajo y la corriente de excitación de la muestra. Por consiguiente, resulta óptimo el efecto de la Magnetoimpedancia gigante para una frecuencia de trabajo de 15MHz y una corriente de excitación de 1mA. En la figura 63, se muestra la respuesta de GMI obtenida en la muestra M0, cuyo ratio de GMI es del 98.9%.

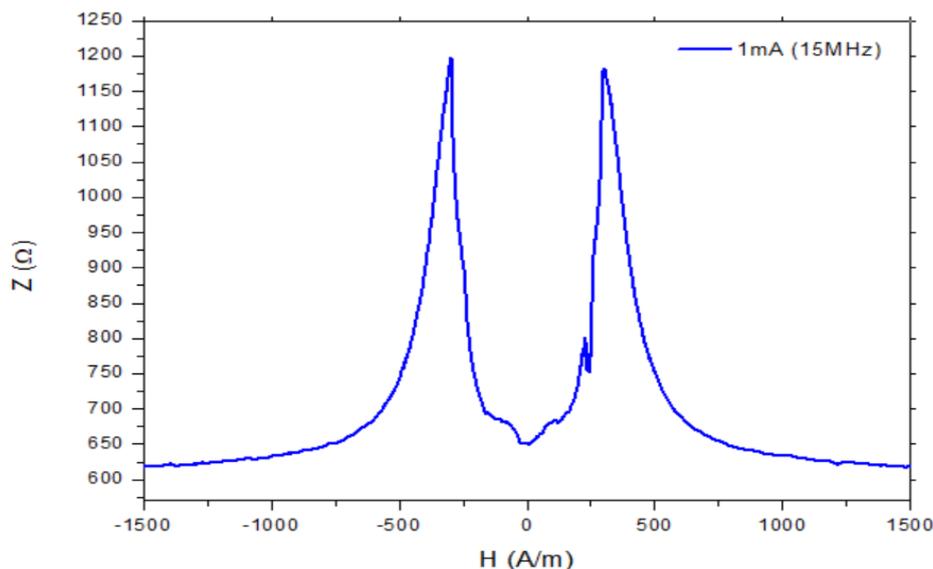


Figura 63. Representación de la GMI de la muestra M0 a una corriente de excitación de 1mA y a una frecuencia de trabajo de 15MHz. El ratio de GMI es del 98.9%

De manera análoga, se diseña un sensor con el objetivo de realizar un estudio acerca de la detección de nanopartículas magnéticas basadas en microhilos amorfos ferromagnéticos. Mediante el uso de dos bobinas Helmholtz alrededor de la muestra se genera un campo en función de la corriente de forma lineal. De esta manera, primero se realiza el estudio teórico del sensor, posteriormente, se elabora el montaje en la placa bareboard, y finalmente, se implementa mediante el programa OrCAD con sus respectivas simulaciones. En la figura 64, se muestra la simulación obtenida de la respuesta de GMI mediante el circuito diseñado en la placa Bareboard.

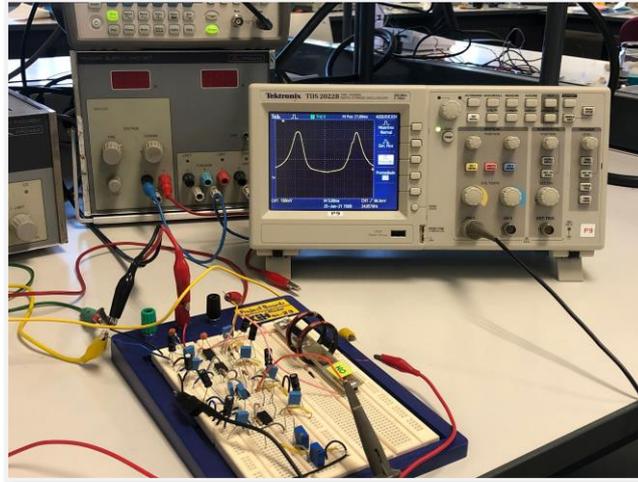


Figura 64. Respuesta de la GMI obtenida mediante el sensor diseñado en la placa bareboard. Presenta un sensibilidad horizontal de 500mV/div.

Una vez se han simulado diferentes respuestas de GMI mediante el osciloscopio variando la frecuencia y la amplitud de corriente de la señal triangular a la entrada del sensor, se procede con las pruebas de la deposición de los diferentes tipos de partículas utilizadas en el desarrollo del proyecto. En primer lugar, mediante el uso del sistema de adquisición de datos, se midieron diferentes muestras depositando la mezcla para analizar los diferentes comportamiento que presenta la muestra. En las figuras 65.a, 65.b y 65.c se muestran las diferentes respuestas de GMI representadas mediante el software de análisis de datos, con diferentes partículas y concentraciones. Mientras que en la figura 65.d, se muestra el montaje del diseño del sensor en la placa bareboard con la deposición de partículas y la señal obtenida mediante el osciloscopio.

