



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Magnetometría: Estudio de los magnetómetros Fluxgate

Autor: Juan Pita López

**Tutores: José María Muñoz Muñoz y Carlos Torres Cabrera
2023**

Índice general

1. Introducción	4
1.1. Historia	4
1.2. Motivación	5
2. Sensores magnéticos	6
2.1. Magnetómetro de bobina de inducción	6
2.1.1. Principio de funcionamiento	6
2.1.2. Bobinas de núcleo ferromagnético	7
2.1.3. Ventajas y desventajas	8
2.2. Efecto Hall	8
2.2.1. Principio de funcionamiento	9
2.3. Sensores Magnetorresistivos	10
2.3.1. Principio de funcionamiento	10
2.3.2. Aplicaciones	11
2.4. Resonancia Magnética	11
2.4.1. Principio de funcionamiento	11
2.4.2. Ventajas y desventajas de la resonancia magnética	14
2.5. Fluxgate	14
2.5.1. Principio de funcionamiento	14
2.5.2. Ventajas	15
3. Magnetómetro Fluxgate	16
3.1. Principios Físicos	16
3.1.1. Transformada de Fourier	17
3.1.2. Armónicos, simetría y asimetría	20
3.1.3. Fase	21
3.2. Modelos	22
3.2.1. Núcleo abierto	22
3.2.2. Núcleo en Anillo	23
3.3. Circuito eléctrico de un sensor Fluxgate	23
3.3.1. Compensación con Retroalimentación	24
3.3.2. Lock-in	24
4. Construcción	27
4.1. Cinta ferromagnética	27
4.2. Tubo de plástico	28
4.3. Cable esmaltado	28
4.4. Bobina detectora	29
4.5. Generador	29
4.6. Osciloscopio	30
4.7. Ordenador	30

4.8. Circuito	31
5. Medidas experimentales	32
5.1. Elección Amplitud	32
5.2. Campo Magnético terrestre	34
6. Conclusiones	35
Bibliografía	35
Anexo	38
Índice figuras	38

Resumen

Un magnetómetro fluxgate es un sensor altamente sensible que se utiliza para medir la intensidad y la dirección de los campos magnéticos. Este tipo de magnetómetro se basa en el principio de la saturación magnética en un núcleo de material ferromagnético. Los magnetómetros fluxgate se componen de una fuente de corriente alterna, dos bobinas y un núcleo de material ferromagnético. La fuente de corriente alterna genera un campo magnético oscilante que es inducido en una de las dos bobinas, y se utiliza una segunda bobina para medir la fluctuación del campo magnético resultante en el núcleo.

En la práctica, los magnetómetros fluxgate se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo la navegación, la geología, la exploración espacial, la detección de metales, para medir campos magnéticos como el terrestre o anomalías magnéticas en la corteza terrestre. También se utilizan en aplicaciones industriales para medir campos magnéticos en motores, generadores eléctricos y otros componentes eléctricos. La alta sensibilidad y precisión de los magnetómetros fluxgate, su robustez y su diseño simple los hace útiles en una amplia gama de aplicaciones científicas e industriales.

Abstract

A fluxgate magnetometer is a highly sensitive sensor used to measure the intensity and direction of magnetic fields. This type of magnetometer is based on the principle of magnetic saturation in a core of ferromagnetic material. Fluxgate magnetometers consist of an alternating current source, two coils and a core of ferromagnetic material. The AC source generates an oscillating magnetic field that is induced in one of the two coils, and a second coil is used to measure the fluctuation of the resulting magnetic field in the core.

In practice, fluxgate magnetometers are used in a wide variety of applications, including navigation, geology, space exploration, metal detection, to measure magnetic fields such as the earth's magnetic field or magnetic anomalies in the earth's crust. They are also used in industrial applications to measure magnetic fields in motors, electrical generators and other electrical components. The high sensitivity and accuracy of fluxgate magnetometers, their robustness and simple design make them useful in a wide range of scientific and industrial applications.

Capítulo 1

Introducción

La historia del magnetismo se remonta a la antigua Grecia, donde se descubrieron las primeras piedras magnéticas. En el siglo XIX, científicos como Faraday y Maxwell hicieron importantes contribuciones en el estudio del magnetismo y su relación con la electricidad, sentando las bases para la electromagnetismo. Hoy en día, el magnetismo y los campos magnéticos son fundamentales para el funcionamiento de muchas tecnologías modernas.

1.1. Historia

El magnetismo es uno de los fenómenos físicos que primero fueron investigados.

- Los primeros informes en Europa de las fuerzas de atracción y repulsión que surgen entre rocas magnéticas fueron realizadas por Tales de Mileto alrededor del año **600 a.C.**
- La **brújula** puede considerarse realmente como el primer sensor magnético, ya que reacciona al campo magnético terrestre. Su historia se remonta a hace más de **4000** años cuando fué inventada en China.

La brújula adquirió una importancia significativa en Europa a partir del año 1200 y, en particular, en la época de los grandes aventureros y exploradores marinos.

- Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) construyó una balanza de torsión e investigó las fuerzas electrostáticas de atracción. Formuló la **ley de Coulomb**.
- En **1820**, Hans Christian **Oersted** descubrió que una aguja magnética se movía cerca de un cable con corriente eléctrica, lo que significa que la corriente eléctrica genera un campo magnético que rodea el cable.
- **Ampère** formuló la hipótesis de que una corriente eléctrica es la fuente de todo campo magnético. Ese mismo año, demostró que dos cables paralelos que conducen corriente se atraen entre sí.
- Jean-Baptiste **Biot** y Felix **Savart** propusieron la regla (conocida como la **ley de Biot-Savart**) que permite determinar la fuerza del campo magnético alrededor de un cable conductor de corriente.
- En **1831**, Michael Faraday, afirmó que si un flujo magnético que enlaza un circuito eléctrico cambia, induce en este circuito una fuerza electromotriz (voltaje) proporcional a la tasa de cambio del flujo.

- Terminaremos con el trabajo publicado en **1873** por James Clerk **Maxwell**. En 'A Treatise on Electricity and Magnetism' [13], propuso un conjunto de ecuaciones que pueden resumirse en cuatro: **dos de Gauss**, la **Ley de Ampère-Maxwell** (modificada para que incluya la corriente de desplazamiento $\vec{D} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$) y la **Ley de Faraday**, que son fundamentales para todos los análisis de los campos eléctricos y magnéticos [20], [18].

$$\begin{aligned}
 \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} && \text{Ley de Gauss} \\
 \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 && \text{Ley de Gauss magnetismo} \\
 \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} && \text{Ley de Faraday} \\
 \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu \left(\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \right) && \text{Ley de Ampère-Maxwell}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Para comprender el funcionamiento del magnetómetro fluxgate las leyes más importantes son: la **Ley de Ampère**, la **Ley de Faraday** y la **Ley de Biot y Savart**.

1.2. Motivación

Los sensores magnéticos son una tecnología de detección que ha revolucionado muchas industrias y campos de aplicación. Desde la detección del campo magnético terrestre hasta la exploración del espacio, la detección de objetos magnéticos, la navegación GPS y la medicina, los sensores magnéticos han demostrado ser una herramienta valiosa y versátil. [18]

La construcción de un magnetómetro fluxgate implica aplicar principios y conceptos teóricos clave de electromagnetismo, matemáticas, electrodinámica y electrónica. Comprender la teoría detrás de su funcionamiento, incluyendo la magnetización y desmagnetización de materiales ferromagnéticos, el diseño de las bobinas de excitación, el tratamiento de señales o el diseño del circuito requiere un sólido conocimiento de electromagnetismo y teoría de circuitos.

Además, este proyecto proporciona una oportunidad valiosa para adquirir habilidades prácticas en el laboratorio. La construcción de un magnetómetro fluxgate implica la manipulación y montaje de componentes electrónicos, la calibración de sensores, la realización de mediciones precisas o la realización de programas que analicen los datos de los sensores. Estas actividades fortalecen las habilidades técnicas y permiten comprender de manera más completa los conceptos teóricos asociados.

En conclusión, construir un magnetómetro fluxgate es un desafío que brinda oportunidades para el aprendizaje tanto teórico como práctico, así como para el desarrollo de habilidades y competencias en la investigación científica en una rama del conocimiento fundamental para la industria y tecnología actual.

Capítulo 2

Sensores magnéticos

La medición del campo magnético es esencial en muchas aplicaciones industriales y científicas. La elección del sensor magnético adecuado dependerá de varios factores. Existen varios tipos de sensores magnéticos disponibles en el mercado, cada uno con sus propias características y ventajas.

Aquí vamos a exponer 5 ejemplos: **Inducción, magnetorresistivos, Efecto Hall, Resonancia magnética y Fluxgate.**

2.1. Magnetómetro de bobina de inducción

Los magnetómetros de inducción con bobinas sirven para la detección de campos magnéticos débiles. Dado que los componentes clave son las bobinas, son relativamente fáciles de imaginar y de fabricar. Ni siquiera necesitan estar conectados a una fuente de energía.

El magnetómetro de inducción es uno de los más sencillos y fáciles de entender, dado que simplemente se basa en la **ley de Faraday**.

2.1.1. Principio de funcionamiento

La Ley de Faraday es una ley fundamental de la física que establece que si el **campo magnético** varía a través de una **superficie cerrada** se producirá una fuerza electromotriz inducida (**una tensión**) en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético a través de la superficie del circuito. Dicha fuerza electromotriz tenderá a oponerse a la variación de flujo magnético que la produjo.

$$\epsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (2.1)$$

Aplicando la ley de Faraday podemos construir una bobina enrollando un cable de cobre. De esta forma aumentaremos el flujo magnético total.

La ley de Faraday aplicada a una bobina es la siguiente:

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -NA\frac{dB}{dt} \quad \text{Ley de Faraday} \quad (2.2)$$

Donde ϕ es el flujo magnético que pasa por cada superficie A de cada espira, B es el campo magnético y N es el número total de espiras en la bobina.



Figura 2.1: Estructura básica de una bobina. [20]

2.1.2. Bobinas de núcleo ferromagnético

El **ferromagnetismo** es la propiedad de imantación **intensa**, que poseen ciertos materiales en presencia de un campo magnético. Incluso, aun si dicho campo desaparece la capacidad de atracción puede permanecer por mucho tiempo. Los principales elementos ferromagnéticos son el hierro, el cobalto y el níquel. Algunos óxidos también pueden presentar ferromagnetismo. [12].

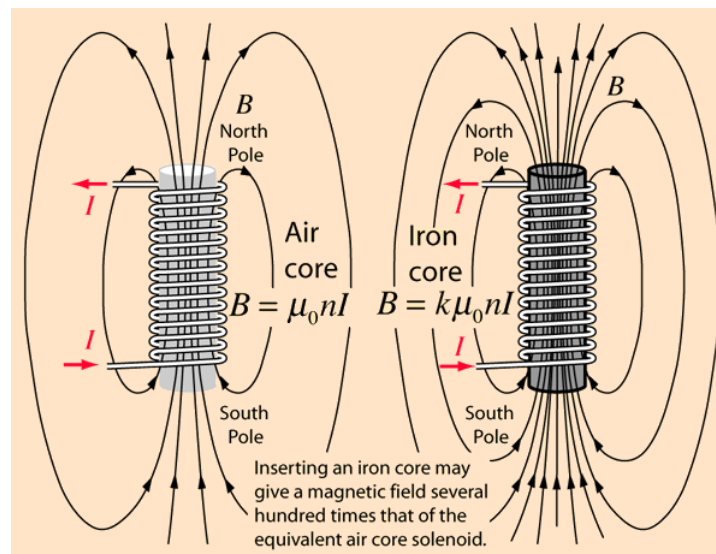


Figura 2.2: Campo magnético con núcleo y sin él. [9]

La propiedad más útil en este contexto de los materiales ferromagnéticos es su anormalmente altas **susceptibilidad magnética** χ y **permeabilidad magnética** $\mu = \mu_0(1 + \chi)$. La susceptibilidad magnética puede llegar a valores de 10^4 y 10^5 . [20]

La sensibilidad relativamente baja de un sensor de bobina de aire puede superarse parcialmente introduciendo un núcleo ferromagnético, que aumenta el campo producido por la bobina (Figura 2.2). Esta técnica de colocar un núcleo ferromagnético en el interior de una bobina **también se utiliza en el magnetómetro fluxgate** aunque por motivos diferentes.

