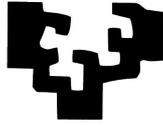


eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

TRABAJO FIN DE GRADO INGENIERÍA ELECTRÓNICA

# BRÚJULA ELECTRÓNICA BASADA EN MAGNETOIMPEDANCIA

MEMORIA PRESENTADA POR  
HÉCTOR MARTÍN AGUILAR

DIRIGIDO POR: ALFREDO GARCÍA-ARRIBAS  
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA, UPV/EHU

Leioa, junio de 2013

## Resumen

El desarrollo de un sensor de detección de campo magnético requiere de una correcta preparación y caracterización del material que se va a utilizar como elemento sensible, así como de un correcto diseño del circuito electrónico encargado de acondicionar y medir las variables adecuadas.

Un área muy prometedora de los sensores magnéticos la constituyen los sensores basados en el efecto de la magnetoimpedancia gigante (*Giant Magneto-Impedance*, GMI). En este trabajo se hace uso de la dependencia que la GMI presenta con el campo magnético a detectar como principio de medida para la brújula electrónica.

Para poder producir variaciones controladas del campo magnético se ha construido una estación de simulación de campo magnético terrestre que utiliza un conjunto de tres carretes de Helmholtz. Su funcionamiento se controla a través de Instrumentos Virtuales programados con LabVIEW que conectan toda la instrumentación utilizada en la investigación.

Los experimentos se llevan a cabo midiendo la variación de la impedancia para rotaciones del campo magnético en planos definidos tanto por la latitud como por la longitud. Estas medidas se realizan de dos modos diferentes: primero con un analizador de redes, de manera directa, y después con un circuito electrónico diseñado con propósito específico.

## Abstract

The development of a magnetic field sensor requires the suitable preparation and characterization of the material which is going to constitute the sensitive element, as well as the proper design of an electronic circuit for the measurement of the appropriate variables.

A very promising area in the field of magnetic sensors is based on the effect of giant-magnetoimpedance (GMI). In this work we use the dependence of GMI on the external magnetic field as the detection principle of measurement for the electronic compass.

In order to be able to produce controlled variations of the Earth magnetic field, a simulation facility has been developed, composed of three Helmholtz coils. It is managed through Virtual Instruments programmed with LabVIEW which connect all the instrumentation used in the investigation.

The experiments have been carried out by measuring the variation of the impedance for rotations of the magnetic field in planes defined by the latitude as well as the longitude. These measurements are made in two different ways: first directly using a network analyzer, and then with a specifically designed electronic circuit.

---

---

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Conceptos generales . . . . .	6
1.2. Objetivos y estructura del trabajo . . . . .	9
<b>2. Descripción del elemento sensible</b>	<b>11</b>
2.1. Preparación de las películas delgadas . . . . .	11
2.2. Caracterización magnética de la muestra . . . . .	13
2.3. Caracterización de la respuesta de magnetoimpedancia . . . . .	14
<b>3. Estación de simulación del campo magnético</b>	<b>19</b>
3.1. Descripción del montaje experimental . . . . .	19
3.2. Calibración . . . . .	20
3.3. Generación de campos simulados variables . . . . .	22
<b>4. Validación experimental del principio de medida</b>	<b>25</b>
4.1. Principio de medida del sensor de campo magnético . . . . .	25
4.2. Resultados en función de la longitud . . . . .	26
4.3. Resultados en función de la latitud . . . . .	27
<b>5. Interfaz electrónica de propósito específico</b>	<b>33</b>
5.1. Descripción del circuito electrónico de la brújula . . . . .	33
5.2. Resultados obtenidos con el circuito electrónico diseñado . . . . .	37
<b>6. Conclusiones</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>



---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

La enorme cantidad de sensores presente en la sociedad actual se ha convertido en un hecho incontestable en la gran mayoría de áreas tecnológicas, tanto para sus aplicaciones industriales como domésticas. Mediante la medición de magnitudes físicas y químicas, y su posterior conversión en señales eléctricas, los sensores nos permiten realizar múltiples tareas de un modo eficaz y con la menor intrusión humana posible.

Un aspecto fundamental en estos sensores es la creciente necesidad de fabricarlos cada vez más pequeños, tanto por razones económicas como de espacio, de tal modo que las vías adoptadas para su fabricación e implementación en circuitos electrónicos son de crucial importancia.

Los sensores electrónicos, además de aumentar la exactitud de las medidas realizadas, permiten al usuario operar con ellas. Por ello, se hace imprescindible el acondicionamiento de las señales de entrada, así como establecer un equilibrio entre las características del sensor y del propio montaje electrónico, siendo así posible procesar los datos medidos de un modo adecuado.

Dentro del ámbito de los sensores de campo magnético, es notable la masiva implementación de sensores magnéticos miniaturizados presente en los dispositivos portátiles. Se trata, pues, de una especie de brújulas electrónicas que, junto con acelerómetros y giróscopos, hacen posible la determinación y medición de un movimiento relativo respecto del campo magnético terrestre.

Muchos son los tipos de tecnología utilizados en las brújulas electrónicas integradas, presentando cada uno distintas ventajas e inconvenientes. La detección inductiva convencional que se implementa en los dispositivos fabricados por PNI Sensor Corporation [1], por ejemplo, presenta el problema de que el proceso de fabricación de sus elementos sensibles no es compatible con las tecnologías planares propias de la microelectrónica.

El mismo problema de incompatibilidad presentan los microhilos amorfos desarrollados por Aichi Micro Intelligent Corporation [2], los cuales han sido incorporados en algunos modelos de teléfonos móviles durante los últimos años. A pesar de que son conocidos como sensores de magnetoimpedancia (MI), su principio de operación consiste en el voltaje que se induce en el devanado que rodea los hilos.

El efecto de magnetorresistencia anisotrópica (AMR), utilizado ampliamente en sensores de campos magnéticos de pequeña magnitud, presenta sus elementos sensibles conectados en una configuración de puente de Wheatstone, de tal modo que la salida sensible se ve mejorada notablemente [3]. A pesar de ello, es necesario reajustar periódicamente el campo magnético aplicado para así poder trabajar en un punto de operación controlado.

La última tecnología aparecida en el mercado está basada en el efecto Hall planar, siendo el fundamento básico de la brújula electrónica AKM AK8975/3 [4], presente en los iPhone de última generación. A pesar de que la respuesta de los sensores Hall no presenta la resolución suficiente para detectar cambios en el campo magnético terrestre, los dispositivos de AKM Semiconductor implementan un pequeño disco de alta permeabilidad encima del sensor a modo de amplificador de campo. A pesar de que su naturaleza semiconductor permite integrar en un mismo sustrato de silicio el sensor y el circuito electrónico, la fabricación se complica para acomodar el disco amplificador en el empaquetado del chip.

El tipo de sensor del que se ocupa el presente trabajo es el basado en la implementación del efecto de magnetoimpedancia gigante (GMI) en películas delgadas de Permalloy ( $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ ). Estos sensores presentan una muy buena sensibilidad ante campos magnéticos pequeños, y su fabricación es perfectamente compatible con los procesos planares de la microelectrónica. Además, aportan valores de la impedancia lo suficientemente altos (decenas de ohmios) como para que una simple medición de esta impedancia sea suficiente.

Debido a todo esto, las posibles aplicaciones en el campo de los sensores basados en magnetoimpedancia son numerosas [5], a pesar de ser ésta una línea de investigación que se encuentra todavía en activo desarrollo. Este trabajo es un intento de demostrar las ventajas antes comentadas para la detección del campo magnético terrestre mediante una brújula basada en GMI, para lo cual se ha procedido a la implementación directa del elemento sensible en un circuito electrónico diseñado para tal efecto.

## 1.1. Conceptos generales

A continuación se dedican unas líneas a describir algunos conceptos generales básicos que son importantes en el desarrollo del presente trabajo.

- Campo magnético terrestre

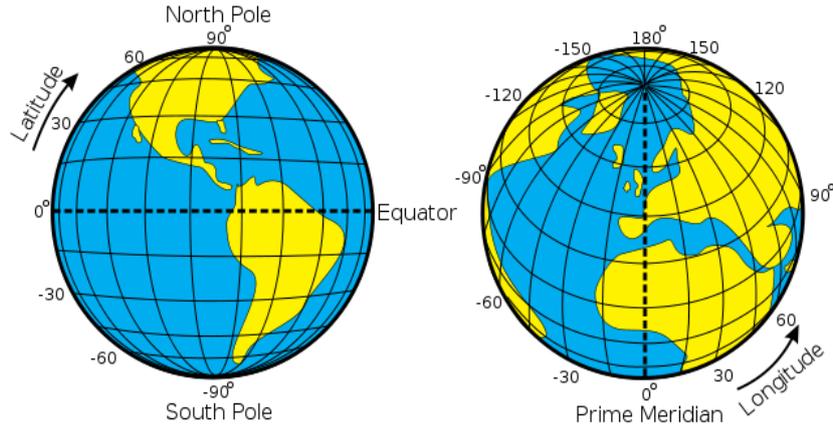
El cometido de una brújula es indicar al usuario la dirección que posee el campo magnético terrestre en la zona geográfica en la que este se encuentre. Es por ello interesante fijar en este punto algunas de las características más relevantes de dicho campo geomagnético, ya que en lo posterior se hará mención a ellas.

Su origen hay que buscarlo en las corrientes eléctricas que se producen en el núcleo externo de la Tierra, ya que éste está formado por hierro fundido altamente conductor. Así, dada su fuerte intensidad (50 veces mayor en el núcleo que en la superficie), el campo magnético se extiende hasta el límite donde se encuentra con los vientos solares.

Una aproximación bastante acertada es asimilar el campo magnético en la superficie de la Tierra al que generaría un dipolo magnético que estuviera situado en el centro del planeta, con una ligera inclinación de  $10^\circ$  con respecto al eje de rotación de éste. Este imán imaginario tendría su polo sur apuntando hacia el polo norte geomagnético de la Tierra.

La representación del campo geomagnético se realiza a través de un vector tridimensional, el cual es fácilmente asimilable en el sistema de coordenadas esféricas (Figura 1.1). La latitud es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera y el Ecuador (medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto), mientras que la longitud es la distancia que existe entre

---

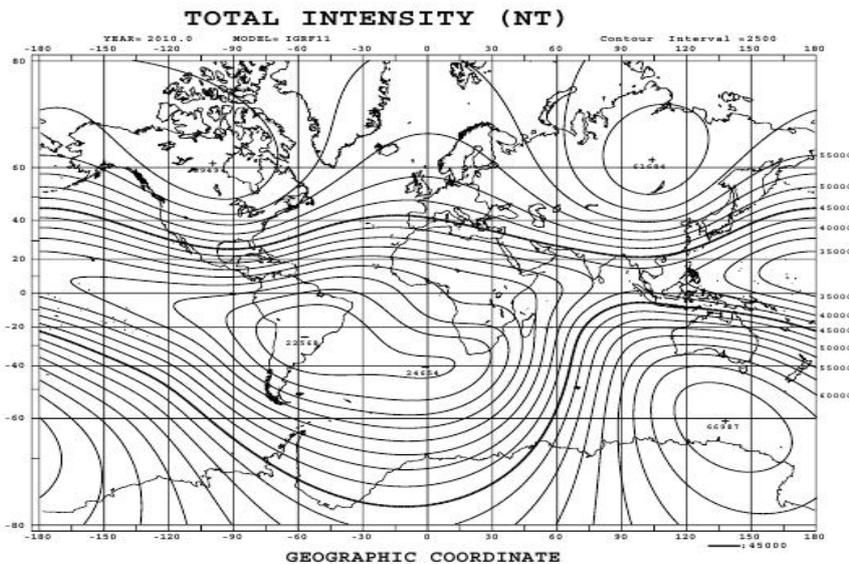


**Figura 1.1:** Representación de las coordenadas geográficas: la longitud y la latitud.

un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich (medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto). La coordenada vertical correspondería a la distancia respecto del centro de la Tierra.

En el caso de las brújulas es muy usual tratar con la denominada declinación, ya que es el ángulo respecto al norte geográfico, y es la información más útil en lo que a la orientación se refiere. La declinación es positiva para una desviación del campo hacia el este relativa al norte geográfico.

La magnitud del campo geomagnético en la superficie de la Tierra oscila entre 25 y 65  $\mu\text{T}$  (0.25 - 0.65 G), ya que su intensidad e inclinación varían de una zona geográfica a otra. Es por ello que se suele realizar un balanceado de las brújulas durante su fabricación, dependiendo de la zona específica donde se vaya a utilizar. Hay delimitadas hasta 5 zonas, siendo la Zona 1 la correspondiente a todo el Hemisferio Norte.



**Figura 1.2:** Gráfica del año 2010 de la intensidad del campo magnético terrestre según la *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF-11) [6].

A efectos de manejar unos valores concretos desde el principio, centrémonos en el campo magnético terrestre existente en los alrededores de Leioa, ya que es aquí donde se han realizado todas las medidas del presente trabajo.