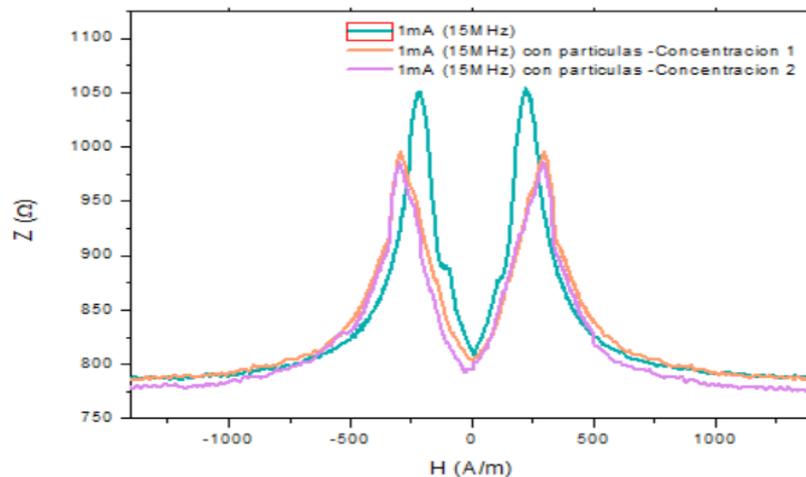


Figura 65.a. La deposición se realizó sobre la muestra M5 (*Capítulo 7, sección 7.2*). Se observan diferentes comportamientos de Magnetoimpedancia gigante En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color naranja, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de Fe (tamaño entre 50 μ m y 80 μ m), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color morado, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de Fe (tamaño entre 50 μ m y 80 μ m), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.

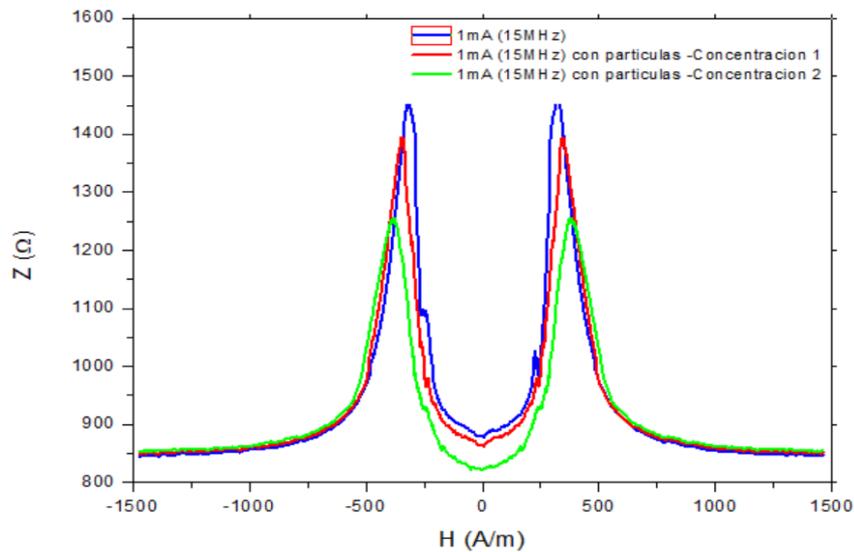
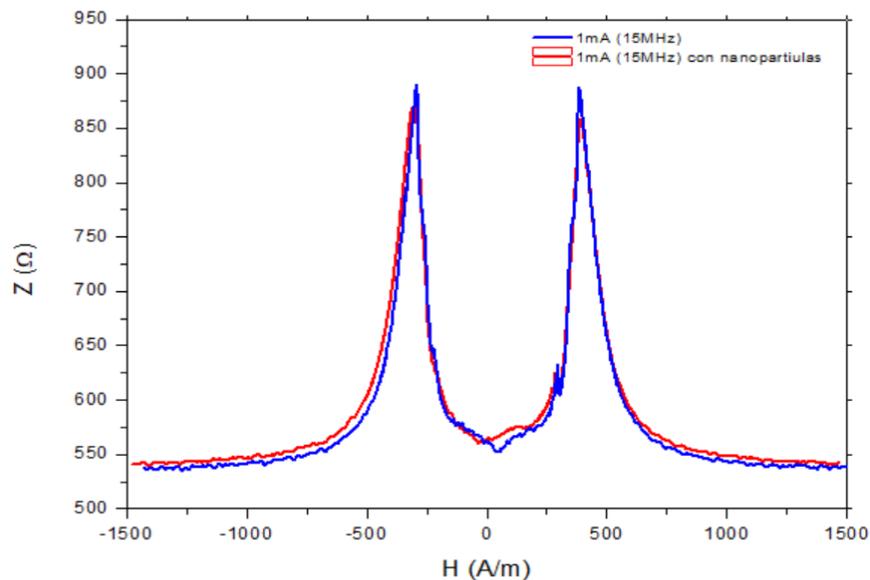