2.1.3. Ventajas y desventajas

Ventajas

- El fundamento teórico es muy fácil de entender.
- Es muy sencillo de diseñar y fabricar
- No requiere de fuentes de energía.

Desventajas

- No es muy preciso.
- Tiene poco alcance.
- No detecta el campo magnético, sino cambios en el mismo.

2.2. Efecto Hall

El efecto Hall se define como la aparición de una diferencia de potencial alrededor de un conductor eléctrico en presencia de un campo magnético \vec{B} perpendicular a la dirección de la corriente. [18]

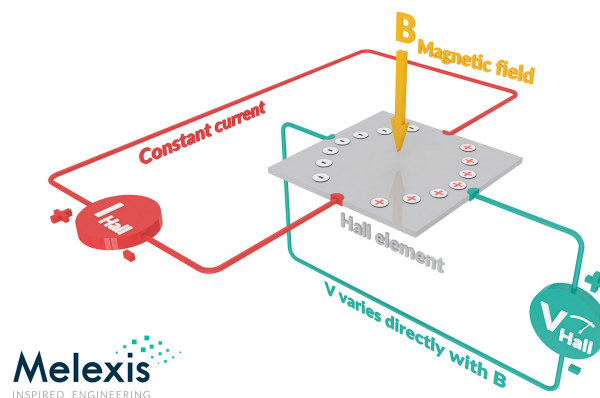


Figura 2.3: Efecto Hall. [15]

Los sensores magnéticos basados en el efecto Hall son probablemente los más utilizados en aplicaciones comerciales. Muchas veces no con el fin de medir el campo magnético sino con el fin de medir otras magnitudes mediante el campo magnético como son la posición, la velocidad lineal, la velocidad angular, etc... [18]

Los velocímetros electrónicos de la mayoría de coches funcionan mediante sensores de efecto Hall. También están presentes en sensores de proximidad, cintas de correr para gimnasios, impresoras 3D, en los indicadores de nivel de combustible de los coches o en los sistemas de frenos antibloqueo **ABS** que ayudan a prevenir el bloqueo de las ruedas del coche durante una frenada de emergencia.

2.2.1. Principio de funcionamiento

Los sensores de efecto Hall se basan en la fuerza de Lorentz: Una partícula con una carga q que se mueve con una velocidad \vec{v} en el seno de un campo magnético \vec{B} se ve afectada por una fuerza de Lorentz \vec{F} la cual es perpendicular a ambos vectores.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Fuerza de Lorentz} \quad (2.3)$$

Si tenemos en cuenta que la partícula cargada se encuentra también en un **campo eléctrico** \vec{E} además del campo magnético \vec{B} . Y sabiendo que la fuerza que ejerce un campo eléctrico \vec{E} sobre una carga q se expresa de la siguiente forma $F_{el\acute{e}ctrica} = q\vec{E}$ podemos **generalizar** la fuerza de Lorentz para una carga que se mueve en un campo **electromagnético** de la siguiente forma:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) \quad \text{Fuerza de Lorentz generalizada} \quad (2.4)$$

El funcionamiento descrito de manera simplificada es el siguiente: Imaginemos que tenemos un conductor con forma de ortoedro (largo l , ancho, d y grosor t) y lo conectamos en sus extremos a un batería. Los electrones fluirán rectos del polo negativo al positivo como el la Figura 2.4. Nada les impide seguir en línea recta. Si ahora medimos la diferencia de potencial en sus extremos perpendiculares no se detectará voltaje dado que no hay densidad de carga en el conductor.

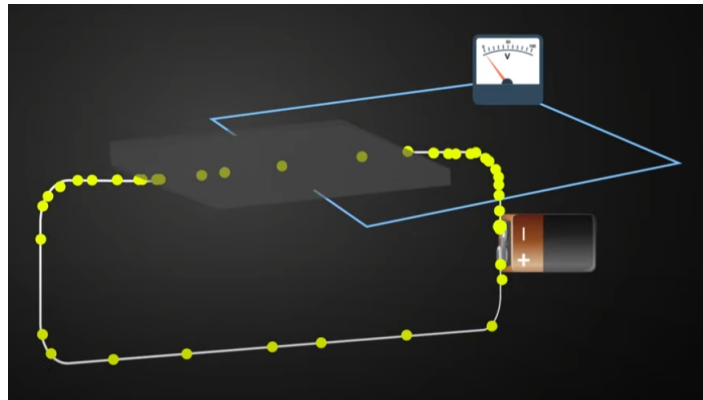


Figura 2.4: Los electrones fluyen en línea recta. [7]

Ahora colocamos un imán de forma que el campo magnético sea perpendicular a la superficie del conductor. En esta ocasión la fuerza de Lorentz empuja los electrones hacia uno de los extremos del conductor como en la Figura 2.6. Al depositarse los electrones del conductor en un extremo, en el otro extremo se pierden algunos electrones formándose una carga neta positiva.

Como se puede comprobar en la figura 2.5 las cargas se van almacenando en los lados del conductor por consecuencia de la fuerza de Lorentz. En contraposición dichas cargas acumuladas producen un campo eléctrico (campo de Hall \vec{E}_H) que impide que más y más cargas se vayan acumulando sin límite. Cuando estas dos fuerzas se igualan el conductor alcanza el equilibrio. [18]

Por tanto si ahora colocamos un voltímetro en ambos extremos del conductor, al haber cargas de distinto signo detectaremos una tensión llamada **voltaje Hall**. La magnitud de dicho

voltaje es de alguna manera proporcional al campo magnético aplicado al conductor. El voltaje Hall V_H permite que los electrones sigan fluyendo en línea recta a pesar de la fuerza de Lorentz. [20].

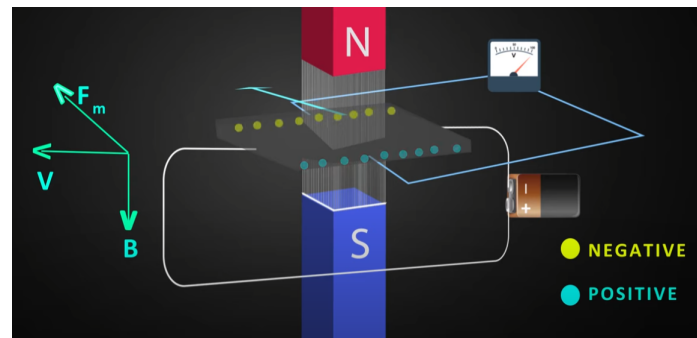


Figura 2.5: La fuerza de Lorentz empuja a los electrones. [7]

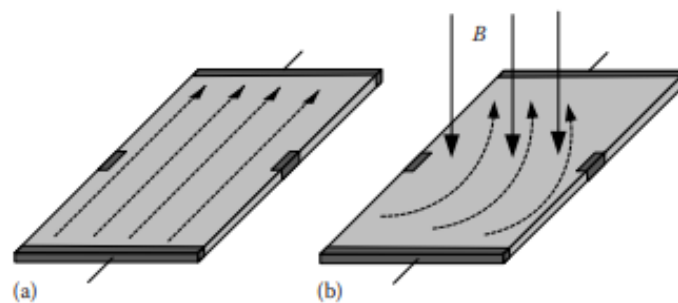


Figura 2.6: [20]

2.3. Senores Magnetorresistivos

La magnetorresistencia es la tendencia de un material (a menudo ferromagnético) a cambiar el valor de su resistencia eléctrica en un campo magnético aplicado externamente. Existen diversos efectos que pueden denominarse magnetorresistencia [1]. Algunos se producen en metales y semiconductores no magnéticos. Otros efectos se producen en metales magnéticos, como la magnetorresistencia negativa en ferromagnetos [17] o la magnetorresistencia anisotrópica (AMR).

2.3.1. Principio de funcionamiento

Vamos a ver la Magnetorresistencia ordinaria.

La magnetorresistencia ordinaria tiene lugar en metales no magnéticos y los semiconductores suelen presentar magnetorresistencia. El efecto se debe al mismo comportamiento que en el sensor de Hall, solo que en esta ocasión medimos la resistencia del material. La resistencia del material es proporcional a $(\mu B)^2$. Donde μ es la movilidad de los electrones. Al medir la resistencia del material, cuanto mayor sea esta mayor será el campo magnético. [21]

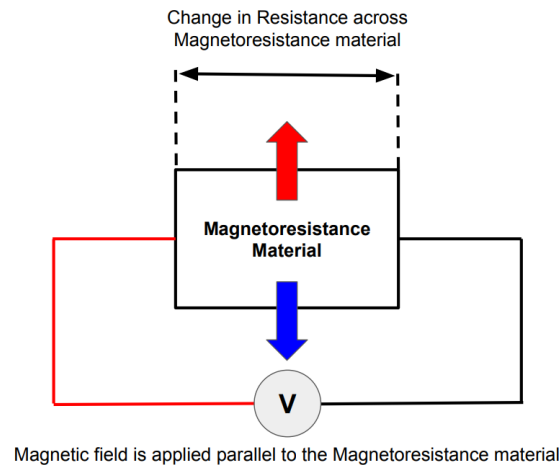


Figura 2.7: Medida de la resistencia del conductor. [6]

2.3.2. Aplicaciones

Los magnetómetros anisotrópicos magnetorresistivos (AMR) se utilizan en dispositivos tan variados como los sistemas de posicionamiento global **GPS** para proporcionar capacidad de navegación a estima y en sistemas de encendido de automóviles para proporcionar la posición rotacional del cigüeñal.

También suelen estar presentes en los teléfonos móviles inteligentes. La aplicación de la brújula o la flecha que permite saber en qué dirección nos estamos desplazando en aplicaciones como google maps funcionan gracias a un pequeño sensor AMR dentro del dispositivo.

2.4. Resonancia Magnética

La resonancia magnética nuclear o por sus siglas en inglés **NMR** (*Nuclear magnetic resonance*) es el término con el que se denominan un amplio abanico de fenómenos que se utilizan para el diagnóstico mediante imágenes en medicina, espectroscopia e investigación de los componentes de materiales en química o para la detección de campos magnéticos muy pequeños. [18]

La principal ventaja de los magnetómetros que funcionan mediante NMR es la asombrosa precisión que alcanzan. Por esta razón son comúnmente utilizados como estándar para la calibración de otros sensores magnéticos. [20]

2.4.1. Principio de funcionamiento

Los sensores de resonancia magnética se basan en las propiedades magnéticas del núcleo atómico. Cada partícula tiene asociado un valor de momento angular intrínseco llamado **spin**. Si una partícula cargada tiene un spin no nulo entonces tendrá también un momento magnético asociado.

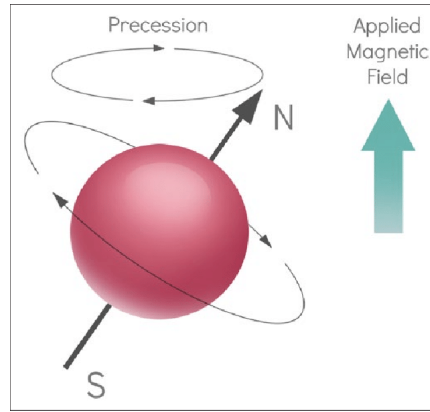


Figura 2.8: Momento magnético de un protón. [11]

Cuando se aplica un campo magnético externo, el campo ejercerá un par sobre el momento magnético. Esto produce un movimiento de precesión del momento campo magnético a una frecuencia determinada. Es análogo a la precesión de una peonza alrededor del campo de gravedad. El par de fuerza, puede ser expresado como la tasa de variación del momento angular de espín nuclear I , y equipararse a la expresión del par magnético sobre el momento magnético. [20]

$$\tau = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I \sin(\theta) \Delta \phi}{\Delta t} = \frac{ge}{2m_p} IB \sin(\theta) \quad (2.5)$$

La solución de la ecuación anterior nos da como resultado la velocidad angular de precesión. [20]

$$\omega_{Larmor} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{ge}{2m_p} B \quad (2.6)$$

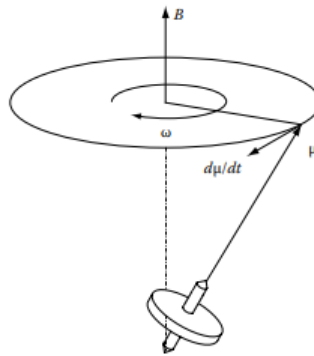


Figura 2.9: Precesión del momento magnético. [20]

También se puede visualizar en términos de la energía de transición entre los dos estados de espín posibles para el espín 1/2. La diferencia de energía potencial magnética entre +1/2 y -1/2 es $h\nu = 2\mu B$. La frecuencia angular asociada a un "flip de espín", se escribe a menudo en la forma general: [20] Donde γ se denomina factor giromagnético.

$$\omega = \gamma B \quad (2.7)$$

Partícula	Espín	Factor Giromagnético γ [M Hz/T]
^1H	1/2	42,576
^2H	1	6,536
^{17}O	5/2	30

Tabla 2.1: Tabla Factor Giromagnético [20]

En una resonancia magnética, en una muestra que contiene protones se coloca un fuerte campo magnético. Los protones empiezan a precesar con una frecuencia determinada en la misma dirección que el campo (paralela) o en la dirección opuesta (antiparalela). La mayoría de los protones se colocan de forma paralela como puede verse en la figura 2.10 [20].