Leioa se encuentra a una latitud de  $43^{\circ} 19'$  y una longitud de  $2^{\circ} 59'$ , aproximadamente. Siento su altitud sobre el nivel del mar de 30 metros, la intensidad del campo magnético aportada por la *International Geomagnetic Reference Field* (Figura 1.2) es de  $45.86 \mu\text{T}$  para el año 2013, con una variación anual aproximada de  $17.3 \text{ nT}$ . La declinación es de  $-1.511^{\circ}$ .

A pesar de ello, este dato sólo será contrastable con la calibración del campo geomagnético realizada al principio de la investigación, ya que los resultados subsiguientes harán referencia a un campo magnético producido con la estación de simulación.

- Magnetoimpedancia

El efecto de la magnetoimpedancia gigante (GMI), descubierto en los años 30, ha tenido un gran auge en la última década.

El efecto de GMI se observa en materiales ferromagnéticos blandos y, a diferencia de la magnetorresistencia, que hace referencia a la variación de la resistencia eléctrica de un material cuando éste es sometido a un campo magnético externo, consiste en la variación de la impedancia compleja  $Z = R + i\omega L$  que ocurre cuando a través del elemento sensible se hace pasar una corriente eléctrica alterna en presencia de un campo magnético externo.

El origen de este fenómeno está en las variaciones de la profundidad de penetración del campo electromagnético en función de la permeabilidad del material a tratar, fenómeno conocido como efecto pelicular.

La profundidad de penetración  $\delta$  está dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi\sigma f\mu}} \quad (1.1)$$

donde  $\sigma$  es la conductividad del material,  $f$  la frecuencia de la corriente alterna que se hace pasar a través de la muestra y  $\mu$  su permeabilidad.

Se observa en la ecuación anterior que al aumentar la conductividad  $\sigma$  del material, la permeabilidad  $\mu$  o la frecuencia  $f$ ,  $\delta$  disminuye y, por tanto, la corriente se concentra en la superficie de la muestra. Como la impedancia  $Z$  de la muestra es inversamente proporcional al área de la zona del material a través del cual circula corriente, cuando  $\delta$  disminuye,  $Z$  aumenta. La GMI hace referencia a las variaciones de la permeabilidad transversal  $\mu_t$ , las cuales son gobernadas por el campo magnético externo  $H$ .

El máximo de la impedancia se obtiene cuando la permeabilidad transversal es máxima. Si la anisotropía magnética en las películas es transversal, la curva de magnetoimpedancia presenta dos máximos, cada uno de ellos situado en  $\pm H^k$ , el campo de anisotropía magnética.

## 1.2. Objetivos y estructura del trabajo

El objetivo principal de este trabajo ha sido el del diseño, puesta en marcha y validación de un modelo de brújula electrónica basado en el efecto de la magnetoimpedancia gigante. Para ello se ha utilizado como elemento sensible una película delgada basada en Permalloy, cuya preparación y caracterización constituyó el grueso del Trabajo Fin de Grado de Física realizado y defendido el curso anterior.

El presente trabajo se ha centrado en el método de aplicación directa del fenómeno físico anteriormente descrito, de tal modo que en esta memoria se recogen los diferentes pasos a seguir en la confección del sensor de campo magnético. Estos comprenden desde el control de la instrumentación utilizada mediante el sistema de diseño LabVIEW, hasta la presentación de los resultados obtenidos con el prototipo de brújula utilizada.

Esta introducción trata de contextualizar el área de trabajo en el cual se engloba el estudio realizado, tratando someramente algunos de los conceptos cuya correcta comprensión es imprescindible para lo que sigue.

El capítulo 2 hace especial énfasis en aquellos aspectos físicos del elemento sensible que resultan determinantes en el funcionamiento del posterior sensor. Se describe el método de preparación de las películas delgadas, su composición, ciclo de histéresis y medidas de magnetoimpedancia.

En el capítulo 3 se describe la estación de simulación de campo magnético utilizada, así como su manejo mediante el software LabVIEW. Para ello es necesario detallar el tipo de calibración realizada, el sistema de control del campo magnético a simular y el método de recogida de datos.

Los capítulos 4 y 5 recogen y analizan los resultados obtenidos con el sensor preparado. Para ello, en el capítulo 4 se corrobora la utilidad del principio de medida propuesto con instrumentación de propósito general (básicamente un analizador de redes). El capítulo 5 describe el circuito electrónico específicamente diseñado para la brújula electrónica, discutiendo su respuesta y comparándola con la obtenida mediante el analizador de redes.

Las principales conclusiones de la investigación se presentan en el capítulo 6, evaluando los resultados desde el punto de vista de la validación del prototipo de brújula diseñado, así como del uso de las películas delgadas de permalloy preparadas anteriormente.



---

## CAPÍTULO 2

---

# Descripción del elemento sensible

En este capítulo se realiza un breve resumen de los aspectos más relevantes de la preparación y caracterización magnética de las muestras estudiadas en el Trabajo Fin de Grado de Física del curso pasado. La justificación de esto radica en el hecho de que muchos de los resultados allí obtenidos resultan cruciales para entender el funcionamiento básico de la brújula electrónica sometida a análisis en el presente trabajo. Además, la muestra utilizada aquí como elemento sensible es diferente a aquella cuyos resultados se mostraron en la memoria anterior. De todos modos, para una mayor profundización en los aspectos más experimentales de lo que se describe a continuación, se remite a dicha memoria.

Como elemento sensible para la brújula se ha utilizado una película delgada de Permalloy preparada mediante los procesos de fotolitografía y *sputtering*. El Permalloy es una aleación magnética de hierro y níquel ( $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ ). Tratándose de un material magnético blando, presenta una permeabilidad magnética alta (que puede llegar a ser 100.000 veces la del vacío), baja anisotropía magnetocristalina, prácticamente nula magnetostricción, y un bajo campo coercitivo ( $\approx 30$  A/m). Estas propiedades lo hacen ideal para su aplicación en sensores para la detección de campos magnéticos de baja intensidad.

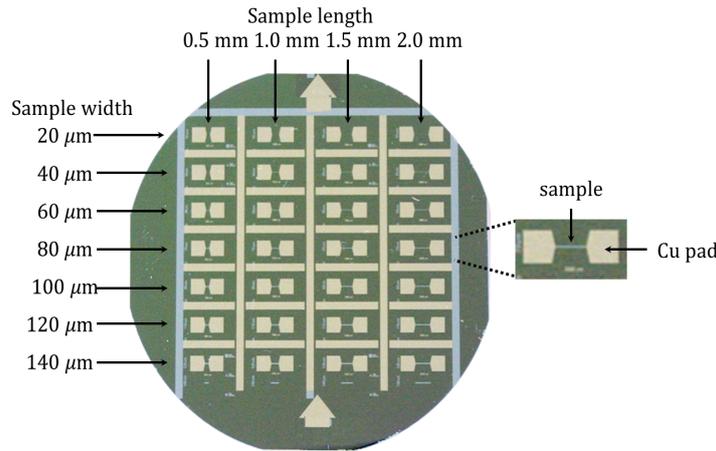
### 2.1. Preparación de las películas delgadas

Las películas delgadas de Permalloy se prepararon mediante procesos sucesivos de fotolitografía y pulverización catódica o *sputtering*. Este método, junto con la posterior eliminación selectiva de la resina, es denominado método de lift-off<sup>1</sup>.

La fotolitografía permite transferir un diseño definido por una máscara al sustrato de silicio, en este caso una oblea de silicio puro sin dopar de  $281 \pm 25$   $\mu\text{m}$  de espesor. Esto se consigue mediante la aplicación de radiación ultravioleta a través de la fotomáscara sobre una resina fotosensible. Para las películas delgadas de Permalloy se aplicó una dosis de  $400 \pm 30$   $\text{mJ} \times \text{cm}^{-2}$  con una intensidad de luz UV de  $16.57 \pm 0.01$   $\text{mW} \times \text{cm}^{-2}$  durante 24 s. El patrón utilizado fue tal que permitió obtener una serie de muestras de distintas anchuras y longitudes (Figura 2.1), de tal modo que así se pudo estudiar la dependencia de la geometría con la respuesta de magnetoimpedancia de cada muestra.

---

<sup>1</sup>La fotolitografía para las películas delgadas de Permalloy se realizó bajo la supervisión de Eduardo Fernández en el laboratorio de Fotolitografía de la Facultad de Ciencia y Tecnología.



**Figura 2.1:** Resultado final con las dimensiones de las películas delgadas y sus contactos depositados en la oblea.

Se introdujo la oblea en un revelador específico para la resina utilizada durante 120 s, de tal modo que las zonas de la resina previamente cubiertas por la máscara se disolvieron y dejaron los huecos donde depositar los materiales.

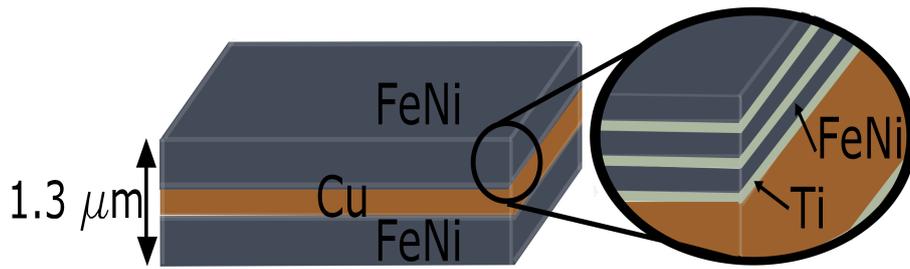
Al tratarse el lift-off de un proceso aditivo, el material a mantener se deposita directamente sobre la oblea. Dicha deposición se llevó a cabo a través del método de sputtering magnetrón, el cual consiste en el bombardeo intenso de un material con los iones producidos en una descarga eléctrica en forma de plasma de Argón. La existencia de unos magnetrones planos permite la concentración de los electrones en los alrededores del blanco, acelerando así el proceso de deposición. Para la formación de las películas multicapa de Permalloy se realizó un vacío previo en el interior de la máquina de sputtering de  $4.0 \times 10^{-7}$  mbar, el cual, disminuyó hasta  $3.4 \times 10^{-3}$  mbar al introducir el Ar. La potencia de la fuente DC utilizada fue de 100 W en todos los casos, con una tensión y corriente de descarga de 388 V y 0.2 A, respectivamente<sup>2</sup>.

Uno de los aspectos más importantes del sputtering llevado a cabo es el hecho de que el sustrato de Si fue colocado dentro de la máquina de sputtering de tal modo que la dirección longitudinal de los patrones definidos en la fotolitografía fuera perpendicular a las líneas de campo, de aproximadamente 250 Oe, aplicadas durante la deposición de los materiales, de forma que se indujese una anisotropía transversal en las películas delgadas de Permalloy.

La estructura final de las muestras es  $[\text{FeNi}/\text{Ti}]_3/\text{Cu}/[\text{Ti}/\text{FeNi}]_3$ , elegida de este modo para maximizar su respuesta GMI (Figura 2.2) [7].

Las capas magnéticas de FeNi deben tener un espesor apreciable (alrededor de 1  $\mu\text{m}$ ) para que sean del orden de la profundidad de penetración a las frecuencias de operación (del orden de las decenas o centenas de MHz). Para evitar el crecimiento columnar que genera el proceso de sputtering, se intercalan, cada 170 nm, capas finas de 6 nm de Ti. De este modo pueden conseguirse espesores totales del orden de 1  $\mu\text{m}$  de FeNi con buena permeabilidad transversal.

<sup>2</sup>La deposición catódica fue realizada por el Dr. Andrey Svalov con un equipo de sputtering Pfeiffer Vacuum Classic 500.



**Figura 2.2:** Esquema de la composición de las películas multicapa depositadas.

Además, en aras de que la corriente no circule mayormente por la capa magnética, las muestras incorporan una capa central 250 nm de Cu, con una conductividad mayor que la de las capas magnéticas.

En un segundo proceso de sputtering se depositó el Au y Cu correspondiente a los contactos eléctricos: una capa inferior de Cu de 500 nm y una capa superior de Au de 10 nm para evitar la oxidación del Cu.

La muestra escogida para su implementación como elemento sensible en la brújula electrónica es la de 1.5 mm de longitud y 120  $\mu\text{m}$  de anchura (que a partir de ahora la denominaremos por 1.5mm\_120 $\mu\text{m}$ ), debido a sus buenas prestaciones en lo que a su respuesta de magnetoimpedancia se refiere. Como se ha dicho anteriormente, la muestra escogida para este trabajo es diferente de aquella sometida a estudio en el anterior Trabajo Fin de Grado de Física, por lo que la información que se muestra a continuación no resultará del todo redundante.