Figura 65.b. La deposición se realizó sobre la muestra M1 (Capítulo 7, sección 7.2). En color azul se muestra la respuesta de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético; en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 1 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 140mg de partículas y 5.5mg de aceite; y en color verde, el resultado obtenido de GMI depositando la concentración 2 de las partículas de FeO_2 (tamaño entre $5\mu\text{m}$ y $8\mu\text{m}$), formada por 276mg de partículas y 5.5mg de aceite. Todas ellas aplicando una corriente de excitación de 1mA y una frecuencia de trabajo de 15MHz.



En la figura 65.c. La deposición se realizó sobre la muestra M1 (Capítulo 7, sección 7.2) se observa el comportamiento obtenido de la Magnetoimpedancia gigante. En color azul se muestra el resultado de GMI que presenta el microhilo amorfo ferromagnético a 1mA de corriente de excitación y a 15MHz de frecuencia de trabajo; y en color rojo, el resultado obtenido de GMI depositando la mezcla de las nanopartículas (tamaño entre 10nm y 90nm).

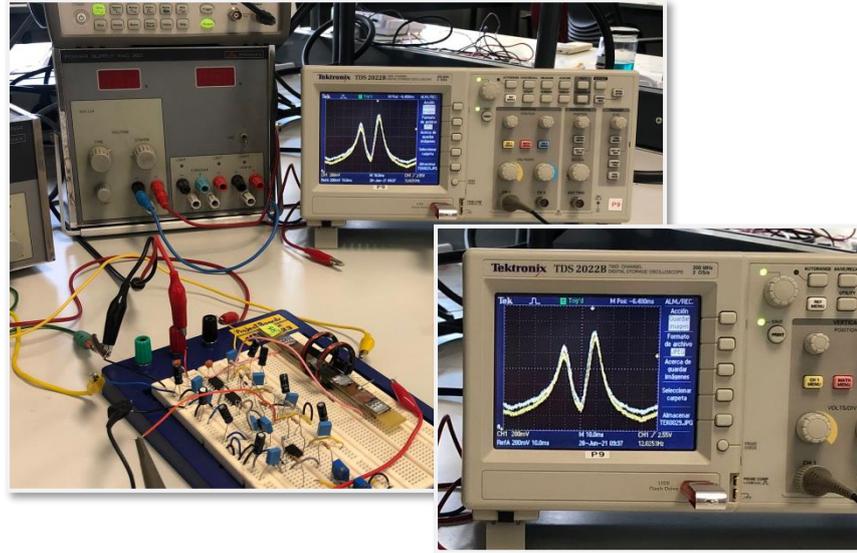


Figura 65.d. Implementación física del sensor junto con la deposición de nanopartículas magnéticas y la señal obtenida en el osciloscopio. En color blanco se obtiene la representación de GMI capturada sin la deposición de nanopartículas, y en color amarillo una vez se ha depositado la concentración. La sensibilidad horizontal es de 200mV/div.

Observando las figuras 65.a, 65.b y 65.c, representadas mediante el software de adquisición de datos, y la figura 65.d obtenida mediante el sensor diseñado en la placa bareboard, se observan los mismos comportamientos independientemente de las partículas empleadas. Sin embargo, de forma individual se ven condicionadas con las concentraciones depositadas. Las diferentes respuestas de GMI aplicando la deposición de las partículas presentan una variación decreciente de la impedancia que presenta la muestra y un desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados). Realizando una investigación y un análisis de las respuestas obtenidas tras la deposición de diferentes tipos de partículas y concentraciones se han obtenido dos hipótesis en función de los resultados obtenidos.