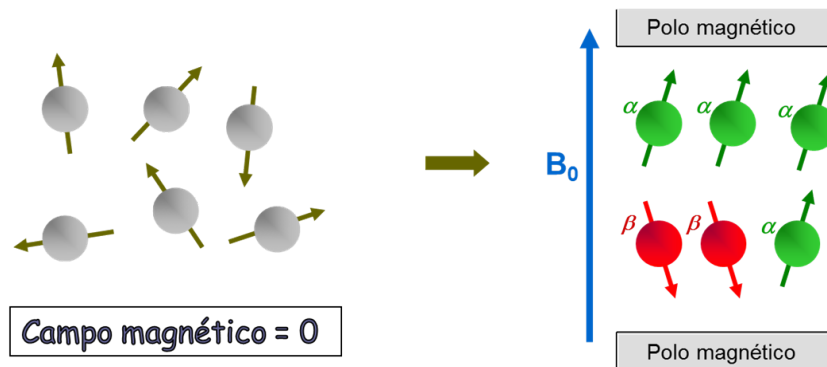


Figura 2.10: Protones reaccionando a un \vec{B} externo. [14]

A continuación se aplica sobre la muestra un fuerte campo de radiofrecuencias con la misma frecuencia a la que están precesando los protones, el resultado de aplicar justo esa misma frecuencia es que los protones entran en resonancia y ganan mucha energía alcanzado todos el nivel de energía más alto. En ese momento todos los protones están colocados en la misma dirección. Cuando se apaga esta fuente señal de RF, los espines tienden a volver a sus estados mas bajos, produciendo una pequeña cantidad de radiación a la frecuencia de Larmor asociada con ese campo. Dicha radiación es detectada en una bobina para su posterior amplificación y procesado.

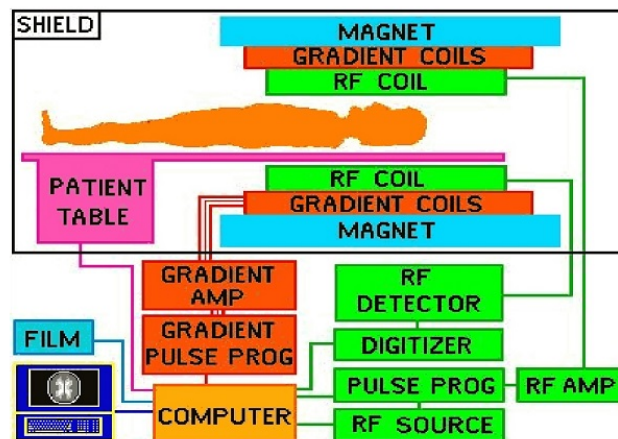


Figura 2.11: Esquema resonancia magnética. [10]

2.4.2. Ventajas y desventajas de la resonancia magnética

Ventajas

- No usa radiaciones ionizantes. Las radiaciones que se utilizan en una resonancia magnética son del rango de las radiofrecuencias < 300 GHz. Por tanto no daña la muestra que se está analizando.
- Tiene una excelente precisión. El factor giromagnético es una constante física y su valor se conoce con exactitud. También podemos medir frecuencias con gran facilidad. Por tanto mediante sensores de resonancia magnética podemos medir campos magnéticos con un error del nivel de una parte por millón (1 ppm). [20]
- Suelen utilizarse como estándares para calibrar otros sensores magnéticos como los Hall. [20]

Desventajas

- Es muy cara y compleja.
- Los estudios son más largos (15 minutos o incluso hasta una hora).
- Existe un peligro inherente al campo magnético de alto poder $1,5 - 3,0$ T, el cual puede atraer objetos metálicos o dañar instrumentos electrónicos. [4]
- Es demasiado grande y aparatosa como para usarla como un sensor magnético o una brújula.

2.5. Fluxgate

El magnetómetro fluxgate se basa en la propiedad en virtud de la cual los materiales ferromagnéticos, como el hierro o el níquel, pueden cambiar su permeabilidad magnética en presencia de un campo magnético externo. El fluxgate consiste en un núcleo de material ferromagnético que se envuelve con una bobina. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de la bobina, se genera un campo magnético que induce un cambio en la permeabilidad del núcleo. Este cambio se detecta mediante otra bobina, que se encuentra en el exterior del núcleo, y se convierte en una señal eléctrica que se puede medir y analizar.

El magnetómetro fluxgate se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde la navegación y la geofísica hasta la exploración espacial y la investigación científica. Debido a su alta sensibilidad y precisión, es especialmente útil para medir campos magnéticos débiles de entre 10^{-3} a 10^{-4} T [18]. Además, la tecnología de fluxgate es relativamente simple y económica, lo que la hace accesible para una amplia gama de usuarios y aplicaciones.

2.5.1. Principio de funcionamiento

Se coloca una bobina alrededor de un material ferromagnético blando. Dicha bobina está conectada a una **corriente alterna** I la cual satura el material en ambas polaridades. Produciendo un campo magnético oscilante. (Ley de Biot-Savart)

Si alrededor de dicho campo oscilante colocamos una segunda **bobina exterior** como consecuencia de la ley de Faraday se inducirá un voltaje que podemos medir. Dicho voltaje nos dará una señal oscilante, como por ejemplo, una onda cuadrada.

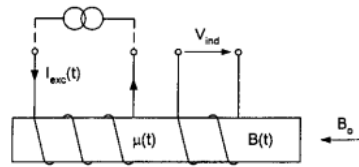
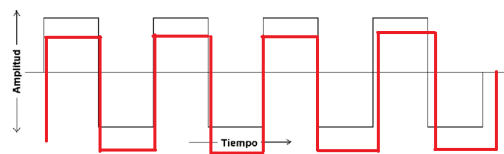


Figura 2.12: Esquema fluxgate. [18]

Si a mayores hay un campo magnético externo que afecte a la bobina detectora la señal que recibiremos será diferente a cuando no hay campo magnético externo. Si medimos la diferencia entre la señal que aplicamos y la que recibimos podemos obtener información sobre el campo magnético externo.

Figura 2.13: Señal detectada con \vec{B} y en ausencia de \vec{B}_0 .

2.5.2. Ventajas

El magnetómetro fluxgate fue inventado en 1936 por Aschennbrenner y actualmente sigue siendo muy utilizado. A pesar de no ser los dispositivos más modernos ni los más precisos, para determinadas aplicaciones en las que se requiera robustez, tienes una tecnología madura y bien establecida, bajo consumo, fácil mantenimiento y una precisión más que aceptable especialmente para campos magnéticos débiles. [16]

Por estas razones los magnetómetros fluxgate son óptimos para aplicaciones en las que se requiere un sistema robusto y confiable. Y es por eso que vamos centrarnos en ellos a partir de ahora. Estudiaremos los tipos existentes, su diseño y cómo construirlo.

Capítulo 3

Magnetómetro Fluxgate

A partir de este capítulo, tras haber explorado conceptualmente otros sensores magnéticos, nos adentraremos en el estudio exhaustivo del magnetómetro fluxgate. Abordaremos su funcionamiento real y su construcción, con el objetivo de obtener un conocimiento detallado y práctico sobre esta tecnología. Nos sumergiremos en los detalles técnicos y nos aseguraremos de comprender cómo funciona en el mundo real. A lo largo de este proceso, estaremos atentos a cualquier detalle que pueda resultar de utilidad para aplicaciones futuras.

3.1. Principios Físicos

El funcionamiento de dicho sensor se basa en el hecho de que la curva de magnetización (ciclo de histéresis) de un material ferromagnético es **no lineal**, es decir, tiene una saturación y es simétrica. La figura 3.1 ilustra el principio de funcionamiento de un sensor fluxgate. Si magnetizamos el material ferromagnético (**preferiblemente blando**) periódicamente con un campo magnético inducido \vec{H}_{ind} significativamente mayor que el campo coercitivo, en la bobina receptora obtenemos una señal que depende de la derivada de la densidad de flujo. Si saturamos el material con una onda triangular la densidad de flujo en la bobina receptora es una onda trapezoidal en la que las partes horizontales corresponden a cuando el material está en saturación. [20]

No obstante como el material es magnetizado con la misma fuerza en ambas polaridades la señal resultante es simétrica.

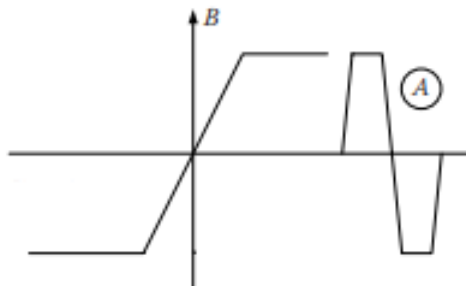


Figura 3.1: Ciclo de histéresis y señal detectada. [20]

Cuando aparece un campo magnético externo adicional \vec{H}_x éste se sumará al campo magnético producido por la bobina primaria $\vec{H}_{total} = \vec{H}_x + \vec{H}_{ind}$, produciendo que el material necesite más campo magnético para saturarse en una dirección que en la opuesta. Por tanto la curva de magnetización ya no será simétrica. Cuanto más tiempo pase el material en la zona de saturación más ancha será la zona horizontal de la curva de magnetización. Por tanto la curva de

magnetización tendrá forma de onda periódica en la cual la fase positiva y la negativa tienen anchuras diferentes como puede verse en la figura 3.2.

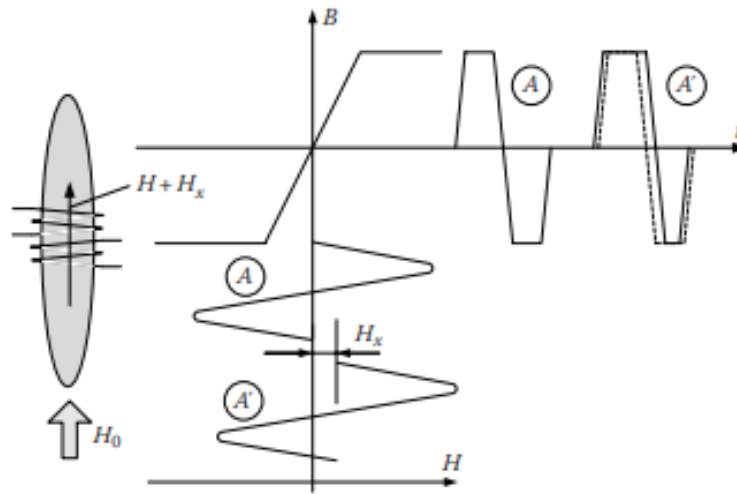


Figura 3.2: La señal resultante es asimétrica. [20]

De esta manera podemos concluir que cuanto mayor sea el campo magnético externo, la señal resultante será más **asimétrica**. Si somos capaces de cuantificar el nivel de asimetría de una onda podemos saber entonces cual es el campo magnético externo \vec{H}_x que la está afectando. Esto se hace mediante el análisis de **Fourier**.

3.1.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que convierte una función en otra (**una aplicación lineal**). Se utiliza para analizar señales periódicas y no periódicas. En particular, **la transformada de Fourier permite descomponer una señal** en sus componentes de frecuencia individuales.

$$\mathcal{F}\{f(x)\} = F(\epsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-i\epsilon x} dx \quad (3.1)$$

En términos más específicos, la transformada de Fourier toma una señal en el **dominio del tiempo** y la convierte en el **dominio de la frecuencia**. Por ejemplo si elegimos una señal compuesta por una simple onda senoidal con una frecuencia de 1Hz y le aplicamos la transformada de Fourier **la función resultante será cero en casi todos los puntos del espacio menos en $X = 1$ y donde habrá un pico**.