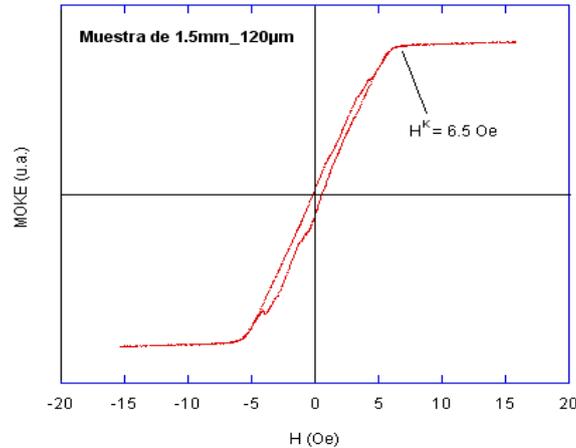
## 2.2. Caracterización magnética de la muestra

Debido a que las características de la magnetoimpedancia de la muestra están intrínsecamente relacionadas con sus propiedades magnéticas, resulta interesante el estudio de la dependencia de sus ciclos de histéresis con su geometría. Aquí nos limitaremos a mostrar los ciclos obtenidos en la dirección difícil de imanación del elemento sensible del futuro sensor.

Para obtener los ciclos de histéresis de las películas delgadas de Permalloy se llevó a cabo una caracterización magnética de cada una de ellas por efecto Kerr longitudinal, que hace uso de la relación entre el ángulo de giro del plano de polarización del haz de luz y la imanación de la muestra. Midiendo esta rotación (o, equivalentemente, la aparición de una pequeña elipticidad) después de que el haz sea reflejado por la superficie de la película delgada, se tiene que la intensidad de la luz detectada es proporcional a la imanación de la superficie [8].

Para obtener este ciclo de histéresis en la dirección difícil de imanación se generó el campo magnético mediante un par de carretes de Helmholtz alimentados con un campo alterno de amplitud 10 Oe y frecuencia 2.5 Hz, aproximadamente<sup>3</sup>. Como se puede observar en los resultados (Figura 2.3), el ciclo obtenido corresponde, en efecto, a un campo magnético aplicado en la dirección longitudinal, constatando así que la anisotropía inducida en el sputtering es de mayor intensidad que la anisotropía de forma debida a la propia geometría de la muestra. En lo que a la anisotropía de forma se refiere, la dirección de fácil imanación corresponde al eje de

<sup>3</sup>Los ciclos de histéresis por efecto Kerr fueron obtenidos bajo la supervisión del Dr. Iñaki Orue.



**Figura 2.3:** Ciclo de histéresis longitudinal de la película de 1.5mm\_120µm obtenido por efecto Kerr.

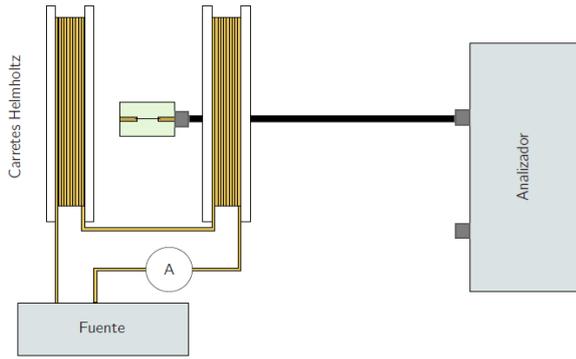
menor longitud de la película delgada.

La información más interesante que se obtiene de este ciclo de histéresis es el valor del campo de anisotropía  $H^k = 6.5 \text{ Oe}$  en el que se alcanza la magnetización de saturación  $M_s$ , es decir, el punto en el cual todos los dipolos magnéticos están alineados con el campo externo. Dicho valor determina la forma de la respuesta en magnetoimpedancia de la película delgada, tal y como se verá más adelante.

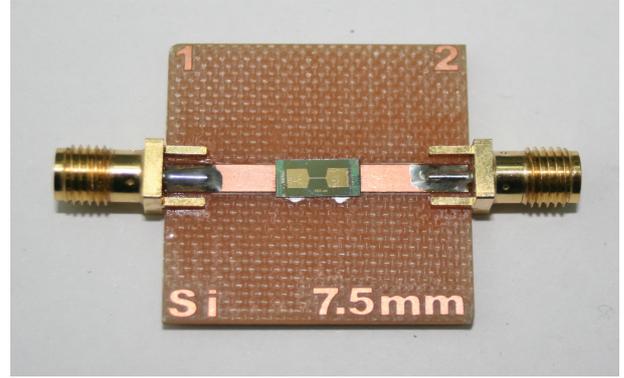
## 2.3. Caracterización de la respuesta de magnetoimpedancia

Como se indicó anteriormente, el origen del fenómeno de la magnetoimpedancia reside en la dependencia de la permeabilidad  $\mu$  con el campo aplicado  $H$ . Para obtener los resultados que se presentarán en lo sucesivo se utilizó un sistema de medida que se esquematiza en la Figura 2.4. Todas las medidas fueron realizadas a temperatura ambiente. El montaje experimental consta de los siguientes componentes:

- un par de carretes Helmholtz alimentados con corriente continua que se emplean para producir un campo magnético continuo que se hace variar entre  $\pm 150 \text{ Oe}$ , y que es aplicado en la dirección longitudinal de la muestra;
- una fuente de alimentación Delta SM 120-25D que genera la corriente continua necesaria para alimentar los carretes Helmholtz
- un amperímetro conectado en serie con la fuente que mide en cada instante la corriente aplicada a los carretes Helmholtz para determinar el campo aplicado a la muestra;
- un analizador de redes Agilent E5071C que proporciona los valores de la impedancia  $Z$  obtenida a partir de la medida de la potencia que se envía y refleja en uno de sus puertos (parámetro de scattering  $S$ ). El analizador se tiene que calibrar en el extremo del cable para eliminar las contribuciones de éste a la impedancia total.



**Figura 2.4:** Esquema del sistema de medida de magnetoimpedancia utilizado (ver texto).



**Figura 2.5:** Fotografía de un portamuestras, con conectores SMA a ambos extremos de las líneas microstrip.

Es el propio analizador de redes el encargado de generar la excitación en forma de corriente alterna con una frecuencia que, en este caso, se ha variado entre 300 KHz y 300 MHz (en pasos de 10 KHz).

El modo de cuantificar la GMI corresponde a la realizada por comparación con la impedancia a campo máximo:

$$GMI(\%) = \frac{|Z| - |Z(H_{max})|}{|Z(H_{max})|} \cdot 100, \quad (2.1)$$

siendo  $|Z|$  el valor absoluto de la impedancia y  $H_{max}$  el máximo campo aplicado.

Otra figura de mérito primordial es la sensibilidad relativa, definida como la variación relativa de impedancia por unidad de campo, ya que se trata de una característica fundamental para la aplicación de la película delgada en la brújula, pues da cuenta de la sensibilidad que ésta posee para detectar las variaciones del campo geomagnético.

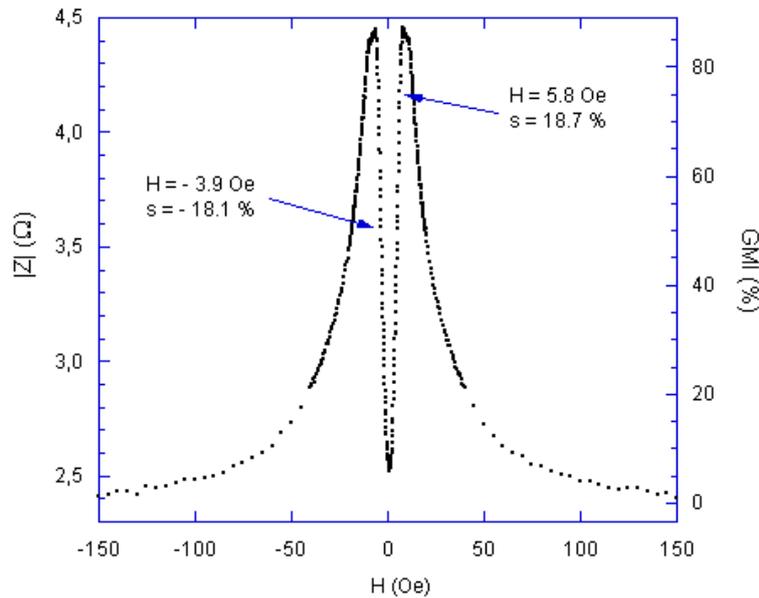
$$sens(\%/[H]) = \frac{\Delta Z/Z(\%)}{\Delta H}. \quad (2.2)$$

En la Figura 2.6 se muestra tanto el módulo de la impedancia de la muestra como el valor de la GMI en función del campo magnético aplicado. El motivo por el cual el comportamiento de  $Z$  con el campo  $H$  aplicado presenta una estructura de doble pico es debido a cambios en la permeabilidad transversal  $\mu_t$  asociada al campo magnético producido por la corriente alterna que fluye a través de la muestra.

En la muestra de  $1.5\text{mm} \times 120\mu\text{m}$  alcanza el valor máximo de  $\mu_t$  a  $7.0$  Oe, valor bastante próximo al campo de anisotropía  $H^k = 6.5$  Oe obtenido del ciclo de histéresis. Se trata de los resultados obtenidos para una frecuencia de 100 MHz, ya que, como se observará en las figuras de mérito siguientes, es el punto en el que mayor sensibilidad relativa se obtiene.

La sensibilidad relativa de la muestra para cada campo aplicado se muestra en la Figura 2.7, la cual se ha obtenido por simple derivación de la Figura 2.6. Sus valores máximos se indican en esta última, donde se observa que se alcanzan para un campo un poco más bajo que  $H^k$ , en concreto se alcanza una sensibilidad de  $18.7\%$  a  $5.8$  Oe y  $-18.1\%$  a  $-3.9$  Oe.

A pesar de que, tal y como se puede comprobar, dichos máximos suceden a campos dife-

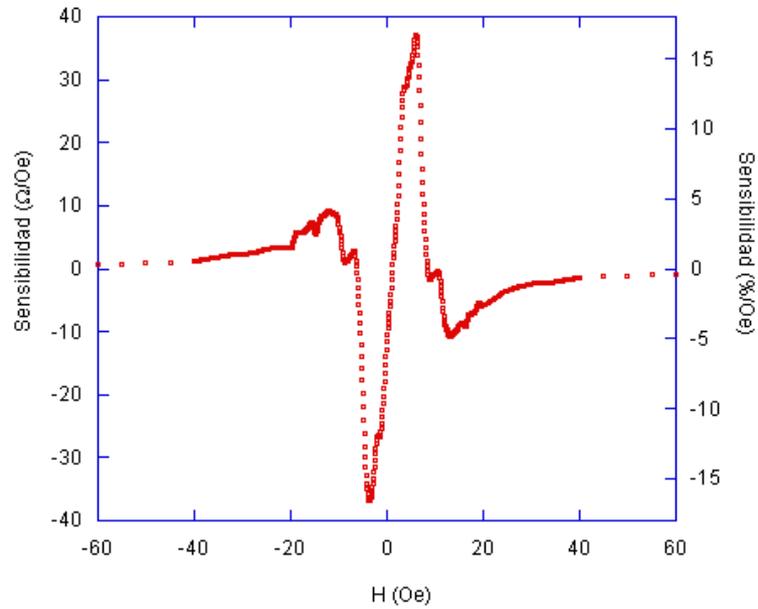


**Figura 2.6:** Módulo de la impedancia de la película de  $1.5\text{mm} \times 120\mu\text{m}$  en función del campo magnético aplicado a una frecuencia de 100 MHz.

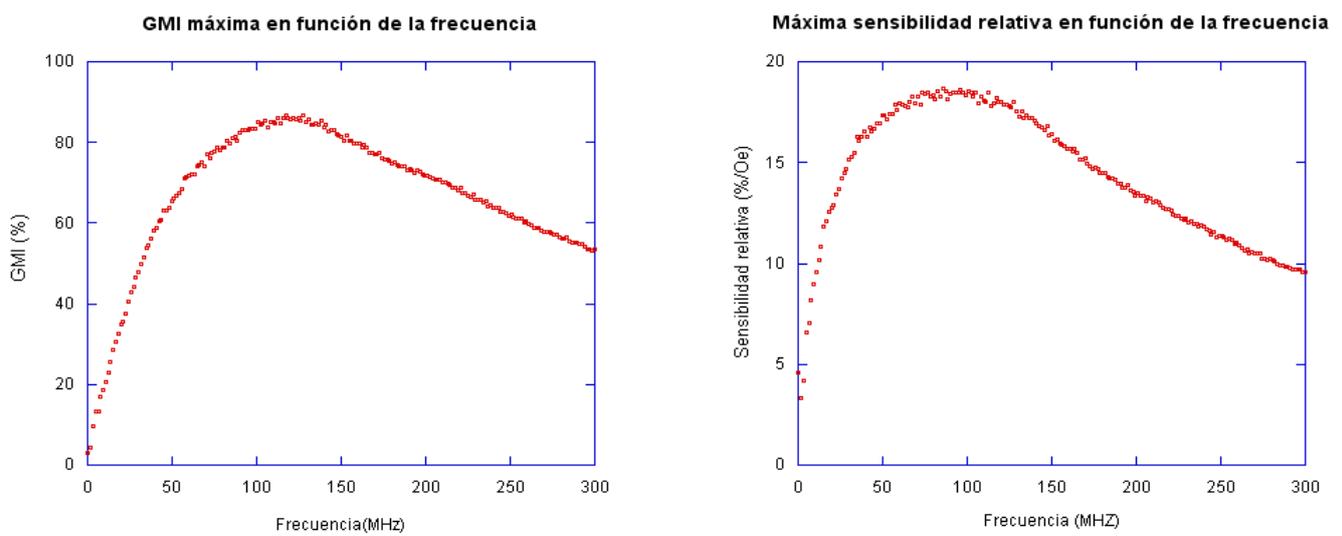
rentes, estas son las especificaciones que se deben establecer como punto de operación óptimo para el sensor de detección magnética cuyo análisis es materia de estudio de este trabajo.