11.1.1 Primera hipótesis: Desplazamiento del pico de GMI hacia un campo mayor (en ambos lados).

Las muestras empleadas a lo largo del proyecto son aleaciones ricas en Co, con magnetostricción negativa, $\sim 10^{-6}$ (Capítulo 1). El proceso de imanación consiste en una rotación cuasi-reversible desde la dirección circunferencial hasta la axial, con el aumento del campo aplicado. Los microhilos amorfos ferromagnéticos tienen una configuración circular de la estructura de dominios, debido a su fácil imanación. Al depositar las nanopartículas de Fe sobre la muestra (microhilo amorfo ferromagnético rico en Co) se genera un campo opuesto al campo externo aplicado. Por lo tanto, para compensar el campo generado por las nanopartículas, se observa un desplazamiento de ambos picos de GMI hacia campos mayores. En la figura 66, se representa de forma gráfica el conjunto de campos magnéticos presentes en el Proceso de imanación de materiales ricos en Co con magnetostricción negativa junto con la deposición de las nanopartículas.

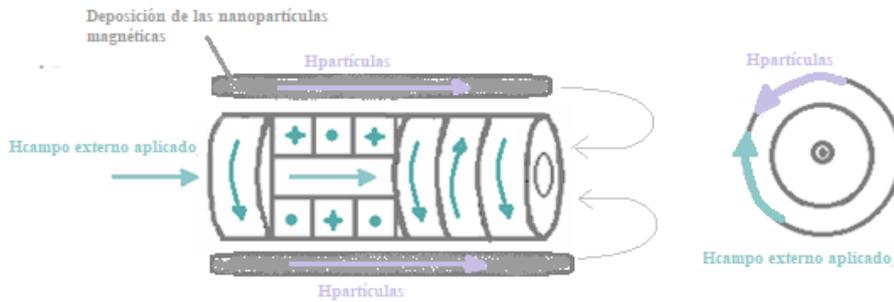


Figura 66. Proceso de imanación de materiales ricos en Co con magnetostricción negativa.

En definitiva, este fenómeno se produce por la presencia de un campo adicional en sentido opuesto al campo externo aplicado, en este caso, producido por la presencia de las nanopartículas magnéticas. Mediante los resultados obtenidos, el desplazamiento de los picos de GMI hacia el exterior depende tanto del tamaño de las partículas como de la concentración utilizada. Es decir, cuanto mayor tamaño y mayor concentración poseen las partículas de Fe utilizadas, más desplazados se obtienen los picos de GMI.

11.1.2 Segunda hipótesis: Variación decreciente de la impedancia que presenta la muestra.

Por la muestra se hace circular una corriente eléctrica produciendo un campo magnético cuya dirección es perpendicular a dicha corriente. Con el campo externo aplicado sobre el material se depositan las nanopartículas sobre la muestra, generando unas corrientes inducidas dentro del conductor, conocidas como corrientes de Foucault. El sentido de la corriente de Foucault en el interior del conductor tiene el mismo sentido que el campo que poseen las nanopartículas. En la figura 67, se muestra el microhilo junto con la deposición de nanopartículas, mostrando los diferentes campo magnéticos y corrientes generados.

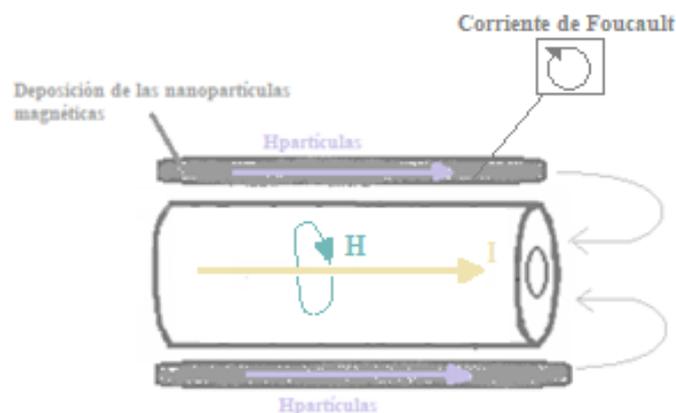


Figura 67, Se muestra el microhilo junto con la deposición de nanopartículas, mostrando los diferentes campos magnéticos y corrientes generados.

Cuando la muestra se ve afectada por un campo magnético externo, el material ferromagnético conductor cambia su permeabilidad magnética circular, suponiendo esto una nueva distribución de la corriente, y por lo tanto, una variación en la impedancia. Mediante la ecuación 11.1, se relaciona la permeabilidad circular y el skin-depth.