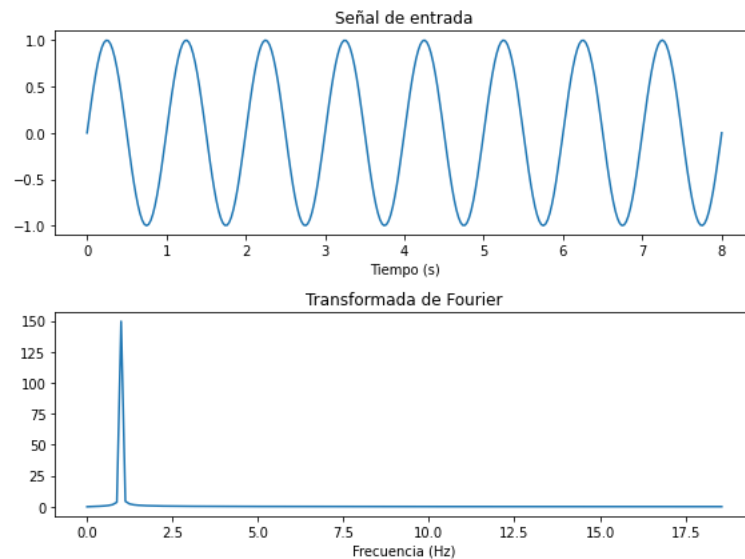


Figura 3.3: Señal y su transformada de Fourier

Si ahora la señal entrante es una onda de frecuencia 4 Hz la transformada de dicha función será parecida a la anterior solo que ahora el pico estará en $X = 4$.

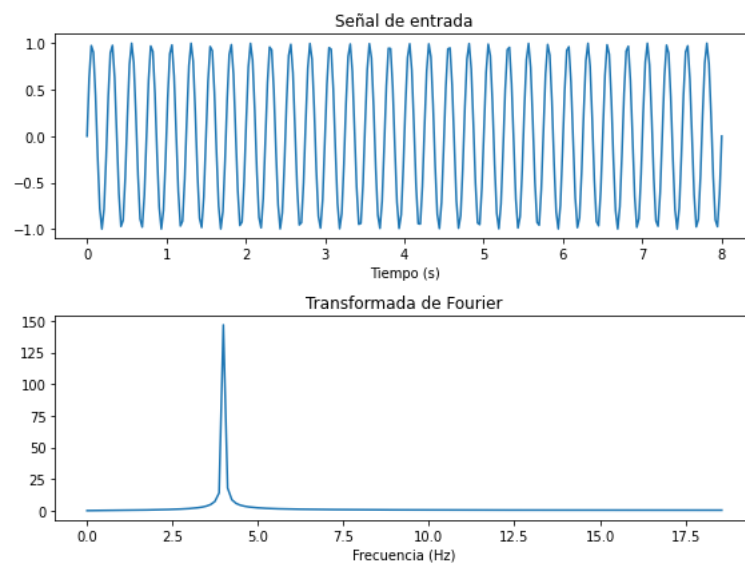


Figura 3.4: Señal y su transformada de Fourier

Una de las propiedades más importantes de la transformada de Fourier es la linealidad.

Sean f y g dos funciones reales, $\mathcal{F}\{f\}$ y $\mathcal{F}\{g\}$ sus transformadas de Fourier y a y b dos números reales. Se da que:

$$\mathcal{F}\{a \cdot f + b \cdot g\} = a \cdot \mathcal{F}\{f\} + b \cdot \mathcal{F}\{g\} \quad (3.2)$$

Es decir, la transformada de Fourier de una suma de funciones es igual a la suma de las transformadas de Fourier de dichas funciones. Gracias a la transformada de Fourier podemos descomponer una señal muy compleja en una suma de señales simples con una **frecuencia** y **amplitud** fija llamados **armónicos**.

Por ejemplo, si sumamos las señales de entrada de las Figuras 3.3 y 3.4, el resultado de la transformada de Fourier es una función con dos picos en $X = 1$ y $X = 4$. Estos picos corresponden a los armónicos de 1 Hz y 4 Hz.

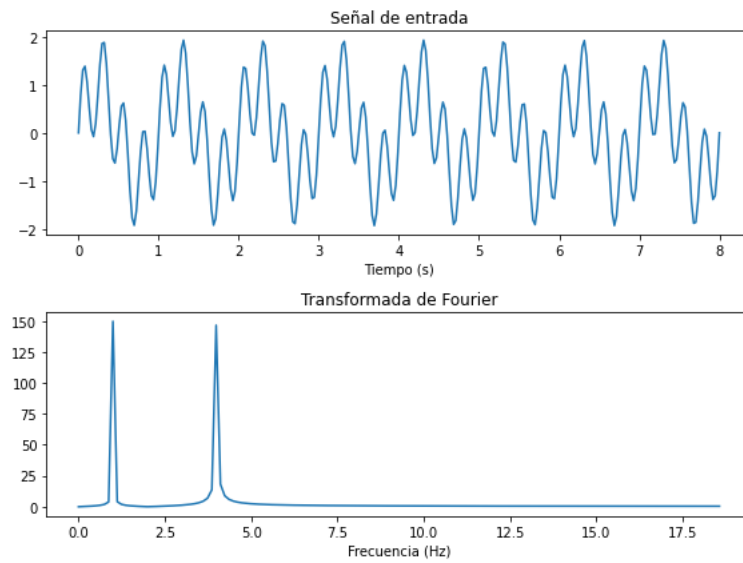


Figura 3.5: Señal y su transformada de Fourier

Por último vamos a aplicar la transformada pero ahora a la primera señal la multiplicamos por dos: $Señal = 2 \cdot Figura3,3 + Figura3,4$. De forma que la onda con frecuencia 1 Hz tenga más peso en la forma de la señal.

El resultado de la transformada de Fourier es igual que en el caso anterior salvo por el hecho de que el armónico correspondientes a la frecuencia de $1Hz$ es más alto que corresponde a los 4 Hz. Esto se produce porque el armónico de frecuencia 1 Hz influye más en la forma de la señal dado a que la **amplitud** de la onda que lo forma es mayor.

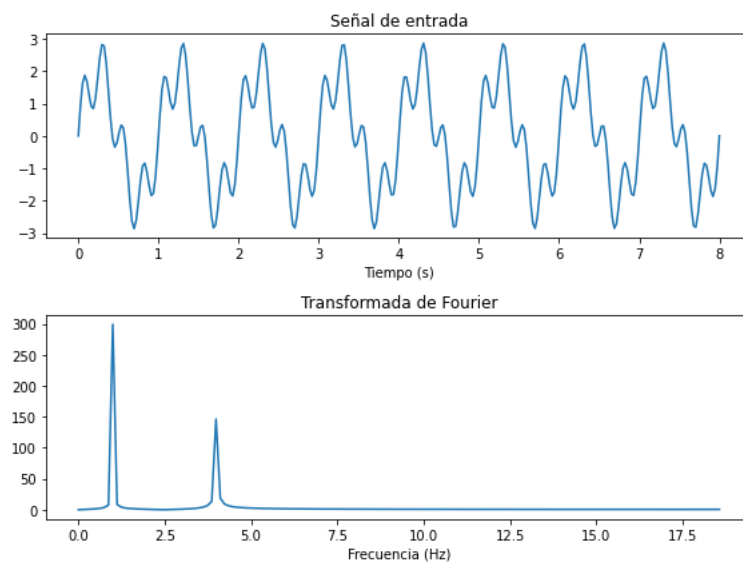


Figura 3.6: Señal y su transformada de Fourier

Esto significa que la transformada de Fourier descompone la señal en una serie de ondas

sinusoidales con diferentes frecuencias y amplitudes.

En resumen, gracias a la transformada de Fourier podemos descomponer una señal, por más compleja que esta sea, en una serie de armónicos con una frecuencia y amplitud únicos.

Los armónicos corresponden a los **picos** que aparecen en la transformada de Fourier.

3.1.2. Armónicos, simetría y asimetría

Es de sentido común, aunque no lo vamos a demostrar aquí, que una señal con simetría impar perfecta solo estará formada por una suma de armónicos que sean también impares. Es decir, estará formada únicamente por armónicos senoidales. Mientras que una señal con perfecta simetría par estará compuesta por una suma de armónicos con simetría par, es decir, estará compuesta por armónicos cosenoidales.

De esta manera podemos comprobar si una señal no es perfectamente simétrica mediante su transformada de Fourier. Si de primeras tenemos una señal cuadrada impar, su transformada de Fourier solo tendrá armónicos impares. Pero en cambio, si la función no es exactamente simétrica porque por ejemplo pasa más tiempo arriba que abajo en su transformada de Fourier entre dos armónicos impares aparecerá uno par. Dichos armónicos pares serán más grandes cuanto mayor sea la asimetría de la señal original.

En un magnetómetro fluxgate, para medir la asimetría de la señal de salida y por lo tanto medir el campo, nos centraremos solamente en el **segundo armónico**, es decir, en el primer armónico par.

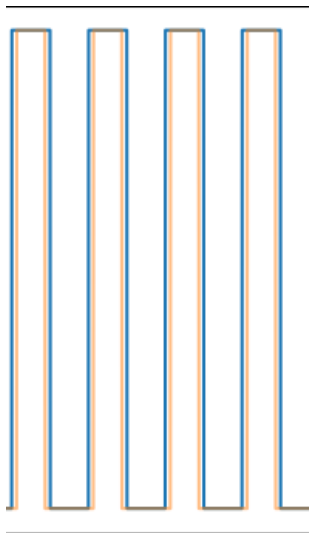


Figura 3.7: Las dos señales originales

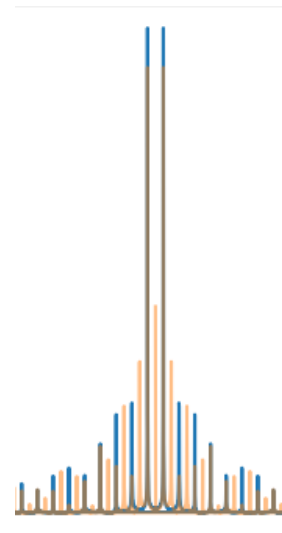


Figura 3.8: Las dos transformadas de Fourier

No obstante como puede verse en las imágenes anteriores. El resultado está muy sobrecargado de forma que puede resultar difícil de interpretar. Para solucionar esto, una posible solución es en vez de utilizar un solo ferromagnético con una bobina enrollada, utilizar dos ferromagnéticos enrollados con dos bobinas por las cuales circulan corriente en sentido opuesto. Y por último alrededor de las dos una bobina detectora.

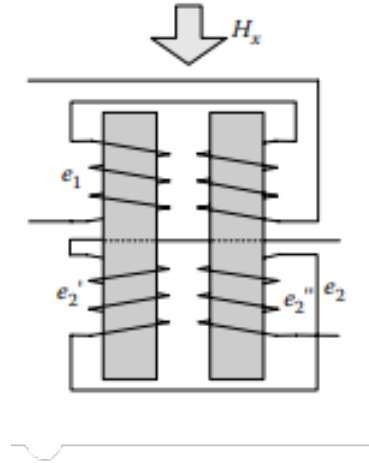


Figura 3.9: Sensor fluxgate con doble núcleo. [20]

De esta forma el campo magnético \vec{H} que inducimos en ambas bobinas se cancelan entre sí, mientras que el campo magnético externo \vec{H}_{ext} se añade al campo inducido en un núcleo mientras que en el otro núcleo el campo disminuye. El resultado de la señal en la bobina detectora es que los armónicos impares se compensan entre sí mientras que los armónicos pares se suman. De esta forma tenemos un sensor más preciso y con mayor sensibilidad. Otra ventaja es que se necesita menos potencia para magnetizar el material ferromagnético. [20]

3.1.3. Fase

Como ya sabemos el resultado de una transformada de Fourier es una **función compleja**. En las representaciones anteriores solo se ve el módulo del número complejo y hemos obviado la fase. La fase de un número complejo es un número real que toma valores entre $(-\pi, +\pi)$. Si no tuviésemos en cuenta la fase no podríamos diferenciar cuando la señal es asimétrica por pasar más tiempo en el eje positivo que por otra señal igual de asimétrica pero que pasa más tiempo en el eje negativo.