La Figura 2.8 muestra el comportamiento de la GMI y la sensibilidad en todo el rango de frecuencias. A partir de una frecuencia determinada la GMI decae, ya que, mientras que el valor de  $|Z(H_{max})|$  aumenta con la frecuencia,  $\Delta Z$  lo hace en menor medida (2.1). Esto hace que, pasado su valor máximo,  $GMI(\%)$  decaiga a medida que sigue aumentando la frecuencia.

El hecho de que el rango óptimo de trabajo para ambas magnitudes no sea exactamente el mismo, únicamente atañe al tipo de sensor que se quiera implementar. El módulo de la impedancia alcanza su valor máximo de GMI (87%) en 117 MHz. La sensibilidad máxima, por su parte, se produce a 100 MHz ( $\%18/\text{Oe}$ ). Por tanto, un sensor basado en la película delgada de Permalloy de  $1.5\text{mm} \times 120\mu\text{m}$  tendría que tener su rango de trabajo entorno a las frecuencias citadas.



**Figura 2.7:** Sensibilidad de la película de 1.5mm\_120μm en función del campo magnético aplicado a una frecuencia de 100 MHz.



**Figura 2.8:** Prestaciones de la película delgada de 1.5mm\_120μm en función de la frecuencia.



---

## CAPÍTULO 3

---

# Estación de simulación del campo magnético

La función básica de una brújula es la de informar al usuario de la dirección que posee el campo magnético en el lugar de la superficie terrestre donde se encuentre. Sin embargo, siendo imposible llevar esto a cabo en diferentes lugares del planeta, en el presente trabajo se ha optado por simular el campo magnético terrestre con un conjunto de bobinas de Helmholtz, pudiendo así situarlo en la dirección arbitraria deseada en cada caso.

Antes de proceder con el diseño del control del campo magnético simulado, es de vital importancia realizar una calibración de las bobinas, de tal manera que encontremos la relación existente entre cada una de las componentes del campo con los valores de corriente aplicados en cada caso con la fuente de alimentación. Esta calibración, además, nos permite obtener el valor del campo magnético real presente en el laboratorio para así poder anularlo en los experimentos posteriores.

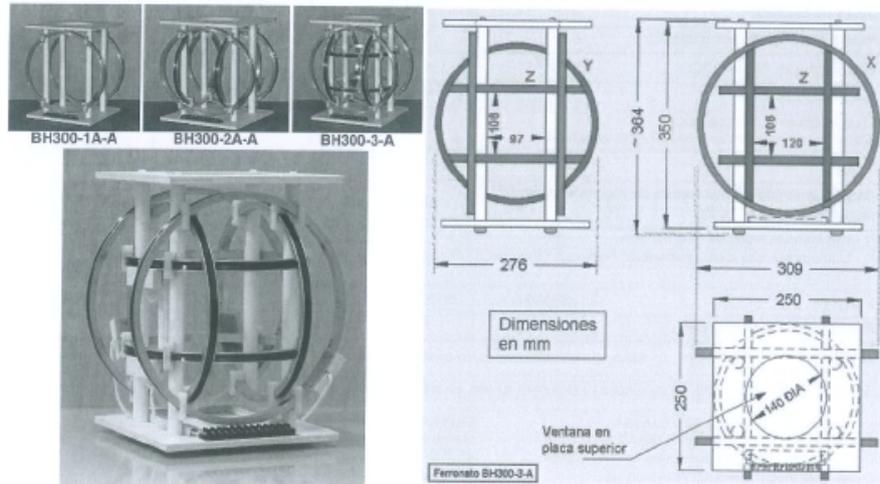
Para llevar todo esto a cabo, se ha hecho uso del software LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) y de las facilidades que ofrece [9]. LabVIEW permite desarrollar una amplia variedad de aplicaciones en mucho menos tiempo del que se requeriría con un lenguaje de programación usual. Esto se debe a que es una plataforma basada en un lenguaje de programación visual gráfico, además del hecho de que LabVIEW es capaz de trabajar con otros tipos de software o hardware, como pueden ser las tarjetas de adquisición de datos u otro tipo de instrumentación usual en la Ingeniería Electrónica.

### 3.1. Descripción del montaje experimental

El conjunto de carretes de Helmholtz utilizado corresponde al modelo *Ferronato BH300-3-A*, y es capaz de producir un campo magnético específico en cada una de las direcciones espaciales a través de tres pares de bobinas de cobre (Figura 3.1).

Las corrientes necesarias para alimentar el triaxis se generan con tres fuentes de alimentación ISO-TECH IPS303A. Estas fuentes de alimentación son monopolares, por lo que es necesario activar unos relés para cambiar la polaridad de las tensiones generadas y de las corrientes en los carretes.

La relación campo/corriente del triaxis es de  $500 \mu\text{T}/\text{A}$ , con un error menor que  $\pm 1 \%$  en el campo generado por cada par de bobinas. En lo que a la homogeneidad del campo generado



**Figura 3.1:** Esquema del conjunto de bobinas de Helmholtz utilizado como simulador del campo magnético [10].

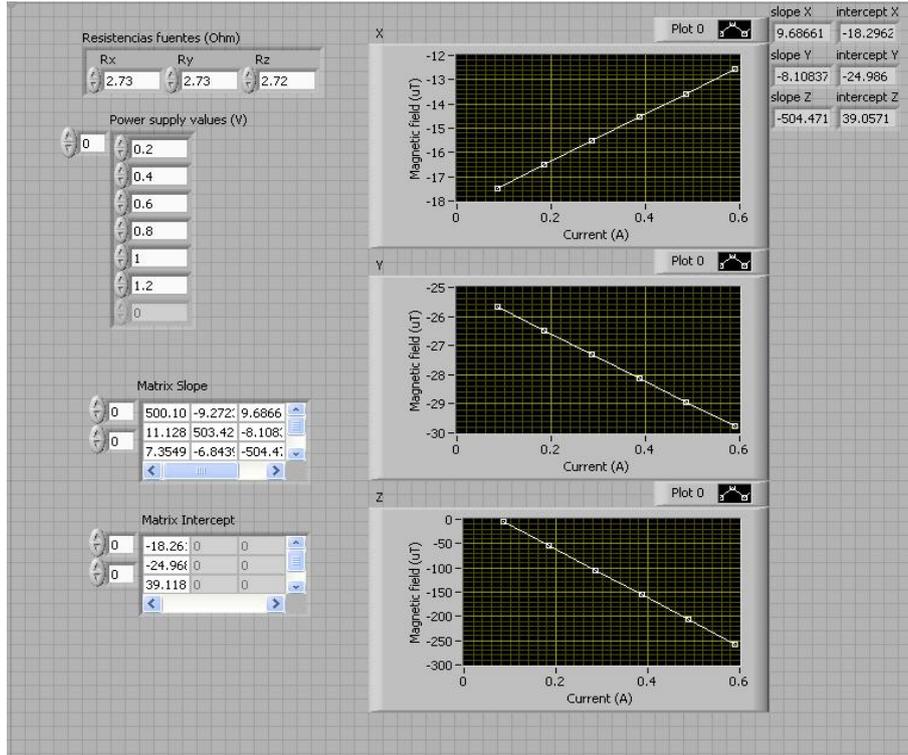
se refiere, cabe comentar que, a pesar de que las diferencias producidas en el volumen esférico respecto a su centro son menores que  $\pm 1\%$ , tanto el sensor *fluxgate* utilizado en la calibración como la película delgada se han procurado colocar lo más centradas posibles en el desarrollo de la presente investigación.

Los valores del campo magnético simulado en el triaxis se han medido con un sensor *fluxgate* *Bartington Mag585*, cuya resolución es de aproximadamente  $5\ \mu\text{Oe}$ . Su principio de funcionamiento utiliza dos núcleos de material ferromagnético que están rodeados a su vez por un bobinado primario y otro secundario. El modo en el que el primario está enrollado en los núcleos hace que, al hacer atravesar una corriente alterna a través suyo, se generen campos magnéticos en los núcleos que poseen la misma magnitud pero direcciones opuestas. Cuando se someten a un campo magnético exterior, uno de los núcleos producirá un campo magnético en la misma dirección que el externo y lo reforzará. El otro inducirá un campo menor en la dirección opuesta. Esta diferencia es suficiente para generar un voltaje en el bobinado secundario cuya magnitud es proporcional a la componente del campo magnético externo en la dirección de los núcleos [11]. Por ello, para obtener todas las componentes cartesianas del campo simulado, el instrumento utilizado es un conjunto de tres *fluxgates* convenientemente orientados.

## 3.2. Calibración

Para realizar la calibración, se ha creado un Instrumento Virtual (*Virtual Instrument, VI*) cuyo interfaz permite obtener los valores sucesivos del campo generado en el triaxis en función de la corriente generada por la fuente de alimentación (Figura 3.2).

Al VI encargado de la calibración se le deben especificar los valores de la tensión de la fuente de alimentación para los cuales quiere realizarse el ajuste. Así, el programa en funcionamiento consta de tres etapas, una por cada corriente generada por las fuentes en los tres pares de bobinas de Helmholtz. En cada una de estas etapas se mide el campo magnético inducido en los tres ejes cartesianos debido al establecimiento de una corriente eléctrica en uno de dichos



**Figura 3.2:** Captura de pantalla del instrumento virtual generado en LabView para la calibración del triaxis.

ejes.

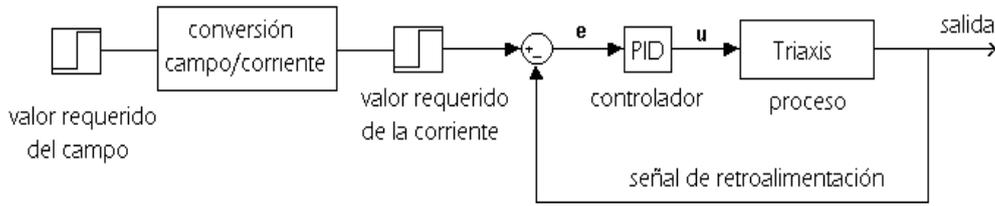
A partir del ajuste lineal correspondiente, se obtiene una calibración independiente para cada dirección, además del valor de las tres componentes del campo magnético terrestre presente en el lugar del experimento.

Es importante destacar que la calibración se ha realizado en función de la intensidad de corriente que alimenta las bobinas, mientras que el control de las fuentes de alimentación se hace en tensión. El circuito de alimentación para cada una de las bobinas incluye una resistencia calibrada de  $2.73 \Omega$ , de manera que la corriente se mide a partir de la caída de tensión en dicha resistencia. De esta manera se evitan los errores producidos por el aumento de la resistencia de las bobinas por su autocalentamiento.

Como resultado de la calibración, el VI trasfiere a un fichero de texto externo los elementos de la matriz de calibración y el valor del campo magnético terrestre (3.1). El campo está medido en  $\mu\text{T}$  y la corriente eléctrica en A.

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h_{x0} \\ h_{y0} \\ h_{z0} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Los valores obtenidos para una de las calibraciones llevadas a cabo en el Departamento de Electricidad y Electrónica de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la UPV donde se ha realizado la investigación han sido los siguientes:



**Figura 3.3:** Esquema general del Instrumento Virtual encargado del control del campo magnético simulado en el triaxis.

$$\begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{yx} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{zx} & a_{zy} & a_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 500.13 & -3.63 & 7.68 \\ 5.43 & 503.55 & -6.05 \\ 5.37 & -4.62 & -496.05 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

El campo magnético terrestre local calculado se presenta a continuación:

$$\mathbf{H}_{loc} = -19.87\mathbf{i} - 25.52\mathbf{j} - 38.34\mathbf{k} \mu T. \quad (3.3)$$

La magnitud del campo local obtenido  $H_{loc} = 50.16 \mu T$  presenta una desviación apreciable ( $\sim 8\%$ ) respecto al valor aportado por la International Geomagnetic Reference Field de  $45.90 \mu T$ , lo cual se debe probablemente a la multitud de elementos magnéticos presentes en el lugar de trabajo en el momento de las medidas.