$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\phi \omega \sigma}} [m] \quad (11.1)$$

Dado que la impedancia es inversamente proporcional al área efectiva del material, ecuación 11.2 y de acuerdo con la ecuación 11.1, cuanto menores sean los valores de la frecuencia angular, de la conductividad del material o de la permeabilidad magnética circular, mayor penetración (mayor área efectiva, S) y, por lo tanto, menor impedancia.

$$R = \rho \frac{l}{S} [\Omega] \quad (11.2)$$

En conclusión, el motivo por el cual la respuesta de GMI disminuye optando por unos valores inferiores de impedancia tras depositar las nanopartículas de Fe, es debido al comportamiento que ejercen los diferentes fenómenos como, la permeabilidad circular, el efecto pelicular, el área efectiva del material, la impedancia, sobre el material al depositar la mezcla.

Una vez analizados los resultados y planteadas las hipótesis, se observa un comportamiento sensorial presente en los microhilos amorfos ferromagnéticos mediante el uso de nanopartículas magnéticas. Hoy en día, el uso de los nanobiosensores y de la nanotecnología se ha desarrollado como una disciplina de carácter propio en ciencia y tecnología. La escala de este tipo de materiales está entre 1-100nm, siendo esta la clave de este tipo de desarrollo, debido a los cambios que se producen en sus propiedades físicas al dividirse hasta la escala nanométrica. [18][19][20].

Capítulo 12. Bibliografía

- [1] Carbonell, M. V., Flórez, M., Martínez, E., & Álvarez, J. (2017). Aportaciones sobre el campo magnético: historia e influencia en sistemas biológicos. *Intropica*. Published. <https://doi.org/10.21676/23897864.2282>.
- [2] M.-H. Phan y H.-X. Peng, «Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, nº 2, pp. 323-420, feb 2008.
- [3] Arkady, Z. (2006, 25 agosto). Hilos amorfos ultrafínos con recubrimiento vitreo exhibiendo efecto de magnetoimpedancia gigante (GMI) a frecuencias elevadas HILOS AMORFOS ULTRAFÍNOS CON RECUBRIMIENTO VITREO EXHIBIENDO EFECTO DE MAGNETOIMPEDANCIA GIGANTE (GMI) A FRECUENCIAS ELEVADAS. <https://Patents.Google.Com/Patent/WO2008023079A1>.
- [4] García-Miquel, H., & Vázquez, M. (2001). Ferromagnetic resonance in Co-rich glass-coated amorphous microwires. *Physica B: Condensed Matter*, 299(3-4), 225-229. [https://doi.org/10.1016/s0921-4526\(01\)00469-0](https://doi.org/10.1016/s0921-4526(01)00469-0)
- [5] Zapata, F. (2021, 12 abril). Paramagnetismo. Lifeder. <https://www.lifeder.com/paramagnetismo/>
- [6] García-Miquel. “Caracterización de las propiedades magnéticas de vidrios metálicos en forma de microhilos, de composición (FexCo100-x)72.5Si12.5B15.” Tesis doctoral, 1999.
- [7] Universidad de Navarra. (s. f.). Microhilos magnéticos. Ceit. Recuperado 14 de junio de 2021, de <https://www.ceit.es/areas-investigacion/agua-salud/biodispositivosmems/microhilos/Magnéticos>.
- [8] “Iron powder, -20 mesh, 99%” Datasheet (2021)
- [9] “Carbonyl-iron-powder, 5-8um” Datasheet
- [10] Wang, J., Li, G., Li, T., Zeng, M., & Sundén, B. (2020). Effect of various surfactants on stability and thermophysical properties of nanofluids. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143(6), 4057-4070. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09381-9>.
- [11] García Miquel, Ángel Héctor; Kurlyandskaya, G.V. ; Levit, V.I. (2006) Magnetic properties of electroplated wires coated by ferrofluid. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1 (3), 55 - 58. 10.1016/j.jmmm.2005.10.147
- [12] M. (2021, 13 abril). Las nanopartículas favorecerán los biosensores del futuro. *Revista NUVE*. <https://www.revistanuve.com/las-nanoparticulas-favorecera-los-biosensores-del-futuro/>
- [13] Texas Instruments, “LM7171 Datasheet” (2014)
- [14] Infineon, “BAS70 Datasheet” (2014)
- [15] Vishay, “1N4148 Datasheet” (2017)
- [16] Analog Devices, “OP-07 Datasheet” (2011)
- [17] Analog Devices, “OP27 Datasheet” (2015)
- [18] Tomé, C. (2014, 24 mayo). «Nanobiosensores: Aplicaciones en la frontera entre las nanociencias y la biomedicina» por Luis Liz-Marzán. *Cuaderno de Cultura Científica*. <https://culturacientifica.com/2014/05/24/nanobiosensores-aplicaciones-en-la-frontera-entre-las-nanociencias-y-la-biomedicina/>
- [19] mazo-zuluaga, J. (2011). UNA MIRADA AL ESTUDIO Y LAS APLICACIONES



TECNOLÓGICAS Y BIOMÉDICAS DE LA MAGNETITA. UNA MIRADA AL ESTUDIO Y LAS APLICACIONES TECNOLÓGICAS Y BIOMÉDICAS DE LA MAGNETITA, 16.