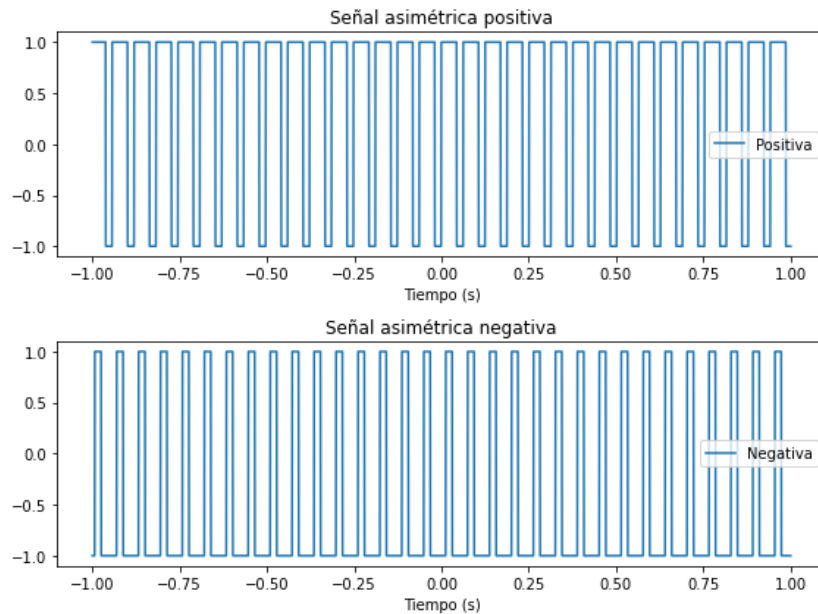


Figura 3.10: Señales asimétricas

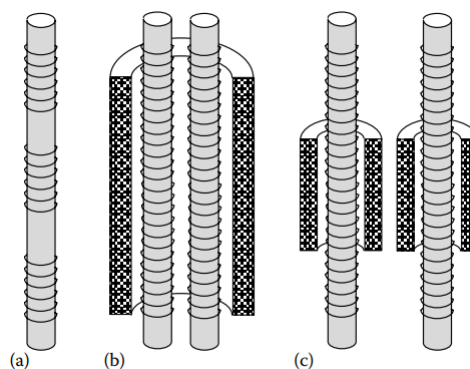
No podríamos diferenciar dos señales como las de la figura 3.10. Pero si tenemos en cuenta la fase sí dado que es de signo opuesto. Esto es una gran ventaja en el fluxgate si queremos distinguir entre la dirección Norte-Sur y la Sur-Norte. Y en general la dirección del campo.

El módulo de ambas coincide mientras que su fase no de hecho toma signo opuesto.

3.2. Modelos

3.2.1. Núcleo abierto

Los primeros diseños que presentó un sensor fluxgate son los diseños con núcleos abiertos: simple (Figura 3.11a), doble con bobina de excitación común de excitación común (figura 3.11b), o doble con bobinas de excitación separadas (Figura 3.11c).[\[20\]](#)

Figura 3.11: Sensores fluxgate con núcleos rectos. [\[20\]](#)

La gran anisotropía geométrica brinda a estos sensores de sus principales ventajas: Gran sensibilidad y resistencia contra campos perpendiculares. Los sensores de núcleo abierto también tienen desventajas: Presentan más ruido y tienen un **offset** más sensible a la temperatura y al

tiempo que los sensores con núcleo cerrado. Los núcleos abiertos son más difíciles de saturar por tanto requieren de mayor consumo eléctrico [18].

3.2.2. Núcleo en Anillo

Los sensores de núcleo cerrado pueden tener ambas bobinas enrolladas directamente en el núcleo (figura 3.12a), pero lo más conveniente es utilizar una bobina sensor externa (figura 3.12b). Debido a que un núcleo de anillo circular tiene un **factor de desmagnetización** mayor en comparación con un diseño de doble varilla, como solución de compromiso también se propuso el diseño de **pista de carreras** (oval) (figura 3.12c). Una de las ventajas del de pista de carreras es la menor sensibilidad a los campos perpendiculares siendo una especie de mezcla entre el diseño de núcleo recto y el de núcleo en anillo.

La principal ventaja del sensor de núcleo anular es que necesita mucha menos energía para llevar el núcleo magnético hasta la saturación.

El bobinado del núcleo anular suele realizarse manualmente. Para obtener unas propiedades perfectas del sensor esta bobina debe enrollarse con mucha regularidad, el sensor es muy sensible a que la bobina no esté enrollada perfectamente. Esta es la razón por la que recientemente, muchos diseñadores han intentado sustituir los sensores hechos a mano por otros fabricados a máquina. [20]

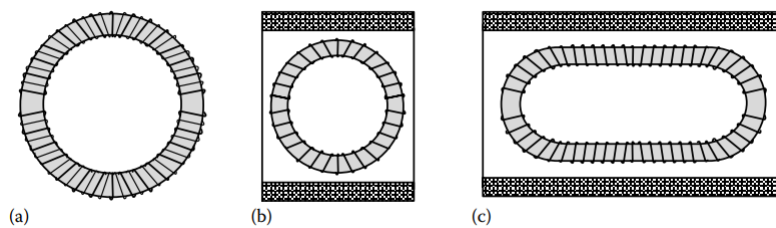


Figura 3.12: Sensores fluxgate con núcleos en anillo. [20]

3.3. Circuito eléctrico de un sensor Fluxgate.

La figura 3.13 representa un diagrama de bloques típico de un magnetómetro de segundo armónico. La frecuencia de la señal del generador se reduce a la mitad a la frecuencia $f/2$ para excitar la bobina. El circuito excitador genera la forma de onda apropiada de la señal de excitación (sinusoidal).

La señal de salida de la bobina de detección, entra al **amplificador Lock-in** (rojo) que se encarga de obtener la amplitud y la fase del segundo armónico de la señal que sale de la bobina de detección. El Lock-in, para detectar la amplitud y fase de una onda, necesita ser alimentado con otra onda con la misma frecuencia. **El segundo armónico de una onda tiene el doble de frecuencia que el primer armónico.** En este caso estamos excitando la bobina con una frecuencia de $f/2$, por lo tanto para que el Lock-in detecte el segundo armónico que tiene una frecuencia f tiene que ser alimentado con una onda de referencia de esa misma frecuencia f . [20] Finalmente la señal sale por un canal de salida.

El amplificador Lock-in está formado por un **amplificador**, un **filtro pasa banda** y un **detector de fase** (verde), que a su vez está formado por un **multiplicador** y un **filtro pasa baja**.

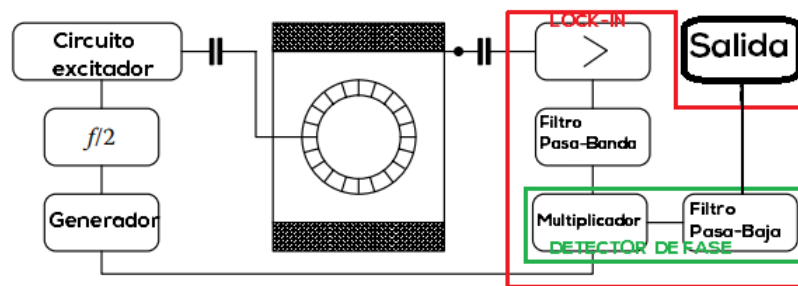


Figura 3.13: Circuito electrónico de un sensor Fluxgate. [20]

3.3.1. Compensación con Retroalimentación

Los magnetómetros fluxgate normalmente tienen una retroalimentación para alcanzar una mejor linealidad y estabilidad del dispositivo. Dado que el rango de campo magnético que pueden detectar es limitado (normalmente a $1\mu T$) [18], para detectar campos más grandes estos tienen que ser compensados mediante retroalimentación. [19]

En la figura 3.14 podemos ver el diagrama de bloques típico de un magnetómetro fluxgate con retroalimentación. El campo magnético se anula por otro campo magnético con signo opuesto con una nueva bobina llamada **bobina de compensación**, mediante una resistencia de retroalimentación o con una fuente de corriente. [19]

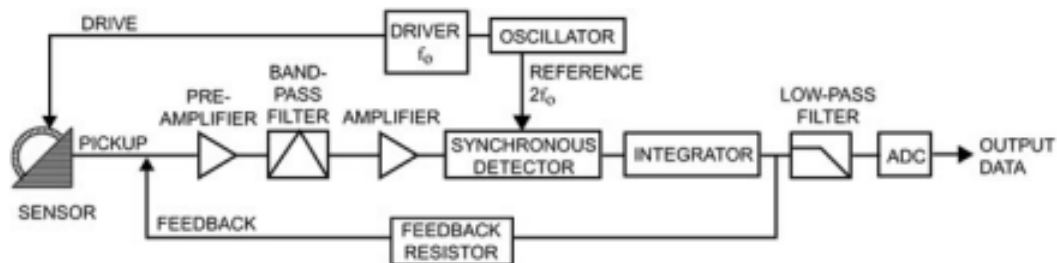


Figura 3.14: Circuito electrónico de un sensor Fluxgate con retroalimentación. [19]

3.3.2. Lock-in

El objetivo de la medición del fluxgate es obtener como de grande es el **segundo armónico** (par) en la señal de salida, esto se hace mediante un **amplificador Lock-in**.

Amplificador

La señal que llega de la bobina detectora puede ser muy débil, más aún las componentes de la señal más allá del primer armónico. Como el objetivo del **Lock-in** es detectar el segundo armónico es conveniente amplificar la señal. Este proceso puede realizarse mediante varios aparatos diferentes como un **transistor con emisor común**, un **amplificador operacional** o un **transformador elevador de tensión**. Lo importante es que es necesario amplificar la señal para poder detectar bien el segundo armónico. El problema del amplificador es que el ruido o los armónicos parásitos de la señal también son amplificados por tanto la señal debe ser filtrada como veremos a continuación.

Filtro pasa banda

Un filtro paso banda es un tipo de filtro electrónico que deja pasar un determinado rango de frecuencias de una señal y atenúa el resto. La señal que llega después del amplificador está formada por múltiples armónicos además de ruido. La función del filtro pasa banda es **eliminar el ruido y todos los armónicos excepto el que corresponde al segundo armónico (par)**.

Detector de fase

Una vez la señal de la bobina detectora ha sido amplificada y filtrada solo contendrá una sola componente de frecuencia conocida (f). Sin embargo no conocemos ni la **amplitud** ni la **fase** de dicha señal. La función del detector de fase es obtener la amplitud y fase de la señal que desconocemos valiéndose de una señal de referencia que si conocemos.

El fundamento teórico es el siguiente: Imaginemos que tenemos una señal de incógnita V_x de la que solo sabemos su frecuencia f y queremos saber cuál es su amplitud A y su fase ϕ . La podemos expresar de la siguiente manera:

$$V_x = A \sin(ft + \phi) \quad (3.3)$$

Ahora vamos a tomar dos señales de referencia conocidas $V_{r1} = \sin(ft)$ y $V_{r2} = \sin(ft + \frac{\pi}{2})$. A continuación si multiplicamos ambas señales de referencia por la señal incógnita obtendremos:

$$V_x V_{r1} = \frac{A}{2} (\cos \phi - \cos(2ft + \phi)) \quad \text{Multiplicación 1}$$

$$V_x V_{r2} = \frac{A}{2} (\cos(\phi - \frac{\pi}{2}) - \cos(2ft + \phi + \frac{\pi}{2})) \quad \text{Multiplicación 2}$$

(3.4)

El resultado de las multiplicaciones es una función cosenoidal más un término constante. El término constante produce que la función no oscile sobre el eje x sino que oscilará con una cierta altura. El valor de dicha altura se conoce con el nombre **offset**.