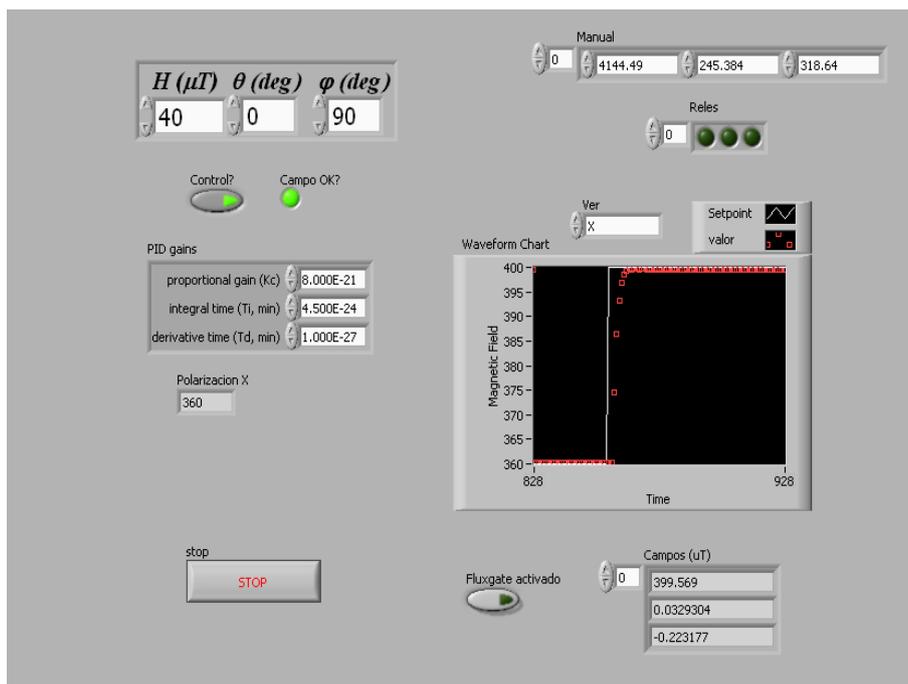
### 3.3. Generación de campos simulados variables

Para poder tener la seguridad de que el campo simulado es el requerido, se ha utilizado un sistema de control para mantener en todo momento la alimentación precisa en los carretes de Helmholtz que produzca el campo deseado, independientemente del calentamiento de los carretes.

El Instrumento Virtual encargado del control del campo magnético simulado consta de dos partes fundamentales (Figura 3.3): la primera fase es la que, realizando las operaciones matemáticas correspondientes con la calibración anterior, calcula las corrientes que deben ser generadas por las fuentes de alimentación de cada eje, de tal modo que el campo magnético producido sea el deseado, anulando simultáneamente el campo terrestre del lugar; la segunda parte la constituye un controlador PID, cuyo objetivo es el de aplicar las acciones correctoras necesarias para ajustar el valor de la salida  $u(t)$  al especificado en la entrada  $e(t)$ :

$$u(t) = K_p \times [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t)]. \quad (3.4)$$

El control PID consta de tres ganancias diferentes: proporcional, integral y derivativa. La función de cada uno de ellas es corregir distintos aspectos de la señal de salida: la parte PD



**Figura 3.4:** Captura de pantalla del instrumento virtual generado en LabView para el control del campo magnético simulado en el triaxis.

compuesta por el coeficiente proporcional ( $K_p$ ) y el derivativo ( $T_d$ ) pretende mejorar la respuesta transitoria, mientras que el término integral ( $T_i$ ) permite anular el error en régimen permanente.

Como consecuencia de que el cambio en uno de los parámetros del PID causa un desajuste en la respuesta debida a los otros dos, resulta necesario alcanzar un compromiso entre los valores escogidos. Esto dependerá de si en el experimento prima la exactitud o la velocidad en las medidas. Para el PID que controla el triaxis se ha intentado alcanzar una situación de mínimo rebose, tal y como se puede observar en el interfaz del VI reflejado en la Figura 3.4.

Los valores de los parámetros establecidos son los siguientes:

$$\begin{aligned} K_p &= 8.0 \times 10^{-21}, \\ T_i &= 4.5 \times 10^{-24} \text{ min}, \\ T_d &= 1.0 \times 10^{-27} \text{ min}. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Cabe destacar que un aspecto importante en el diseño del Instrumento Virtual encargado del control fue la necesidad de controlar la polaridad de la corriente mediante el accionamiento de los relés. La acción del controlador para valores de la salida cercanos a cero producía conmutaciones rápidas de los mismos e inestabilidades en la salida que hubo que eliminar con un aumento considerable de la complejidad de la programación del VI.



---

## CAPÍTULO 4

---

# Validación experimental del principio de medida

El objetivo principal de este capítulo es el de mostrar y discutir la respuesta del elemento sensible de Permalloy ante variaciones de la orientación del campo magnético simulado en el triaxis. Así, es posible validar el principio de medida del sensor con un analizador de redes que mida la impedancia, antes de pasar a realizar las mismas medidas con el diseño del circuito electrónico que se abordará en el capítulo siguiente.

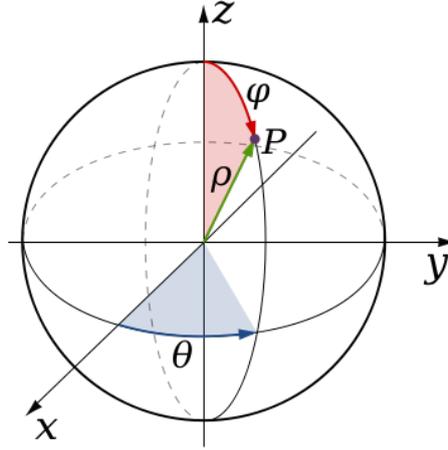
### 4.1. Principio de medida del sensor de campo magnético

La instrumentación electrónica utilizada en el experimento se compone de la estación de simulación de campo magnético, el analizador de redes Agilent E5071C, y los VIs de LabView necesarios para el control de los anteriores. A pesar de que el analizador de redes realiza un barrido para la frecuencia de la corriente alterna que atraviesa la muestra, en lo sucesivo únicamente se mostrarán los resultados obtenidos a 100 MHz, ya que es ésta a la frecuencia en la que se presenta una mayor sensibilidad relativa.

El experimento consiste en realizar medidas de la impedancia que presenta la muestra para variaciones de la orientación del campo magnético generado en la estación de simulación. Este campo magnético, de una intensidad constante durante toda la investigación de  $40 \mu\text{T}$ , se encuentra superpuesto a otro campo que polariza la muestra en su dirección longitudinal para así poder llevar el material a su punto de operación óptimo.

Este campo de polarización de  $360 \mu\text{T}$  es también generado por la estación de simulación. El punto de máxima sensibilidad de la muestra se encuentra a  $580 \mu\text{T}$  ( $\simeq 5.8 \text{ Oe}$ ), pero se ha observado experimentalmente que la respuesta del analizador de redes es más limpia en el campo seleccionado, debido a motivos que todavía están por esclarecer. Por tanto, el campo escogido corresponde a un compromiso alcanzado entre la sensibilidad del sensor y la nitidez de la respuesta.

Para la validación del principio de medida se ha optado por realizar barridos de ángulos asimilables tanto a la longitud como a la latitud en la orientación del campo magnético generado por la estación de simulación. Es por ello que no debe entenderse en ningún caso que se ha simulado la magnitud del campo terrestre existente para diferentes puntos de la latitud y longitud terrestres, ya que esta se mantiene constante durante todas las medidas.



**Figura 4.1:** Esquema de la denominación de las coordenadas esféricas utilizadas para representar los resultados obtenidos.

En un primer apartado se muestran los barridos en función de la longitud que se han realizado para distintos planos referidos a la latitud, y en el segundo los barridos en función de la latitud para los planos referidos a la longitud. En la Figura 4.1 se muestran la coordenada azimutal  $\theta$  (ángulo equivalente a la longitud) y la colatitud  $\varphi$  (ángulo complementario de la latitud) escogidas para representar los resultados.

En los resultados mostrados en ambos apartados se ha realizado un barrido del ángulo correspondiente en cada caso entre  $0^\circ$  y  $720^\circ$  (dos vueltas), con un paso de  $5^\circ$ . Asimismo, los planos se han ido rotando progresivamente entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , con un paso de  $15^\circ$ .

## 4.2. Resultados en función de la longitud

La Figura 4.2 muestra la variación de la impedancia de la película delgada de  $1.5\text{mm}_{120\mu\text{m}}$  cuando un campo magnético “terrestre” de  $40\ \mu\text{T}$  es aplicado en diferentes direcciones dentro del plano XY ( $\varphi = 90^\circ$ ).

La línea continua trazada en el gráfico ajusta los puntos medidos a la función sinusoidal  $Z = Z_0 + Z_m \cos(\theta - \theta_0)$ :

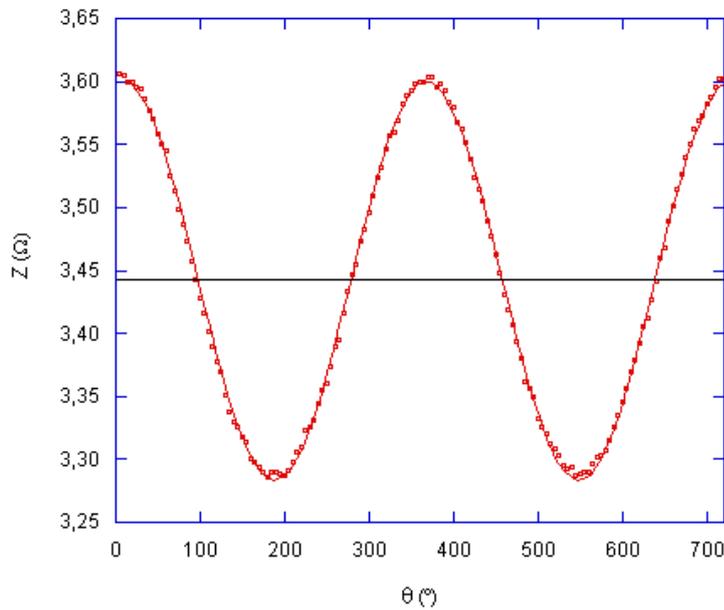
$$Z = 3.442 + 0.158 \times \cos(\theta - 7.93^\circ) \Omega. \quad (4.1)$$

El cambio de impedancia entre direcciones opuestas ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 180^\circ$ ) es de  $0.32\ \Omega$  y la máxima sensibilidad es  $s = 4.3\ \text{m}\Omega/^\circ$ , teniendo ésta lugar cuando el campo magnético es perpendicular ( $\theta \simeq 90^\circ, 270^\circ$ ) al campo de polarización longitudinal a la muestra (en el eje X).

El hecho de que exista un valor de  $\theta_0$  no nulo significa que existe una posible desalineación inicial entre la muestra y el eje de los carretes Helmholtz, ya que la colocación de la muestra se realizó manualmente y de modo aproximado.

Tanto los resultados obtenidos para la variación de la longitud como de la latitud se encuentran recogidos en la Tabla 4.1 al final del capítulo.

En la Figura 4.3 aparecen representadas las variaciones de la impedancia cuando el campo



**Figura 4.2:** Medidas de la impedancia en función del ángulo  $\theta$  para el plano definido por el ángulo  $\varphi = 90^\circ$ .

magnético es simulado en varias direcciones especificadas por el ángulo  $\theta$  de diferentes planos determinados por el valor de la colatitud  $\varphi$ .

Se puede observar que la amplitud de la función cosenoidal disminuye a medida que el ángulo de orientación del campo se aleja del plano de la muestra. Esta amplitud se ajusta perfectamente a una función cosenoidal, tal y como era de esperar (Figura 4.4). Esto implica que, a medida que la componente en el eje X del campo magnético disminuya su magnitud, esta será detectada con mucha menor resolución y sensibilidad.

### 4.3. Resultados en función de la latitud

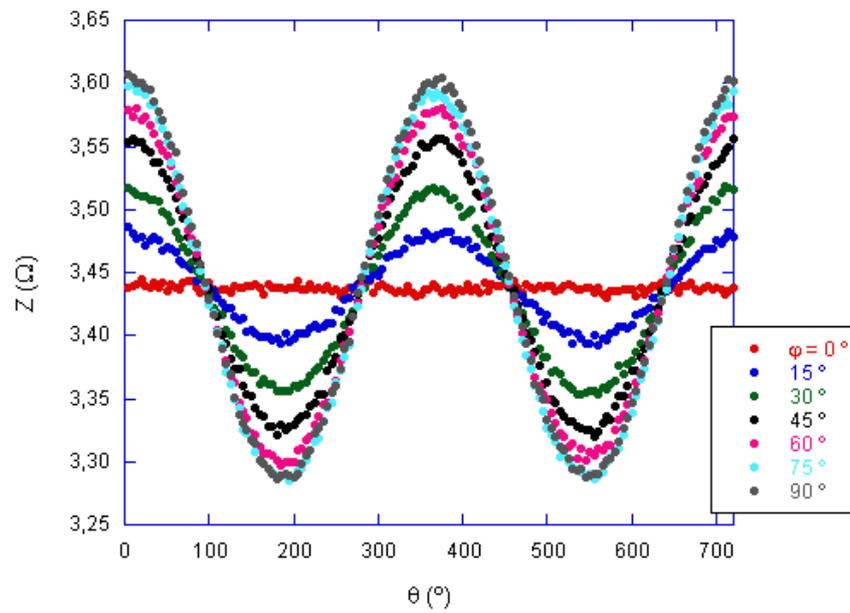
La Figura 4.5 muestra la variación de la impedancia de la película delgada de  $1.5\text{mm}_{-120\mu\text{m}}$  cuando un campo magnético “terrestre” de  $40\ \mu\text{T}$  es aplicado en diferentes direcciones dentro del plano XZ ( $\theta = 0^\circ$ ).