[20] Teruel, J. A. L. (2014, 29 enero). LOS MICROHILOS COMO SENSORES PARA LOS MÓVILES. Ciencia y Salud. <https://blogs.laverdad.es/jalozate/2014/01/28/los-microhilos-como-sensores-para-los-moviles/>

[21] I. Nowik; I. Felner; H. Garcia-Miquel. (2007) Mossbauer spectroscopy studies of spin reorientations in amorphous and crystalline $(\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8})_{72,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$. Journal of Magnetism and Magnetic Materials (311)555 - 559.

[22] D. de Cos Elices “Magnetoimpedancia de muestras planas en alta frecuencia” Tesis doctoral UPV/EHU, dic. 2006.

ANEXO A. Inserción del código de calibración en Labview

El proceso de calibración es uno de los pasos más importantes desarrollados en el proyecto. Tras comprobar mediante el sistema de medidas que dicha calibración no estaba programada de forma correcta para el desarrollo del proyecto, fue necesario llevar a cabo varias modificaciones dentro del entorno de trabajo de LabView. A continuación, en la figura 68 se muestra lo modificado dentro del programa.

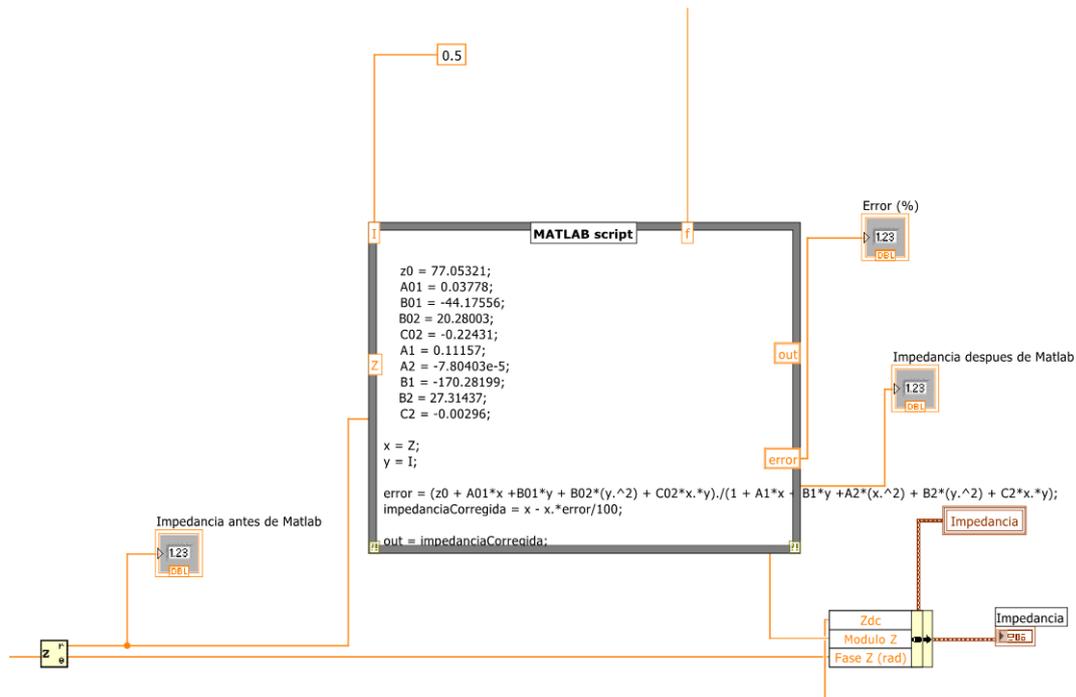


Figura 68. Modificación para la calibración dentro del entorno de LabView.

Como previamente se ha descrito en el Capítulo, se ha llevado a cabo mediante un algoritmo. En la figura 68, se puede observar un script de Matlab. Dichos parámetros junto con la fórmula utilizada es lo que se ha empleado para corregir la calibración.

Para poder modificar dicho script, es decir, inserción de nuevos valores de resistencias a estudiar, nuevos valores de corriente o frecuencia de estudio, se tendría que reorganizar la función de interpolación de Matlab añadiéndole nuevos planos (si se quiere variar frecuencia) o adición de parámetros dentro de la función de interpolación (si se quieren variar impedancia y corriente).