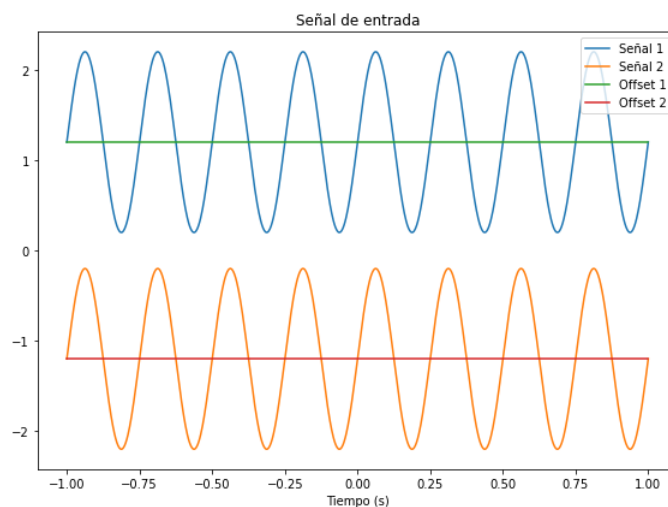


Figura 3.15: Dos ondas con un offset de 1.2 y -1.2

Si conociésemos los valores de los offsets de las dos multiplicaciones, el sistema de ecuaciones 4.7 se simplificaría a un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas: A y ϕ .

$$\begin{aligned}\text{Offset1} &= \frac{A}{2}(\cos \phi) \\ \text{Offset2} &= \frac{A}{2}(\cos(\phi - \frac{\pi}{2})) = \frac{A}{2}(\sin(\phi))\end{aligned}$$

(3.5)

Con un **filtro pasa-baja** obtenemos el offset de la señal. Un filtro pasa baja elimina las componentes de frecuencia superiores a un cierto valor. Si ajustamos este valor para que sea menor que $2f$, a la salida del filtro pasa baja la señal será una línea recta. La altura que tenga esa línea será el valor del offset.

En resumen el funcionamiento del detector de fase es el siguiente: La señal incógnita de la cual queremos saber su fase y amplitud se multiplica (por separado) y el resultado se filtra para obtener el offset. Con el valor de los offsets resolviendo el sistema 4.8 obtendremos la amplitud y fase de la señal incógnita. [3]

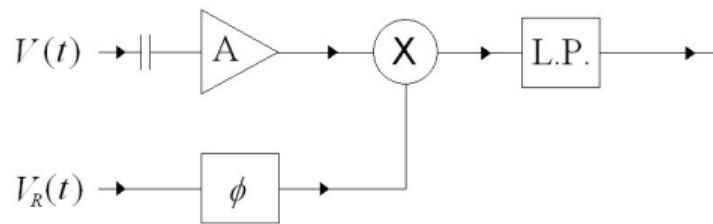


Figura 3.16: Esquema de un detector de fase. [3]

Capítulo 4

Construcción

Vamos a ver como construir un magnetómetro fluxgate de laboratorio que aunque no sirva para un uso comercial si sirva para comprobar su funcionamiento y para medir campos magnéticos como el terrestre, para caracterizar imanes o para usarlo como brújula.

Los materiales necesarios son los siguientes:

- Cinta de metal ferromagnético.
- Tubo cilíndrico.
- Cable esmaltado.
- Bobina externa (detectora).
- Osciloscopio.
- Ordenador.

4.1. Cinta ferromagnética

En la elección del material ferromagnético es muy importante tener en cuenta que tenga una **permeabilidad magnética muy alta**, debe ser homogéneo, debe ser un material ferromagnético **blando**, con baja **coercitividad**, una superficie lisa y alta **resistividad** eléctrica. [18]

Para construir este magnetómetro vamos a usar una cinta de vidrio metálico. Tras un análisis de fluorescencia de rayos X se ha determinado que la cinta utilizada es de permalloy compuesta por una aleación de hierro níquel. La alta permeabilidad de esta cinta hace que sea extremadamente sensible a campos magnéticos externos.

Este tipo de cintas son las que se usan para detectar robos por ejemplo en bibliotecas. La cinta magnética se pega en el libro. Los arcos que hay en la entrada de la biblioteca contienen por lo menos una antena que emite campo magnético y otra que lo detecta (parecido a un fluxgate). Si la antena detectora recibe que la señal es diferente por la presencia de una cinta magnética se activa la alarma antirrobo. [2]

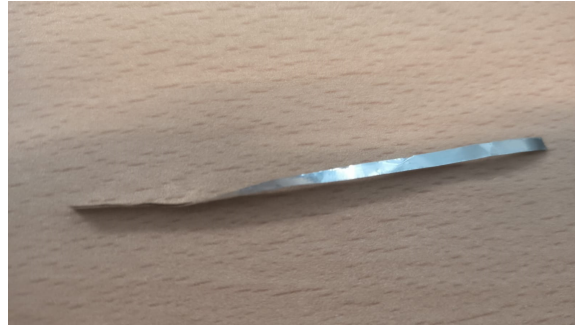


Figura 4.1: Cinta ferromagnética.

4.2. Tubo de plástico

La función del tubo hueco de metacrilato es poder enrollar alrededor del mismo un cable de cobre esmaltado y dentro del mismo colocar la cinta de vidrio.

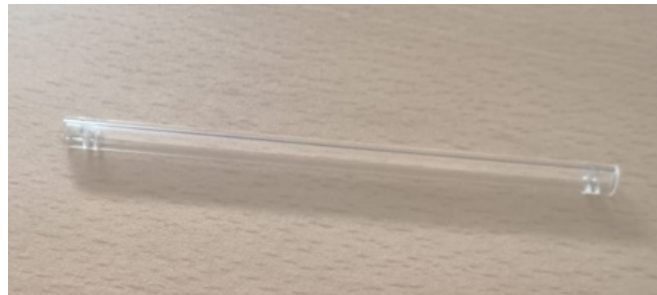


Figura 4.2: Tubo de cristal.

4.3. Cable esmaltado

El cable se enrolla alrededor el tubo para formar la bobina de excitación. El cable está esmaltado para que no haga contacto consigo mismo. En la imagen 5.3 la bobina tienen 220 vueltas. $N \approx 220$. Y una longitud de diez centímetros. $l \approx 10$ cm. El cable se conecta un generador de corriente que producirá la señal de excitación.



Figura 4.3: Bobina de excitación.

4.4. Bobina detectora

A continuación se introduce la bobina de excitación dentro de otra bobina externa. Esta bobina será la encargada de detectar el campo magnético producido por la primera bobina más el campo externo que exista. Al igual que la bobina de excitación también tiene un cable esmaltado para evitar contactos. El cable alrededor de la bobina detectora se conecta a un osciloscopio para analizar la señal de la bobina detectora. También se puede conectar a cualquier dispositivo que analice señales por ejemplo se puede conectar a la tarjeta de sonido de un ordenador.

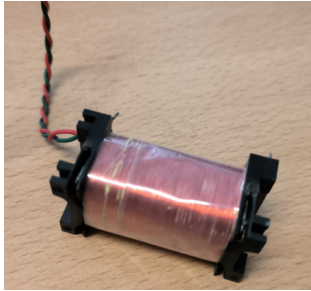


Figura 4.4: Bobina detectora.

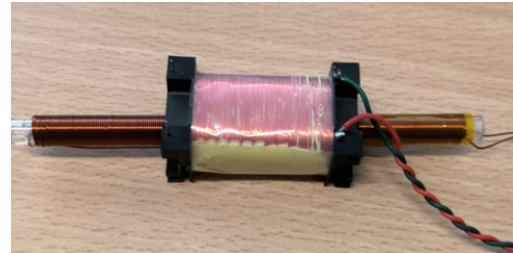


Figura 4.5: Montaje del fluxgate.

4.5. Generador

Está conectado a la bobina de excitación y puede introducir en la misma señales de corriente alterna de diferente **amplitud**, **frecuencia** y forma. También puede introducir una componente continua (un **offset**) a la señal de entrada. Esto como se verá más adelante es útil para por ejemplo calcular el campo magnético de la tierra. Introducir un offset puede verse como añadir al sistema un campo magnético artificial. Según la ley de Biot y Savart aplicada a una bobina de N vueltas y longitud L el módulo del campo magnético dentro de la bobina es:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad (4.1)$$

Es fundamental elegir la **frecuencia a utilizar**. Esto es así debido a que el equipo que se va a utilizar está conectado a la red eléctrica y ésta es una fuente de ruido electromagnético considerable ya que en una instalación eléctrica, nunca se va a encontrar una señal pura de, en el caso de Europa, 50 Hz. Por el contrario, la señal va a presentar armónicos de esa frecuencia debido a todos los dispositivos que están conectados a la misma instalación eléctrica. La magnitud de esta perturbación es la **Tasa de Distorsión Armónica** y, por lo general, no es superior al 2% [8] [5].

Por lo tanto, hay que escoger una frecuencia que no coincida con ningún armónico de la red y que el armónico en común más bajo entre dicha frecuencia y la frecuencia fundamental de la red sea muy grande, es decir, que su mínimo común múltiplo sea un valor alejado de la frecuencia utilizada. Para este montaje se ha utilizado una frecuencia de 500 Hz y de 1000 Hz según la medida.

También es fundamental elegir la mejor **amplitud** para hacer medidas. Lo veremos más adelante.

4.6. Osciloscopio

Está conectado a la bobina detectora. Tiene una pantalla con la que se puede analizar la señal de salida del fluxgate. El osciloscopio tiene una función que hace la transformada de Fourier de manera automática y la muestra por pantalla de manera que se puede tener en la misma pantalla la señal de salida y su transformada de Fourier. El osciloscopio se puede conectar al ordenador para guardar los datos en un fichero excel o hacer una captura de la pantalla del osciloscopio como en la figura 4.6.

En la gráfica de color morado (transformada de Fourier) podemos ver los picos correspondientes a los armónicos de la señal de color amarillo.

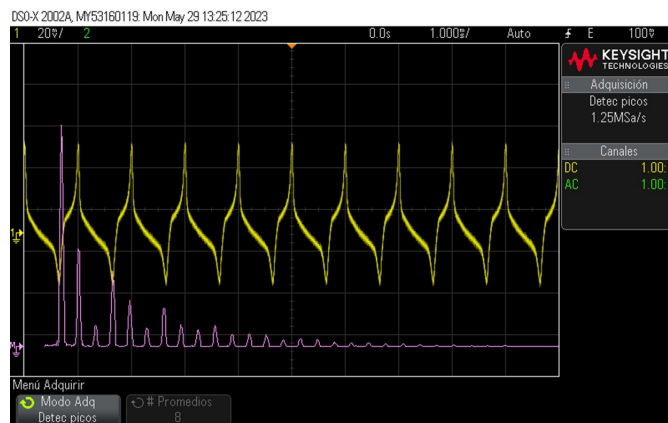


Figura 4.6: Amarillo señal de salida y morada es la transformada de Fourier.

4.7. Ordenador

Sirve para leer los datos del osciloscopio o puede funcionar también como osciloscopio en si mismo de la siguiente forma. Conectamos los cables de la bobina detectora a la tarjeta de sonido del ordenador como si fuese un micrófono e instalamos una aplicación como **Soundcard Oscilloscope** [22]. Una diferencia importante con el osciloscopio normal es que solo sirve para ver la forma de la señal de salida pero no puede medir la tensión de la señal, es decir, no podemos medir el voltaje de la señal. Otra diferencia es que el ordenador transmite una componente continua a la bobina, para solucionar esto se puede añadir un condensador.

Por supuesto esta aplicación también hace la transformada de Fourier de forma automática como se ve en la Figura 4.7. Además podemos comprobar como el primer armónico (primer pico) está en los 1000 Hz y el segundo armónico (segundo pico) está al doble de frecuencia en 2000 Hz.

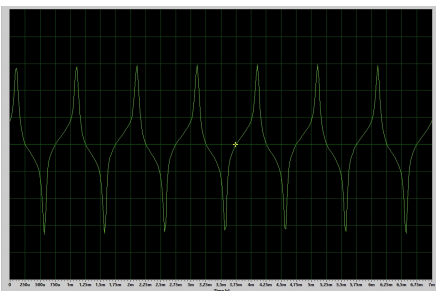


Figura 4.7: Señal de salida.

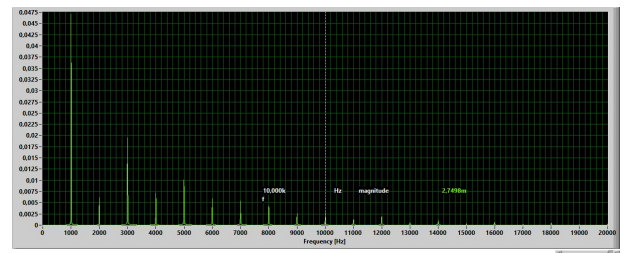


Figura 4.8: Transformada de Fourier.