La línea continua trazada en el gráfico ajusta los puntos medidos a la función sinusoidal  $Z = Z_0 + Z_m \sin(\varphi + \varphi_0)$ :

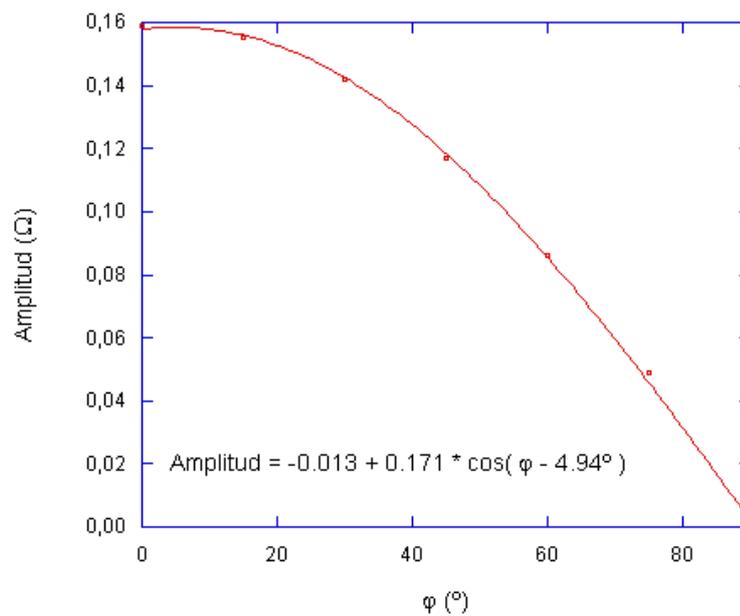
$$Z = 3.423 + 0.159 \times \sin(\varphi + 1.49^\circ) \Omega. \quad (4.2)$$

El cambio de impedancia entre direcciones opuestas es de  $0.33\ \Omega$  y la máxima sensibilidad de  $s = 4.5\ \text{m}\Omega/^\circ$ , tomando ésta lugar cuando el campo magnético es perpendicular ( $\varphi \simeq 180^\circ, 360^\circ$ ) al campo de polarización longitudinal a la muestra (en el eje X).

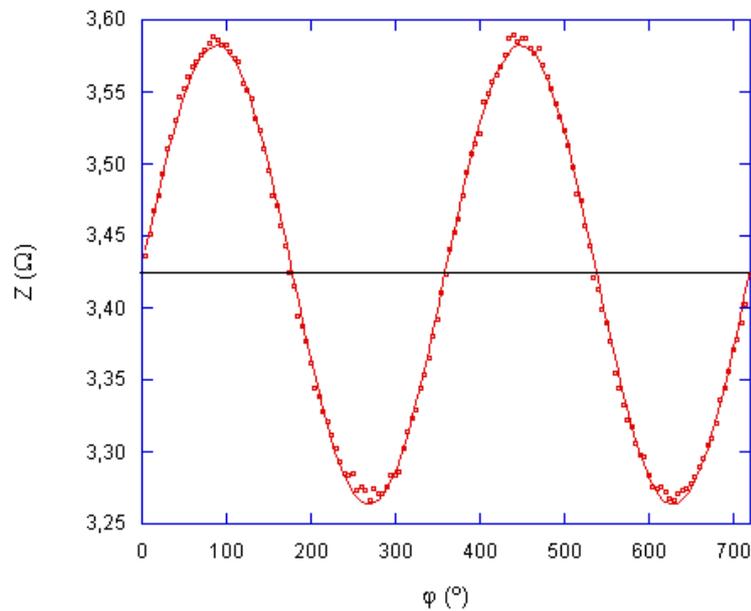
En este caso también se presentan valores de  $\varphi_0$  no nulos, pero notablemente menores que



**Figura 4.3:** Medidas de la impedancia en función del ángulo  $\theta$  para diferentes planos definidos por el ángulo  $\varphi$ .



**Figura 4.4:** Amplitud del ajuste cosenoidal en función del plano en el cual se ha barrido el ángulo  $\theta$ .

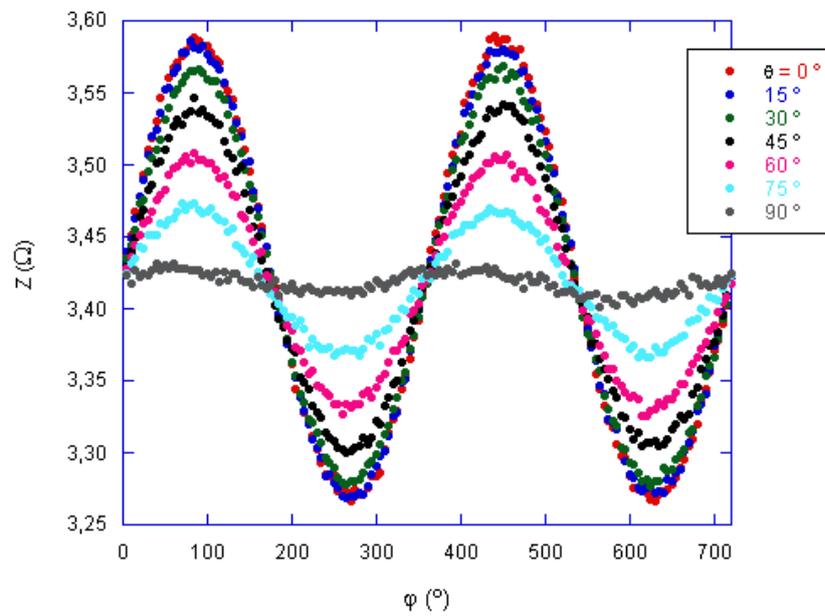


**Figura 4.5:** Medidas de la impedancia en función del ángulo  $\varphi$  para el plano definido por el ángulo  $\theta = 0^\circ$ .

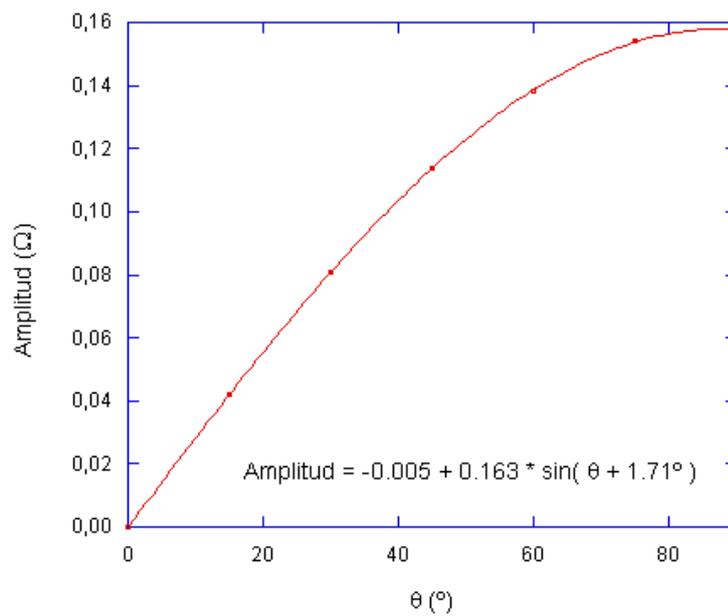
los equivalentes de  $\theta_0$  para los resultados en función de la longitud. Esto se debe a que el error producido con respecto a la horizontalidad de la muestra es mucho menor que el cometido en su direccionamiento en el triaxis.

En la Figura 4.6 aparecen representadas las variaciones de la impedancia cuando el campo magnético es simulado en varias direcciones especificadas por el ángulo  $\varphi$  de diferentes planos determinados por el valor del ángulo azimutal  $\theta$ .

Se puede observar que la amplitud de la función cosenoidal disminuye a medida que el ángulo sobre el plano se aleja de la dirección paralela al eje longitudinal de la muestra (Figura 4.7).



**Figura 4.6:** Medidas de la impedancia en función del ángulo  $\varphi$  para diferentes planos definidos por el ángulo  $\theta$ .



**Figura 4.7:** Amplitud del ajuste senoidal en función del plano en el cual se ha barrido el ángulo  $\varphi$ .

<b>Resultados para la variación de la longitud</b>					
$\varphi$ (°)	$\Delta Z_{max}$ ( $\Omega$ )	$Sensibilidad_{max}$ ( $m\Omega/^\circ$ )	$Z_0$ ( $\Omega$ )	$Z_m$ ( $\Omega$ )	$\theta_0$ (°)
90	0.32	4.3	3.442	0.158	7.93°
75	0.31	4.3	3.436	0.154	7.58°
60	0.29	3.9	3.437	0.138	7.61°
45	0.25	3.7	3.438	0.114	7.84°
30	0.17	3.0	3.435	0.081	7.84°
15	0.09	2.1	3.438	0.042	9.46°
<b>Resultados para la variación de la latitud</b>					
$\varphi$ (°)	$\Delta Z_{max}$ ( $\Omega$ )	$Sensibilidad_{max}$ ( $m\Omega/^\circ$ )	$Z_0$ ( $\Omega$ )	$Z_m$ ( $\Omega$ )	$\varphi_0$ (°)
0	0.33	4.5	3.423	0.159	1.49°
15	0.31	4.2	3.422	0.155	1.43°
30	0.29	3.7	3.419	0.142	1.42°
45	0.25	2.9	3.418	0.117	2.16°
60	0.19	3.6	3.417	0.086	3.64°
75	0.10	2.3	3.423	0.159	7.78°

**Cuadro 4.1:** Tabla con los parámetros obtenidos para los distintos ajustes de las medidas realizadas con el analizador de redes.



---

## CAPÍTULO 5

---

# Interfaz electrónica de propósito específico

Como se ha comprobado en el capítulo anterior, la implementación del efecto de GMI de las películas delgadas de Permalloy como principio de medida para un sensor de campo magnético presenta unos valores interesantes de la sensibilidad. A pesar de ello, su utilización como brújula queda restringida al laboratorio en el que se encuentre el analizador de redes, ya que su gran tamaño impide un fácil transporte.

Con la intención de presentar una solución a este problema que sea comercializable, en este capítulo se describe una propuesta de circuito electrónico que, junto con el mismo elemento sensible utilizado hasta el momento, haga las veces de brújula electrónica y sea susceptible de ser implementado en forma de circuito integrado<sup>1</sup>. Para ello primero se describen las diferentes partes discretas que lo componen, y a continuación se pasa a comprobar que, en efecto, el principio de medida del sensor es igual de válido en este caso.

### 5.1. Descripción del circuito electrónico de la brújula

Para la correcta implementación del efecto de GMI como principio de medida de la brújula es imprescindible que el circuito electrónico propuesto sea capaz tanto de generar una señal alterna de corriente que atraviese la película delgada como de estimar con una magnitud adecuada las variaciones en el campo magnético. Para la primera tarea utiliza como componente principal un oscilador de cuarzo, mientras que para la segunda se usa un detector de potencia.

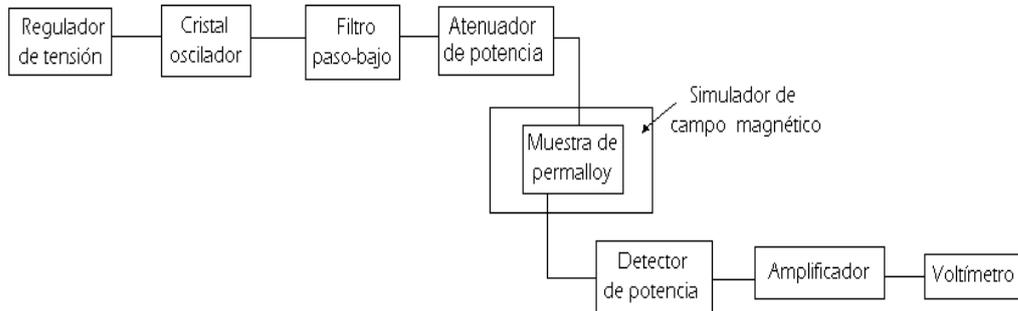
Además de lo anteriormente mencionado, resulta imprescindible realizar un adecuado acondicionamiento de las señales, de modo que la salida sea interpretable por el usuario. En la Figura 5.1 se muestra el esquema general cuyos elementos se pasan a describir someramente a continuación.

Las fuentes de tensión utilizadas proporcionan unos valores de la tensión de  $\pm 12$  V, adecuados para alimentar el detector de potencia y el amplificador operacional de la etapa de salida del circuito. Sin embargo, el cristal utilizado como oscilador se debe alimentar con 3.3 V, por lo que se hace necesario un regulador de tensión que, a partir de 12 V sea capaz de entregar 3.3 V (Figura 5.2).