ANEXO B. Manual del software de medida. Programa LabView.

Mediante un programa de LabView es posible realizar el estudio de la magnetoimpedancia gigante (GMI) de las muestras. Es decir, haciendo uso de LabView se obtienen de forma automática las medidas necesarias de las muestras, pudiendo así analizar el efecto GMI. A continuación, se explica de forma detallada cada una de las pantallas que engloba el software de medida.

a) Elegir directorio.

En esta pantalla se elige en que directorio se crearán y guardarán los archivos de configuración del programa. Si existiese una configuración previa ya establecida, podría reutilizarse.



Figura 69. Elección del directorio

b) Conectar equipos.

Por un lado, en esta pestaña se encontrará una lista con los posibles instrumentos de medida a utilizar. Se indicará la dirección de cada uno de ellos y se activarán aquellos equipos que se quieran conectar. Por otro lado, se elige el tipo de medida a emplear. Entre los que destacan, medida en AC, medida en DC y medida en AC+DC. Y para finalizar, una vez establecido todo lo anterior, se procede a la conexión de equipos. Donde se notificará si la conexión ha sido correcta o, en caso contrario, si ha habido algún error y el porqué.



Figura 70. Conexión de los equipos

c) Elección de diferentes parámetros.

A continuación, se especificarán los valores para los parámetros que constituyen las bobinas Helmholtz. En cuyo caso son, el valor del bobinado y la resistencia. Sin embargo, también es posible variar el valor de medida de la corriente, pudiendo optar entre un valor fijo, un vector o un rango.

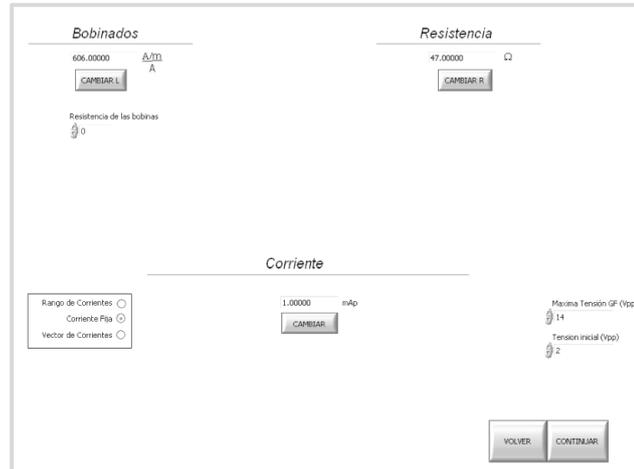


Figura 71. Panel frontal para medidas en alterna, AC.

d) Valores de campo y frecuencia.

En la siguiente pantalla se puede especificar los parámetros de campo y frecuencia. El campo está programado por tramos, y se puede optar a diferentes representaciones gráficas y a la elección de con o sin histéresis. Y la frecuencia a la que se pretende realizar las medidas puede ser, un valor fijo, un vector o un rango. Además, se muestran un conjunto de opciones que hacen referencia al osciloscopio (cuadro derecho de la ilustración)

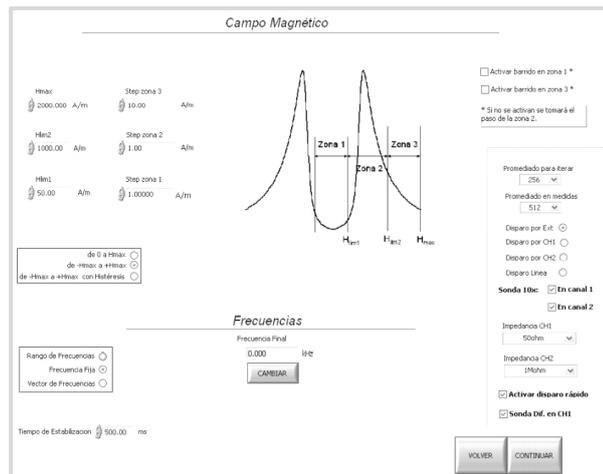


Figura 72. Barrido en campo y elección de la frecuencia de medida

e) Tomar medidas.

Para finalizar, en la última pantalla se elegirán el nombre del fichero de las medidas, el nombre del fichero de los errores y la carpeta donde se guardaron ambos ficheros anteriores. En dicha pantalla además se puede observar, el valor de la impedancia sin calibrar, calibrada, el valor del campo, y la frecuencia y la corriente a la que están midiendo.