4.8. Circuito

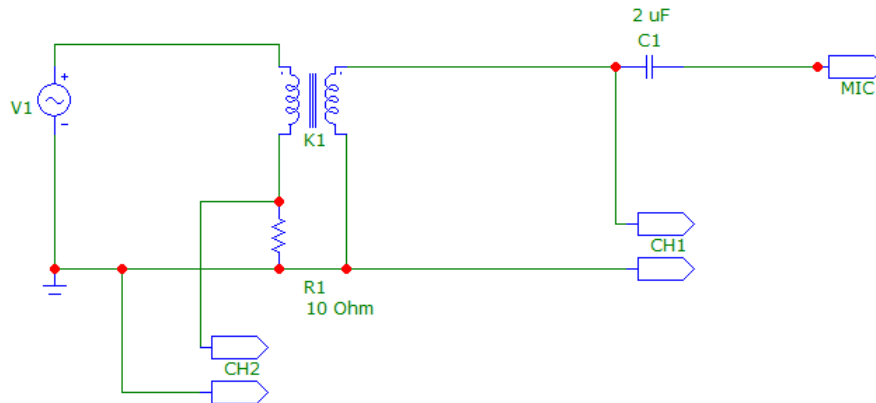


Figura 4.9:

Como puede verse en la Figura 4.9 el circuito está compuesto por un generador de corriente alterna más continua (**AC + DC**), conectado a una bobina (bobina de excitación) y a una resistencia (10 ohmios). Si conectamos a ambos lados de la resistencia un osciloscopio (Canal 2) podremos medir la intensidad de corriente a lo largo de la bobina.

La bobina de excitación produce una señal en la bobina detectora que podemos analizar mediante el canal 1 del osciloscopio. También se puede analizar la señal conectándola al micrófono del ordenador. El ordenador con la idea de alimentar el micrófono envía una señal continua por el cable del micrófono. Para que esta señal no interfiera en nuestro circuito colocamos un condensador de 2 microfaradios.

Capítulo 5

Medidas experimentales

Para comprobar que el fluxgate funciona podemos orientarlo de diferentes maneras para observar como cambia la señal de salida y en especial su segundo armónico.

Si colocamos el fluxgate en dirección Norte-Sur o en la dirección Sur-Norte la amplitud del segundo armónico será máxima mientras que si la dirección es Este-Oeste o Oeste-Este la amplitud del segundo armónico es cero. Por último si la situación es intermedia entre las dos anteriores el segundo armónico tendrá también una amplitud intermedia.

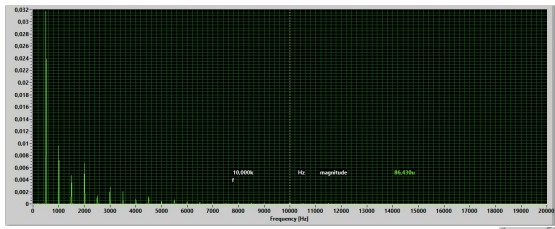


Figura 5.1: Situación con campo máximo.

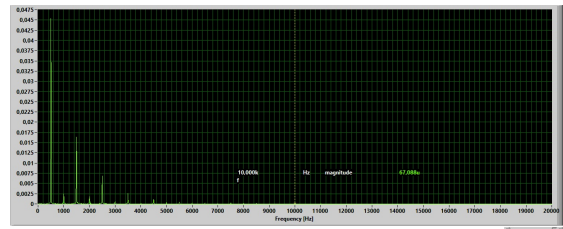


Figura 5.2: Situación con campo mínimo.

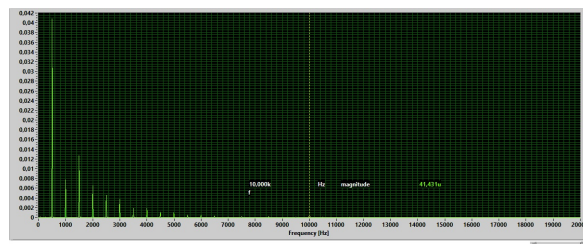


Figura 5.3: Situación intermedia

5.1. Elección Amplitud

Existe una amplitud de entrada óptima para realizar mediciones. Si la amplitud de entrada es muy pequeña en comparación con el campo \vec{B} el fluxgate será más preciso pues con pequeñas variaciones del campo externo \vec{B} el tamaño del segundo armónico también variara mucho. No obstante la amplitud tiene que ser lo suficientemente grande como para que el segundo armónico se distinga para poder medir.

Para encontrar la amplitud óptima es conveniente hacer los siguiente: **Para cada amplitud** aplicar un campo magnético externo ya conocido y medir como de grande es el segundo armónico.

Seguidamente aplicar otro campo magnético conocido y comprobar cuanto cambia el tamaño del segundo armónico. Por último podemos hacer una gráfica en la que se pueda visualizar cuanto cambia el segundo armónico en función del campo externo aplicado. Por ejemplo para una amplitud de 700 mV el resultado es el de la figura 5.4.

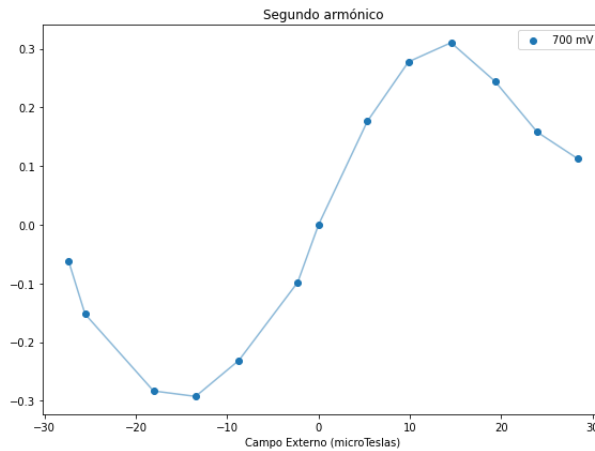


Figura 5.4: Variación 2^o armónico con 700 mv de amplitud

Para introducir un campo magnético externo podemos aprovecharnos de la **Ley de Biot y Savart** (ecuación 4.1). Un **offset** de intensidad conocida en la señal de entrada es equivalente a un campo magnético externo.

Es muy importante tener en cuenta que el fluxgate es muy sensible por lo tanto cualquier otro campo externo como el campo terrestre o la presencia de imanes estropeará el resultado.

Para anular el campo magnético terrestre hay que colocar la bobina en dirección E-W o W-E. También hay que asegurarse de que no haya imanes o corrientes cerca de la medición.

He probado con amplitudes de 300 mV, 400 mV, 500 mV, 600 mV, 700 mV y 800 mV. El resultado es el siguiente:

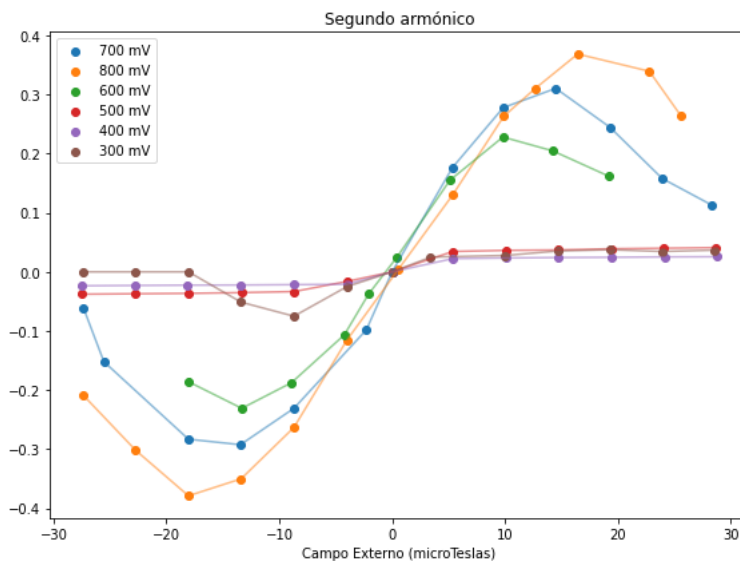


Figura 5.5: Variación 2^o armónico con el campo

Como se puede ver en la Figura 5.5 con 700 mV la pendiente es mayor por tanto será la amplitud óptima para realizar mediciones. Pues será más sensible para detectar campos magnéticos cerca del 0. En cambio, si lo que queremos es utilizar el fluxgate como una brújula necesitamos que la zona lineal sea lo más ancha posible. Esta situación se da cuando la amplitud es de la misma magnitud que el campo terrestre.

5.2. Campo Magnético terrestre

El método para obtener el campo magnético terrestre es el siguiente:

- Introducimos en la bobina de excitación una señal con frecuencia de 500 Hz y amplitud de 700 mV
- Orientamos el fluxgate de forma que el segundo armónico sea máximo. (N-S o S-N).
- Seguidamente aplicamos una corriente continua en la bobina que cancele el segundo armónico.
- Si conocemos el número de vueltas por unidad de longitud de la bobina de excitación y la corriente continua que hemos aplicado, mediante la Ley de Biot y Savart podemos sacar el campo magnético terrestre.

El resultado es el siguiente:

Para cancelar el campo terrestre hubo que inyectar una corriente continua de 10,54 mA en la bobina con una longitud de 0,096 m y 220 vueltas.

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{220}{0,096} 10,54 \approx 30,3 \mu T \quad (5.1)$$

El resultado es una buena aproximación teniendo en cuenta que el campo magnético terrestre varía entre $25 \mu T$ y $65 \mu T$.

Capítulo 6

Conclusiones

Después del estudio bibliográfico y de la puesta en práctica mediante la construcción de un magnetómetro fluxgate las conclusiones a las que llego son las siguientes:

- Alta sensibilidad y precisión: El fluxgate es capaz de medir campos con elevada precisión. Por ejemplo era capaz de detectar un imán presente en la misma habitación a más de 5 metros. Con un pequeño cambio en la orientación del fluxgate se podía detectar el cambio del campo terrestre.
- Estabilidad y robustez: El fluxgate tiene bastante fiabilidad en los resultados que daba. Nunca dio resultados extraños ni hubo que cambiar ninguna pieza porque algo se estropease. Al repetir dos mediciones los resultados siempre eran muy parecidos.
- Amplio rango de medición: Especialmente si tenemos la posibilidad de cambiar la amplitud de entrada.
- Fundamento teórico bien asentado: La ley de Ampère, la ley de Faraday, el ferromagnetismo y la transformada de Fourier es conocimiento teórico descubierto desde hace más de cien años y permite entender el funcionamiento de un fluxgate.
- Costo: Comparados con algunos otros tipos de magnetómetros, los fluxgate pueden ser menos costosos.
- Aplicaciones: Como hemos visto antes puede ser utilizado como medidor de campo, como brújula, como medidor de posición, de velocidad, incluso para la detección de robos.
- Gran cantidad de posibilidades: Dependiendo de la finalidad o de la complejidad que se esté dispuesto a asumir la construcción del fluxgate podría haber sido muy diferente. En este trabajo se ha optado por un fluxgate de una sola varilla pero las opciones son muchas: Doble varilla, anillo, pista de carreras, bobina de retroalimentación, que midiese el campo en tres dimensiones. También se podría haber optado por incluir un Lock-in digital o uno analógico. Se podría haber incluido un controlador para detectar el campo como si fuese un dispositivo comercial. Incluso se podría haber construido un fluxgate más simple formado por solo dos bobinas ambas conectadas al ordenador y que este fuese el encargado de generar la señal y de analizarla.

Con esto quiero decir que la forma de abordar este trabajo es muy diversa y permite muchas opciones y grados de dificultad y complejidad.