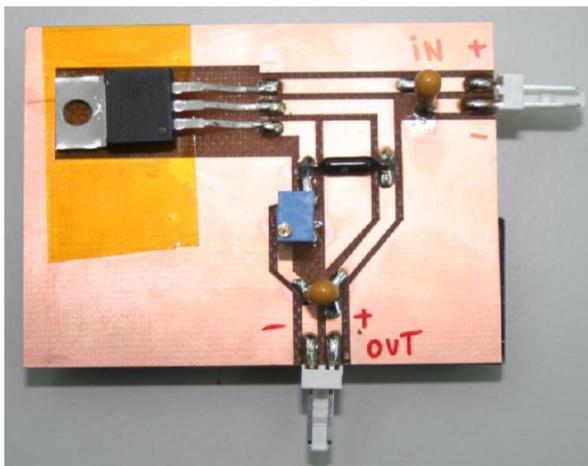
Para poder utilizar las propiedades de GMI de la muestra como principio de medida del

---

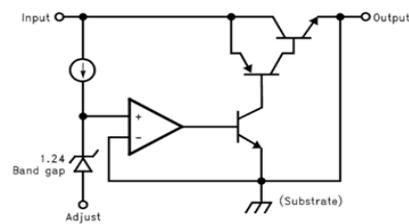
<sup>1</sup>El diseño del circuito electrónico se realizó gracias al asesoramiento de Eduardo Fernández.



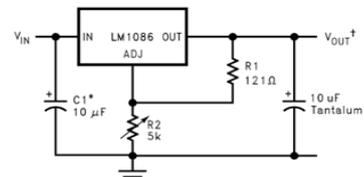
**Figura 5.1:** Esquema general del circuito diseñado para cumplir la función de sensor de campo magnético.



**Basic Functional Diagram, Adjustable Version**



**Application Circuit**

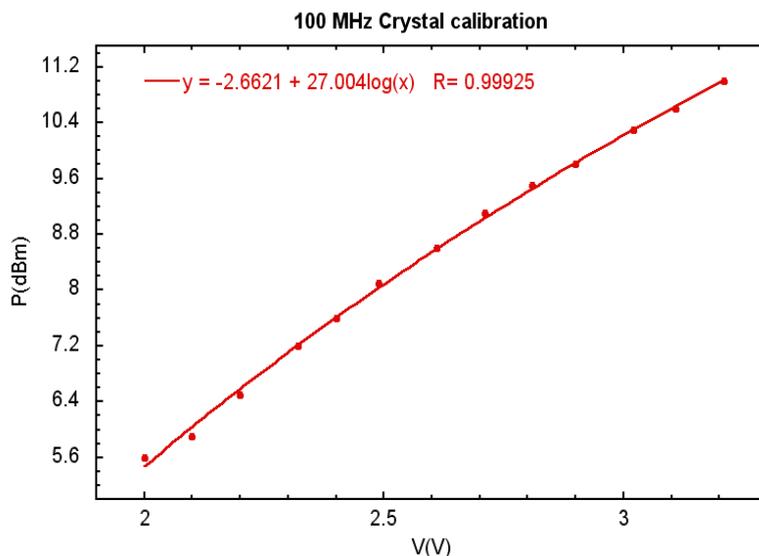


\*NEEDED IF DEVICE IS FAR FROM FILTER CAPACITORS

$$^{\dagger}V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

**1.2V to 15V Adjustable Regulator**

**Figura 5.2:** Vista general del circuito de alimentación del oscilador de cuarzo y esquema del regulador de tensión LM1086 de bajo ruido utilizado en el circuito electrónico.



**Figura 5.3:** Curva de calibración de la potencia entregada por el cristal de cuarzo utilizado como oscilador en el circuito electrónico.

sensor es imprescindible hacer atravesar la película delgada por una corriente alterna. Tal y como se hizo en el capítulo anterior, dicha corriente será de 100 MHz, ya que es en este valor donde se sitúa el punto de operación óptimo de funcionamiento de la brújula (Figura 2.8).

Para llevar este requerimiento a efecto se ha escogido como oscilador un cristal de cuarzo cuya calibración de potencia se muestra en la Figura 5.3. Al ser el cristal alimentado por 3.3 V, la potencia a la salida del cristal es de aproximadamente 10 dBm, medido en escala logarítmica. Será necesario atenuar esta potencia en una etapa posterior para no sobrecargar la muestra de Permalloy, cuya resistencia efectiva es  $\approx 1 \Omega$ .

El oscilador genera una onda cuadrada. Por ello, se sitúa un filtro paso-bajo inmediatamente a la salida del cristal, escogiendo el valor de sus componentes de tal modo que la señal que llegue a la muestra sea sinusoidal de frecuencia 100 MHz.

Tal y como se ha apuntado anteriormente, antes de transmitir la señal alterna a la muestra, es importante reducir la potencia de la misma a 0 dB, para así no estropear las propiedades de la película de Permalloy. Es por ello por lo que se ha añadido al circuito un atenuador de potencia, compuesto por un puente de resistencias cuyos valores se han escogido para que la atenuación sea de 10 dB (Figura 5.5).

Una vez alimentada la muestra con la señal generada y sometida esta a los campos magnéticos correspondientes en la estación de simulación, se realiza una detección de la potencia a la salida de la película delgada. El detector de potencia ZX47-50-S+ proporciona una salida en voltios, siendo su salida de 0.8 V para una potencia de 0 dB.

Las variaciones de la potencia detectada producidas por los cambios de impedancia de la muestra son de muy pequeña amplitud ( $\mu V$ ). Se ha hecho uso de un amplificador de instrumentación INA 128, implementado con una resistencia  $R_G = 470 \Omega$  para amplificar 100 veces la señal de salida del detector de potencia. El ajuste de la resistencia  $R_P$  que se muestra en la Figura 5.6 tiene como objetivo la compensación del offset de 0.8 V recibido del detector de potencia.

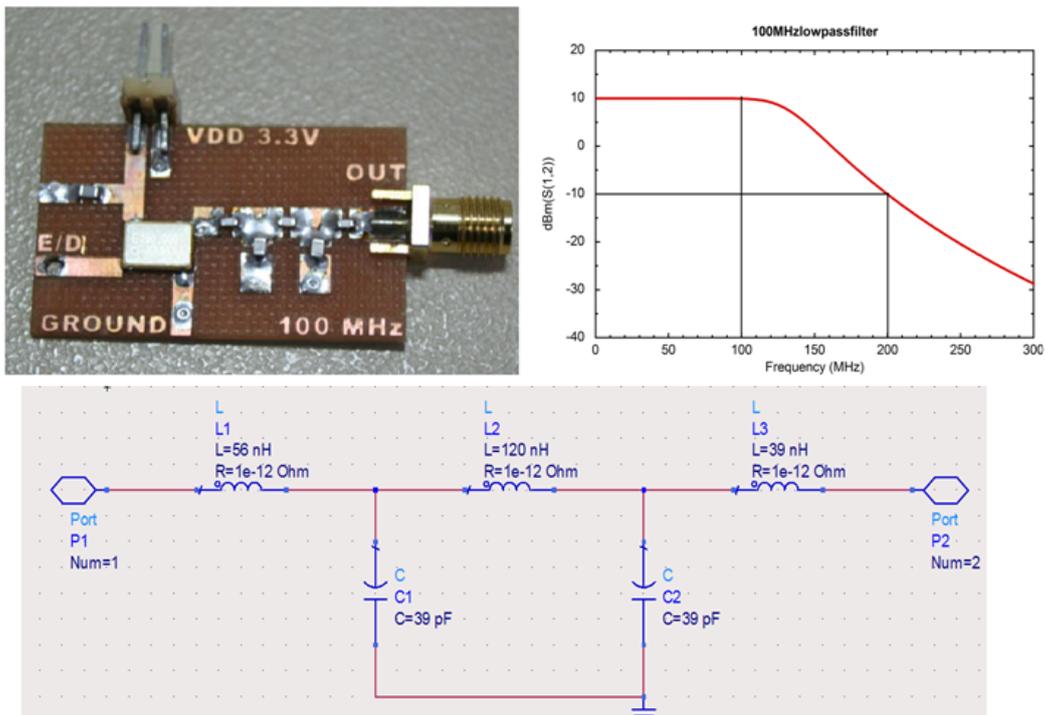


Figura 5.4: Vista general del filtro y esquema del filtro pasa-bajo utilizado en el circuito electrónico.

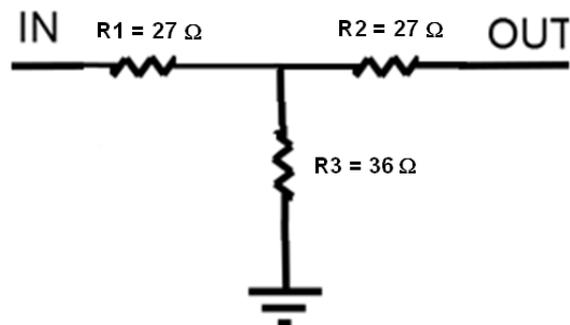
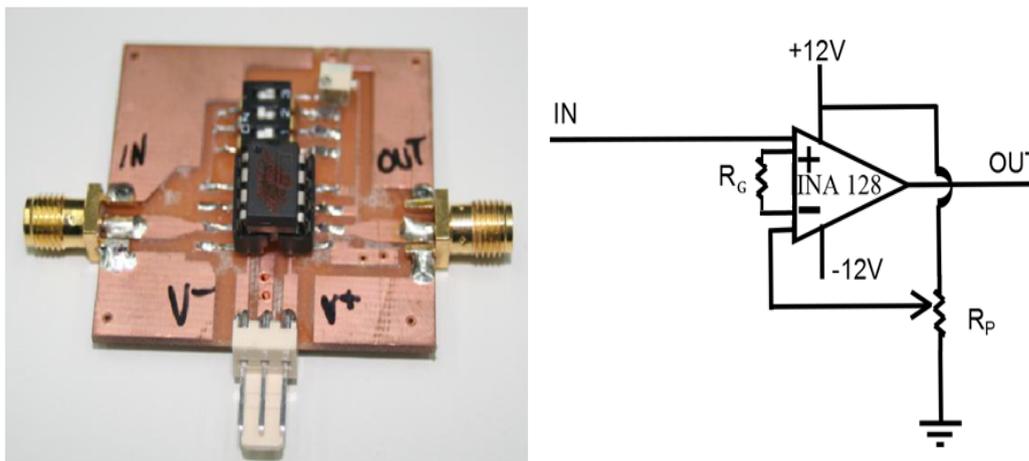


Figura 5.5: Esquema del atenuador de 10 dB de potencia utilizado en el circuito electrónico para no sobrecargar la película delgada de permalloy.



**Figura 5.6:** Vista general del circuito de amplificación y esquema del amplificador INA 118 utilizado en el circuito electrónico.

Por último, se mide la tensión con un multímetro *Agilent S4401A*, y se muestran los resultados en el display creado en LabVIEW para tal efecto, almacenándolos en su fichero de texto correspondiente. El VI encargado de controlar el voltímetro realiza continuamente cinco medidas de cada valor de la tensión, siendo la media de éstas la que se considera como valor final.

## 5.2. Resultados obtenidos con el circuito electrónico diseñado

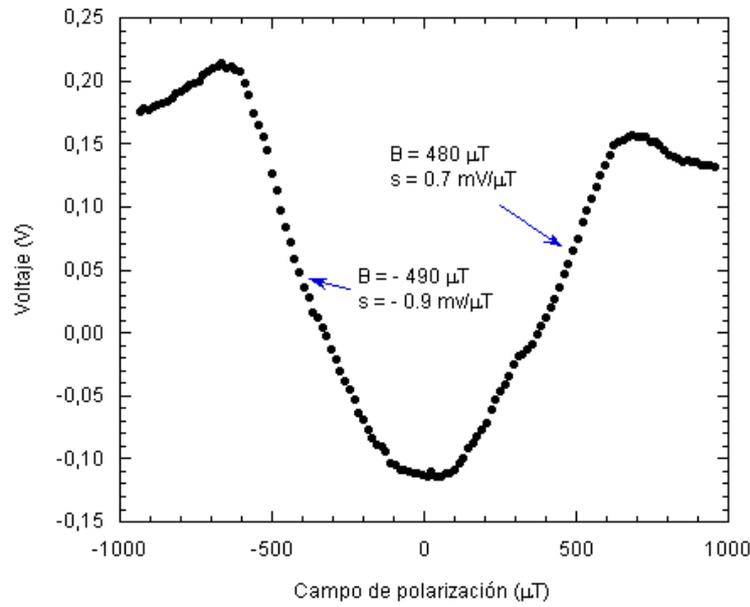
Para comprobar el correcto funcionamiento del circuito diseñado se ha repetido las mismas medidas realizadas en el capítulo anterior con el analizador de redes, demostrando así que, en efecto, la tensión medida por el voltímetro es dependiente de la componente longitudinal del campo magnético simulado tal y como cabía esperar.