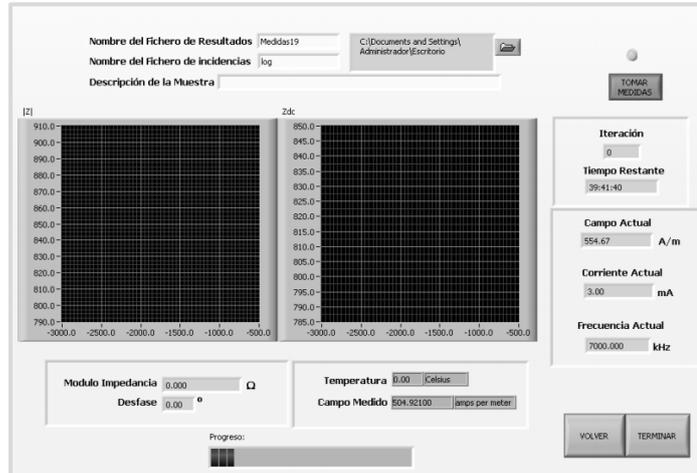


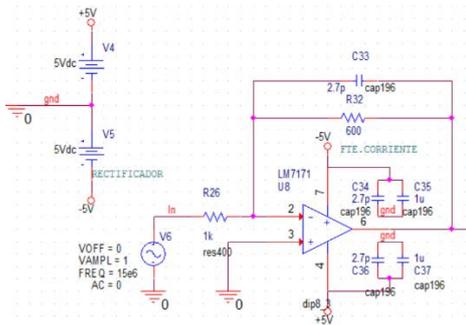
Figura 73. Panel para la obtención de medidas

ANEXO C. Diseño del circuito acondicionador en OrCAD

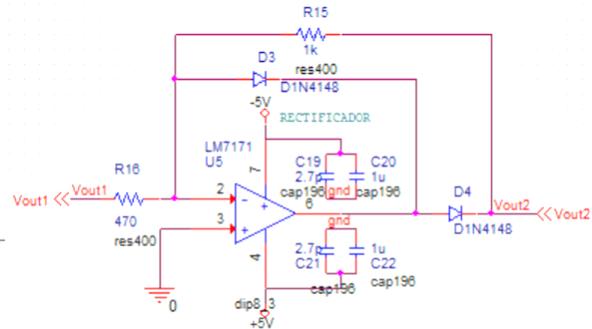
En primer lugar, se muestra el diseño etapa por etapa implementado en OrCAD Capture CIS, para poder ir simulando cada una de las implementaciones y comprobar que la representación obtenida es adecuada y corresponde con lo obtenido mediante el osciloscopio.

El diseño completo se ha realizado mediante el uso de jerarquías, debido al tamaño del sensor/acondicionador y a la fácil separación entre la parte continua y alterna a la hora de implementarlo en la placa de circuito impreso.

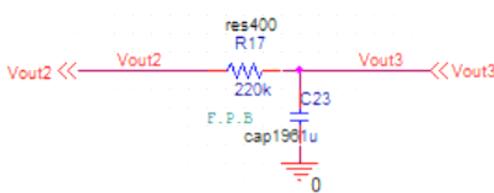
(b) Fuente de corriente



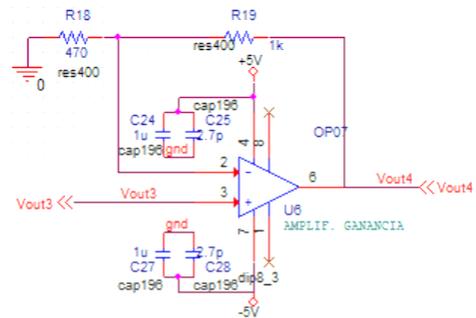
(b) Rectificador de media onda



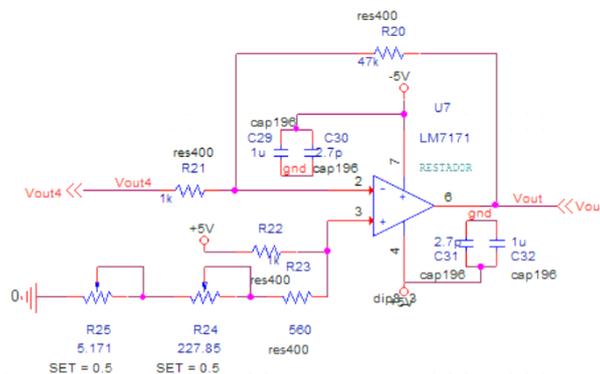
(c) Filtro paso bajo



(d) Amplificador de ganancia



(e) Restador



Para finalizar, se muestra el sensor completo implementado en OrCAD.