Bibliografía

- [1] A.B., P. *Magnetoresistance un Metals*, vol. 3. Cambridge University Press, 1989. <https://books.google.es/books?id=D5XHMARd2ocC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- [2] AMSLER, S., AND SHEA, S. Rfid (radio frequency identification), Junio 2021. Último acceso 21 de junio de 2023, <https://www.techtarget.com/iotagenda/definicion/RFID-radio-frequency-identification>.
- [3] ARMEN, D. B. *Phase sensitive detection: the lock-in amplifier*. PhD thesis, University of Tennessee, 2008.
- [4] DE ASOCIACIÓN SALVADOREÑA DE RADIOLOGÍA ULTRASÓNICA E IMÁGENES DIAGNÓSTICAS. Ventajas y desventajas de la resonancia magnética, 2015. Último acceso 21 de junio de 2023.
- [5] DE LOYOLA CHACARTEGUI ROJO, I. Diseño y construcción de un magnetómetro de muestra vibrante, 2019. Trabajo Fin de Grado.
- [6] DESIGN, S. Magnetoresistive sensor: Everything you need to know about, 2022. Último acceso 21 de junio de 2023, <https://www.smlease.com/entries/automation/magnetoresistive-sensor/>.
- [7] ENGINEERING, E. Hall effect, 2021. Último acceso 21 de junio de 2023, https://www.youtube.com/watch?v=iPU_pzrg4UE&ab_channel=EdorealEngineering.
- [8] GANIYU, A., AND ADEDAPO, O. Effects of total harmonic distortion on power system equipment. *Journal of Innovative Systems Design and Engineering* 6, (5) (2015), 114–120. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definicion/RFID-radio-frequency-identification>.
- [9] GANIYU, A., AND ADEDAPO, O. Theory of electromagnetism and gravity—modeling earth as a rotating solenoid coil. *Journal of High Energy Physics Gravitation and Cosmology* 03, (04) (2017), 663–692. https://www.researchgate.net/publication/320499231_Theory_of_Electromagnetism_and_Gravity_-_Modeling_Earth_as_a_Rotating_Solenoid_Coil.
- [10] HRISHIKESAN, S. Magnetic resonance imaging (mri) scan test, 2018. Último acceso 21 de junio de 2023, <https://www.electronicsandcommunications.com/2018/10/magnetic-resonance-imaging-mri-scan-test.html>.
- [11] L.ROY, T. Precession. the alignment of nuclei with an applied magnetic field, 2023. Último acceso 21 de junio de 2023, https://www.researchgate.net/figure/Precession-The-alignment-of-nuclei-with-an-applied-magnetic-field-is-not-stagnant_fig1_323758452.

-
- [12] MAGNETISMO.NET. ¿qué es el ferromagnetismo y cómo funciona? guía completa, feb 2020. Último acceso 10 de abril de 2023.
- [13] MAXWELL, J. C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. 1. Clarendon Press, 1881. https://www.google.es/books/edition/A_Treatise_on_Electricity_and_Magnetism/9aANAAAAQAAJ?hl=en&gbpv=0.
- [14] MEDIC, D. Magnetic resonance imaging (mri), 2019. Último acceso 21 de junio de 2023, https://www.youtube.com/watch?v=8bfJM6B3X6w&ab_channel=DRMEDIC.
- [15] MELEXIS. What is the hall-effect?, 2023. Último acceso 21 de junio de 2023, <https://www.melexis.com/en/tech-talks/hall-effect>.
- [16] MUSMANN, G. *Fluxgate Magnetometers for Space Research*. Norderstedt: Books on Demand, 2010.
- [17] POLO, S. R. Magnetoresistance in iron single crystals. *Journal of Applied Physics* 37, 3 (Marzo 1966), 1028–1029.
- [18] RIPKA, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Artech House, 2001.
- [19] SHEIKH. *Hight Sensitivity Magnetometers*, vol. 19. Springer, 2017.
- [20] TUMANSKI, S. *Handbook of Magnetic Measurements*. CRC Press, 2011.
- [21] W.GÖPEL, J.HESSE, J. N. *Sensors: A Comprehensive Survey*, vol. 8. VCH, 1995. https://books.google.es/books/about/Sensors.html?id=2Fj1nQEACAAJ&redir_esc=y.
- [22] ZEITNITZ, C. Soundcard oscilloscope, 2023. Último acceso 21 de junio de 2023, https://www.zeitnitz.eu/scope_en.

Anexo

2º armónico	1º armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2º/1º	B (μT)
0,0045	-0,0215	-95,93	-9,593	-0,209302326	-27,34105415
0,008	-0,0265	-79,72	-7,972	-0,301886792	-22,72103447
0,0125	-0,033	-63,33	-6,333	-0,378787879	-18,04971291
0,014	-0,04	-46,95	-4,695	-0,35	-13,38124145
0,0125	-0,0475	-30,53	-3,053	-0,263157895	-8,701369574
0,003	-0,026	-14,05	-1,405	-0,115384615	-4,004397069
0,0002	0,055	1,86	0,186	0,003636364	0,53011947
0,007	0,054	18,77	1,877	0,12962963	5,349646476
0,0125	0,0475	34,72	3,472	0,263157895	9,895563433
0,0135	0,0435	44,55	4,455	0,310344828	12,69721633
0,014	0,038	57,71	5,771	0,368421053	16,44795408
0,0095	0,028	80	8	0,339285714	22,8008374
0,0065	0,0245	89,63	8,963	0,265306122	25,54548821

Tabla 6.1: Tabla amplitud 800 mV.

2º armónico	1º armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2º/1º	B (μT)
0.001	-0.0162	-95.93	-9.593	-0.06173	-27,34105415
0.003	-0.01975	-89.63	-8.963	-0.1519	-25,54548821
0.0075	-0.0265	-63.33	-6.333	-0.28302	-18,04971291
0.0095	-0.0325	-47.17	-4.717	-0.29231	-13,44394375
0.009	-0.039	-30.53	-3.053	-0.23077	-8,701369574
0.005	-0.051	-8	-0.8	-0.09804	-2,28008374
0	0.045	1.66	0	0	0
0.0075	0.0425	18.77	1.877	0.17647	5,349646476
0.01	0.036	34.56	3.456	0.277778	9,849961758
0.009	0.029	50.9	5.09	0.31034	14,5070328
0.0055	0.0225	67.77	6.777	0.24444	19,31515939
0.003	0.019	84	8.4	0.15789	23,94087927
0.002	0.01775	99.5	9.95	0.11268	28,35854152

Tabla 6.2: Tabla amplitud 700 mV.

2º armónico	1º armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2º/1º	B (μT)
0,004	-0,0215	-63,24	-6,324	-0,186046512	-18,02406197
0,006	-0,026	-46,75	-4,675	-0,230769231	-13,32423936
0,006	-0,032	-31,3	-3,13	-0,1875	-8,920827634
0,004	-0,0375	-14,88	-1,488	-0,106666667	-4,240955757
0,0015	-0,04	-7,3	-0,73	-0,0375	-2,080576413
0,001	0,04	1,52	0,152	0,025	0,433215911
0,0055	0,0355	17,97	1,797	0,154929577	5,121638102
0,0065	0,0285	34,47	3,447	0,228070175	9,824310816
0,0045	0,022	50	5	0,204545455	14,25052338
0,003	0,0185	67,23	6,723	0,162162162	19,16125373

Tabla 6.3: Tabla amplitud 600 mV.

2º armónico	1º armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2º/1º	B (μT)
0,0004	-0,0106	-96,42	-9,642	-0,037735849	-27,48070928
0,0004	-0,0108	-79,93	-7,993	-0,037037037	-22,78088667
0,0004	-0,011	-63,4	-6,34	-0,036363636	-18,06966364
0,0004	-0,0114	-46,89	-4,689	-0,035087719	-13,36414082
0,0004	-0,012	-30,44	-3,044	-0,033333333	-8,675718632
0,0002	-0,0124	-14,05	-1,405	-0,016129032	-4,004397069
0	0,0126	2,32	0	0	0
0,0004	0,0116	18,86	1,886	0,034482759	5,375297418
0,0004	0,011	35,25	3,525	0,036363636	10,04661898
0,0004	0,0108	51,75	5,175	0,037037037	14,7492917
0,0004	0,01025	68,14	6,814	0,03902439	19,42061326
0,0004	0,01	84,46	8,446	0,04	24,07198409
0,0004	0,00975	100,78	10,078	0,041025641	28,72335492

Tabla 6.4: Tabla amplitud 500 mV.

2º armónico	1º armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2º/1º	B (μT)
0,0002	-0,0085	-96,33	-9,633	-0,023529412	-27,45505834
0,0002	-0,0087	-79,9	-7,99	-0,022988506	-22,77233636
0,0002	-0,0089	-63,54	-6,354	-0,02247191	-18,10956511
0,0002	-0,009	-47	-4,7	-0,022222222	-13,39549197
0,0002	-0,00925	-30,63	-3,063	-0,021621622	-8,729870621
0,0002	-0,0095	-14,05	-1,405	-0,021052632	-4,004397069
0	0,0091	2,5	0	0	0
0,0002	0,0089	18,94	1,894	0,02247191	5,398098255
0,0002	0,0085	35,37	3,537	0,023529412	10,08082024
0,0002	0,00825	51,81	5,181	0,024242424	14,76639232
0,0002	0,0081	68,25	6,825	0,024691358	19,45196441
0,0002	0,0079	84,68	8,468	0,025316456	24,13468639
0,0002	0,0078	100,94	10,094	0,025641026	28,76895659

Tabla 6.5: Tabla amplitud 400 mV.

2 ^o armónico	1 ^o armónico	Offset (mV)	Intensidad (mA)	2 ^o /1 ^o	B (μT)
0	0	-95,93	-9,593	0	-27,34105415
0	0	-79,72	-7,972	0	-22,72103447
0	-0,0095	-63,33	-6,333	0	-18,04971291
0,0005	-0,00975	-46,95	-4,695	-0,051282051	-13,38124145
0,00075	-0,01	-30,53	-3,053	-0,075	-8,701369574
0,00025	-0,01	-14,05	-1,405	-0,025	-4,004397069
0	1	2,34	0	0	0
0,00025	0,01	12	1,2	0,025	3,420125611
0,00025	0,009	35,24	3,524	0,027777778	10,04376888
0,0003	0,0085	51,53	5,153	0,035294118	14,68658939
0,0003	0,008	67,77	6,777	0,0375	19,31515939
0,00025	0,00725	84	8,4	0,034482759	23,94087927
0,00025	0,0068	100,11	10,011	0,036764706	28,53239791

Tabla 6.6: Tabla amplitud 300 mV.

Índice de figuras

2.1. Estructura básica de una bobina. 20	7
2.2. Campo magnético con núcleo y sin él. 9	7
2.3. Efecto Hall. 15	8
2.4. Los electrones fluyen en línea recta. 7	9
2.5. La fuerza de Lorentz empuja a los electrones. 7	10
2.6. 20	10
2.7. Medida de la resistencia del conductor. 6	11
2.8. Momento magnético de un protón. 11	12
2.9. Precesión del momento magnético. 20	12
2.10. Protones reaccionando a un \vec{B} externo. 14	13
2.11. Esquema resonancia magnética. 10	13
2.12. Esquema fluxgate. 18	15
2.13. Señal detectada con \vec{B} y en ausencia de \vec{B} .	15
3.1. Ciclo de histéresis y señal detectada. 20	16
3.2. La señal resultante es asimétrica. 20	17
3.3. Señal y su transformada de Fourier	18
3.4. Señal y su transformada de Fourier	18
3.5. Señal y su transformada de Fourier	19
3.6. Señal y su transformada de Fourier	19
3.7. Las dos señales originales	20
3.8. Las dos transformadas de Fourier	20
3.9. Sensor fluxgate con doble núcleo. 20	21
3.10. Señales asimétricas	22
3.11. Sensores fluxgate con núcleos rectos. 20	22
3.12. Sensores fluxgate con núcleos en anillo. 20	23
3.13. Circuito electrónico de un sensor Fluxgate. 20	24
3.14. Circuito electrónico de un sensor Fluxgate con retroalimentación. 19	24
3.15. Dos ondas con un offset de 1.2 y -1.2	25
3.16. Esquema de un detector de fase. 3	26
4.1. Cinta ferromagnética.	28
4.2. Tubo de cristal.	28
4.3. Bobina de excitación.	28
4.4. Bobina detectora.	29
4.5. Montaje del fluxgate.	29
4.6. Amarillo señal de salida y morada es la transformada de Fourier.	30
4.7. Señal de salida.	30
4.8. Transformada de Fourier.	30
4.9.	31
5.1. Situación con campo máximo.	32

5.2. Situación con campo mínimo.	32
5.3. Situación intermedia	32
5.4. Variación 2 ^o armónico con 700 mv de amplitud	33
5.5. Variación 2 ^o armónico con el campo	33