En un primer experimento, se ha hecho variar el campo magnético de polarización de la muestra para así encontrar su punto de operación óptimo. Únicamente se ha podido realizar un barrido en el rango comprendido entre  $\pm 1$  mT, ya que se han utilizado las propias bobinas de la estación de simulación de campo magnético, en vez de los carretes Helmholtz utilizados para obtener la curva mostrada en la Figura 2.6.

En la Figura 5.7 se verifica la estructura esperada de doble pico, así como también, a través de su derivación, se han podido encontrar los valores de la polarización que mayor sensibilidad aportan:  $0.7$  mV/ $\mu$ T para  $480$   $\mu$ T, y  $-0.9$  mV/ $\mu$ T para  $-490$   $\mu$ T.

A pesar de estos valores, la película delgada de permalloy ha sido polarizada con  $490$   $\mu$ T, valor para el que se ha encontrado un compromiso entre la mayor sensibilidad presentada por la muestra y la nitidez de la señal de salida aportada por el circuito electrónico.

La Figura 5.8 muestra la variación de la tensión medida por el voltímetro cuando un campo magnético “terrestre” de  $40$   $\mu$ T es aplicado en diferentes direcciones dentro del plano XY ( $\varphi =$



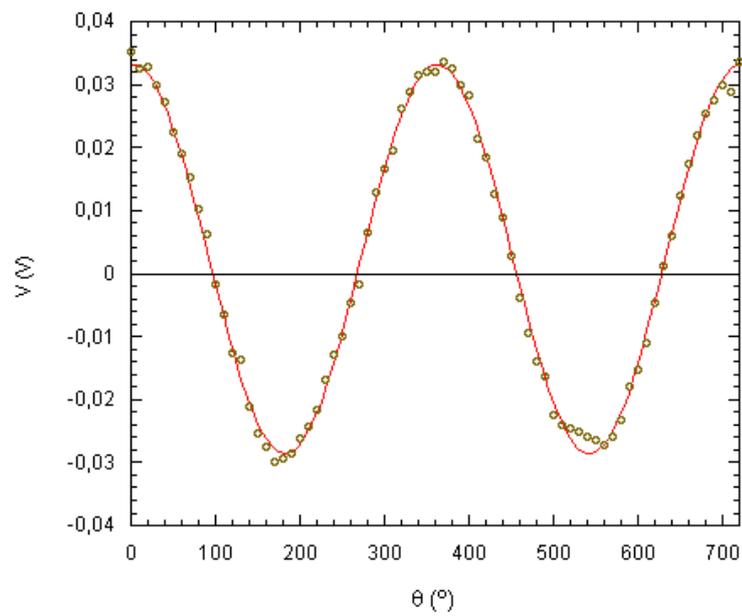
**Figura 5.7:** Salida de la película de  $1.5\text{mm}_120\mu\text{m}$  medida con el circuito electrónico en función del campo magnético de polarización a una frecuencia de 100 MHz.

$90^\circ$ ).

La línea continua trazada en el gráfico ajusta los puntos medidos a la función sinusoidal:

$$V = 0.003 + 0.031 \cdot \cos(\theta - 2.32^\circ) \text{ V.} \quad (5.1)$$

El cambio de voltaje entre direcciones opuestas es de  $0.065 \text{ V}$  y la máxima sensibilidad de  $s = 0.8 \text{ mV}/^\circ$ , tomando ésta lugar cuando el campo magnético simulado es perpendicular ( $\theta \approx 272^\circ$ ) al campo de polarización longitudinal a la muestra (en el eje X).



**Figura 5.8:** Medidas realizadas con el circuito electrónico en función del ángulo  $\theta$  con una polarización de la muestra de  $490 \mu T$ .



---

## CAPÍTULO 6

---

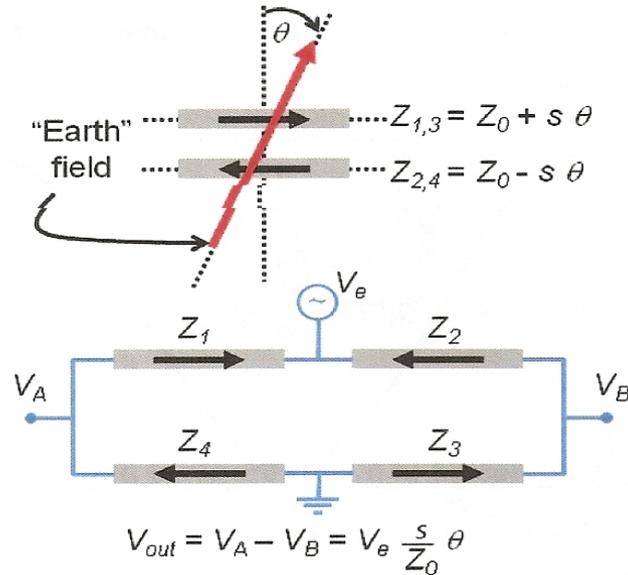
### Conclusiones

En este capítulo se recogen los resultados fundamentales obtenidos a lo largo de la investigación realizada en el presente trabajo. El estudio de los métodos de implementación del fenómeno de GMI como principio de medida en sensores de campo magnético es un área con múltiples campos de trabajo, muchos de los cuales están todavía en proceso de elaboración, el que se trata en la presente investigación entre ellos.

Este trabajo no es más que una muestra de la riqueza de este campo tanto en lo que a estudio de fenómenos físicos se refiere, como a su aplicación mediante diferentes montajes experimentales. En esta investigación se han seguido unas pautas y procesos concretos, pero las posibilidades de variar estos y obtener diferentes (y posiblemente mejores) resultados son numerosas.

Las principales conclusiones obtenidas en las diferentes etapas de la investigación se muestran a continuación.

- En un anterior Trabajo Fin de Grado de Física se prepararon una serie de películas delgadas multicapa de Permalloy de distintas dimensiones ( $[\text{FeNi}/\text{Ti}]_3/\text{Cu}/[\text{Ti}/\text{FeNi}]_3$ ). La forma de dichas muestras se definió en un primer proceso de fotolitografía, y la deposición de los materiales en la oblea se realizó por pulverización catódica, donde se indujo una anisotropía en dirección transversal en cada muestra.
- Las películas delgadas de Permalloy preparadas presentan el efecto de magnetoimpedancia gigante, resultado que se explica a la luz del efecto pelicular. A partir de la medida de GMI para distintas frecuencias y distintos campos magnéticos aplicados se han podido calcular las sensibilidades relativas de la muestra escogida para hacer las veces de elemento sensible para el sensor de campo magnético cuyo estudio constituye el grueso de este trabajo. Dicha muestra presenta un valor máximo de la GMI del 87 % a una frecuencia de 117 MHz, y una sensibilidad relativa del 18 %/Oe a 100 MHz.
- Para poder comprobar posteriormente el buen comportamiento del sensor diseñado como brújula se ha optado por simular el campo magnético con un triaxis de bobinas de Helmholtz alimentados por tres fuentes de alimentación monopares, una para cada eje cartesiano. Así, junto con los Instrumentos Virtuales necesarios programados en LabVIEW, ha sido posible obtener una calibración del instrumento, así como el campo real



**Figura 6.1:** Esquema del puente de Wheatstone propuesto para tomar ventaja del hecho de que la sensibilidad posee signos opuestos a  $90^\circ$  y  $270^\circ$  para el caso de la colatitud  $\varphi$  [12].

presente en el lugar de la investigación. También se ha realizado un seguimiento del campo simulado a través del diseño adecuado de un PID, así como del control de los relés de las fuentes de alimentación.

- Mediante la variación de la impedancia cuando el campo magnético es rotado en diversas direcciones de diferentes planos determinados tanto por la latitud como por la longitud, ha podido validarse el principio experimental de medida de GMI propuesto en un principio. Para ello, en un primer momento se ha optado por utilizar un analizador de redes, en cuyo caso se han obtenido como resultado unas gráficas que ajustan a funciones sinusoidales tal y como era de esperar debido a la naturaleza del experimento.
- En un segundo intento de validar el principio de medida y de implementarlo en un instrumento manejable que no dependa del gran tamaño del analizador de redes, se ha procedido al diseño de un circuito electrónico de propósito específico. Para generar la señal alterna de corriente que debe atravesar la muestra se ha utilizado un cristal oscilador de cuarzo, mientras que para estimar la magnitud de las variaciones del campo magnético se ha optado por un detector de potencia. Al igual que en el caso del uso de instrumentación de propósito general, los resultados han sido coherentes con el comportamiento esperado debido a la variación de la GMI, que en el caso del circuito electrónico se traduce en señales variables del voltaje medido del detector de potencia con un multímetro.
- Uno de los inconvenientes de utilizar una única muestra colocada en uno de los ejes espaciales es que las dos componentes restantes del campo magnético no son detectadas, observándose una disminución de la sensibilidad de la componente medible a medida que dicho campo se aleja de su dirección perpendicular. Esto podría solucionarse colocando otras tantas muestras idénticas en las direcciones espaciales restantes, lo cual supone complicaciones en la obtención de las mismas.

Además, para aumentar la sensibilidad del sistema se podría aprovechar el hecho de que, para el caso de variaciones del campo en planos definidos por la colatitud  $\varphi$ , la sensibilidad presenta signo opuesto a  $90^\circ$  y  $270^\circ$ . Colocando dos o cuatro muestras idénticas en una configuración de puente de Wheatston de modo que cada una se sitúe en direcciones opuestas de las líneas de campo magnético (Figura 6.1), sería posible tanto aumentar la sensibilidad como cancelar variaciones indeseadas de la impedancia debidas a cambios en la temperatura.

Como se puede observar son muchas y variadas las especificaciones que se deben tener en cuenta a la hora de elaborar estos dispositivos. Esto se debe en gran parte a los múltiples factores que entran en juego a lo largo de todo el diseño, permitiendo experimentar con diferentes variables e instrumentación y ver cómo esta afecta a la respuesta magnética del elemento sensible..

De todo lo anterior se concluye que tanto la película delgada preparada como el método de implementación del fenómeno de GMI presentan unas características idóneas para ser aplicadas en un sensor magnético, cuyo fundamento sería la detección de pequeñas variaciones en un campo  $H$  a través de la gran variación que sufre la impedancia. Aparte de la aplicación como brújula que se ha pretendido emular en este trabajo, las aplicaciones de estos tipos de sensores basados en GMI pasan por la simple detección de cuerpos en movimiento en el control de tráfico; la determinación del vector del campo magnético ambiental y su origen, necesario en técnicas aeroespaciales; o la búsqueda de partículas magnéticas rastreadoras que se introducen en el cuerpo humano junto con los medicamentos para seguir a estos el rastro, de tal modo que se hace necesario un sensor de gran sensibilidad, ya que los campos magnéticos de dichas partículas son muy pequeños, entre  $10^{-10}$  -  $10^{-5}$  Oe [13].



---

# Bibliografía

- [1] PNI sensor corporation, 133 Aviation Blvd., Suite 101, Santa Rosa, CA 95403, U.S.A. [www.pnicorp.com](http://www.pnicorp.com)
- [2] Aichi Micro Intelligent Corporation, Wanowari, Arao-machi, Toaki-shi, Aichi, Japan. [www.aichimi.com](http://www.aichimi.com)
- [3] S. Tumanski, *“Thin film magnetoresistive sensors”*, IOP Publishing Ltd., Bristol (2001)
- [4] Asahi Kasei Microdevices Corporation (AKM), 1-105 Kanda Jinbocho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8101 Japn. [www.akm.com](http://www.akm.com)
- [5] K. Mohri, T. Uchiyama, L.P. Shen, C.M. Cai, L.V. Panina: *“Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls”* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **249**, (2002) 351
- [6] International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) [www.iugg.org/associations/iaga](http://www.iugg.org/associations/iaga)
- [7] E. Fernández, A. V. Svalov, A. García-Arribas, J. Feuchtwanger, J. M. Barandiaran, and G. V. Kurylanskaya: *“High Performance Magnetoimpedance in FeNi/Ti Nanostructured Multilayers with Opened Magnetic Flux”*, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, **12**, (2012) 7496–7500
- [8] Z. Q. Qiu , S. D. Bader *“Surface magneto-optic Kerr effect”*, Review of scientific instruments, **71**, (2000) 1243
- [9] Joaquín Del Río Fernández, Shahram Shariat-Panahi: *“LabVIEW. Programación para sistemas de instrumentación”* Garceta Grupo Editorial (2011)
- [10] [www.serviciencia.es/BH300-e1.htm](http://www.serviciencia.es/BH300-e1.htm)
- [11] S Tumanski *“Handbook of Magnetic Measurements” (Series in Sensors)* Chapter 4: Magnetic Sensors. CRC Press. Taylor & Francis Group, (2011)
- [12] A. García-Arribas, E. Fernández, I. Orue, D. de Cos, J. M. Barandiaran, J. M. Mitxelena, and F. Martínez: *“Evaluation of a Thin Film Giant Magneto-Impedance Electronic Compass”*, Sensor Letters, **11**, (2013) pp. 36-39
- [13] Manh-Huong Phan, Hua-Xin Peng : *“Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications”*, Progress in Materials Science, **53**, (2008) 323