

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Medida del campo magnético terrestre mediante un sensor magnético integrado”

Curso 2015/2016

**Alumno/a:**

Manuel José Soler Ortiz

**Director/es:**

Jose Antonio Gázquez Parra  
Nuria Novas Castellano





TRABAJO FIN DE GRADO  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL



Medida del campo magnético terrestre mediante un  
sensor magnético integrado.

Por **Manuel José Soler Ortiz**

**Director**

**Codirector**

**Autor**

Dr. Jose Antonio Gázquez Parra

Dra. Nuria Novas Castellano

Manuel José Soler Ortiz



# Agradecimientos

---

En primer lugar, tengo que agradecer a Carmen Ruiz Peña, mi novia, su incansable apoyo y positividad. Por compartir conmigo los momentos buenos, y por aguantarme en los malos. Ella es la motivación que me ha llevado hasta aquí, y eso es algo que nunca podré agradecerle lo suficiente.

A Jose Antonio Gázquez Parra y Nuria Novas Castellano, tutores de este proyecto, por toda la atención que me han dedicado y por haberme guiado con mano firme hacia un trabajo bien hecho, así como por todos los conocimientos que me han transmitido.

A Rosa María García Salvador, profesora del Área de Tecnología Electrónica, por compartir conmigo sus experiencias en el campo de la realización de trabajos y artículos publicados, y haber estado ahí para ayudarme cuando ha hecho falta.

Al resto de profesores de la Universidad de Almería a cuyas clases he tenido el placer de atender, porque este Trabajo Fin de Grado es sólo la última muestra de todo lo que me han enseñado.

A mi padre, por animarme a tomar una segunda oportunidad. A mis hermanos, por preocuparse de que nunca me falte una sonrisa y buen humor. A mi madre, por encender en mí la curiosidad y el amor por la ciencia.

Y por último, pero no menos importante, a todos los compañeros y amigos con los que he tenido el placer de compartir curso. No hay mejor forma de aprender que estando bien acompañado.

Y en definitiva, a todos los que recuerdo y aún más a los que he olvidado. Este proyecto no sería una realidad si no fuera por toda la gente que ha compartido conmigo este tiempo. De todo corazón, gracias.

# Siglas y Acrónimos

---

<b>AMR</b>	Anisotropic Magneto Resistance.
<b>CC</b>	Corriente Continua.
<b>ELF</b>	Extreme Low Frequency.
<b>SQUID</b>	Superconducting Quantum Interference Device.
<b>TFG</b>	Trabajo Fin de Grado.
<b>%FS</b>	% de fondo de escala.
<b>A</b>	Amperio.
<b>B</b>	Campo magnético.
<b>C<sub>D1-</sub>, C<sub>D2-</sub>, C<sub>D3-</sub>, C<sub>D4-</sub></b>	Condensadores de desacoplo del LM79L05.
<b>C<sub>D1+</sub>, C<sub>D2+</sub>, C<sub>D3+</sub>, C<sub>D4+</sub></b>	Condensadores de desacoplo del LM78L05.
<b>C<sub>RS</sub></b>	Condensador que se carga a $V_{alim+}$ o $V_{alim-}$ causando set o reset.
<b>dv</b>	desviación de tensión máxima.
<b>E</b>	Campo eléctrico.
<b>F</b>	Faradio.
<b>f</b>	Fuerza.
<b>g</b>	Ganancia del INA128.
<b>G</b>	Gauss.
<b>Hz</b>	Herzio.
<b>I<sub>Q</sub></b>	Corriente quiescente.
<b>I<sub>R</sub></b>	Corriente que debe circular durante un Set o un Reset.
<b>I<sub>ref</sub></b>	Corriente de cátodo de TL431.
<b>n</b>	Número de espiras.
<b>°C</b>	Grados centígrados.

$^{\circ}\text{K}$	Grados Kelvin.
<b>Out.</b>	Salida negativa del puente equilibrado.
<b>Out<sub>+</sub></b>	Salida positiva del puente equilibrado.
<b>q</b>	Carga eléctrica.
<b>R(1+x)</b>	Resistencia variable parametrizada directa.
<b>R(1-x)</b>	Resistencia variable parametrizada inversa.
<b>R<sub>5V1</sub>, R<sub>5V21</sub>, R<sub>5V22</sub></b>	Resistencias de configuración de TL431.
<b>R<sub>C+</sub>, R<sub>C-</sub></b>	Resistencias que limitan la corriente durante la carga de C <sub>RS</sub> .
<b>Ref</b>	Conexión de referencia del INA128.
<b>R<sub>g</sub></b>	Resistencia de ganancia del INA128.
<b>R<sub>g</sub>'</b>	Asociación de resistencias que junto a R <sub>gv</sub> comprenden R <sub>g</sub> .
<b>R<sub>g1</sub>, R<sub>g2</sub></b>	Resistencias de ganancia; en paralelo comprenden R <sub>g</sub> '.
<b>R<sub>gv</sub></b>	Resistencia variable para ajustar la ganancia del INA128.
<b>R<sub>O+1</sub>, R<sub>O+2</sub>, R<sub>O-1</sub>, R<sub>O-2</sub></b>	Resistencias de configuración del circuito de offset.
<b>R<sub>ov</sub></b>	Resistencia variable de ajuste de tensión de offset.
<b>R<sub>p+</sub>, R<sub>p-</sub></b>	Resistencias de drenaje de corrientes parásitas del INA128.
<b>R<sub>r1-</sub>, R<sub>r2-</sub></b>	Resistencias de configuración del LM79L05.
<b>R<sub>r1+</sub>, R<sub>r2+</sub></b>	Resistencias de configuración del LM78L05.
<b>R<sub>RS</sub></b>	Resistencia interna de las bobinas de reorientación de dominios
<b>R<sub>S</sub></b>	Resistencia de control de corriente en la Bobina de Helmholtz.
<b>R<sub>SR</sub></b>	Resistencia en serie con R <sub>RS</sub> para que el valor del conjunto sea R <sub>T</sub> .
<b>R<sub>T</sub></b>	Resistencia total del circuito de Set Reset.
<b>s</b>	Segundos.
<b>S</b>	Sensibilidad.
<b>T</b>	Tesla.
<b>t</b>	Tiempo.
<b>v</b>	Velocidad.
<b>V</b>	Voltio.
<b>V<sub>+</sub>, V<sub>-</sub>, G<sub>n</sub></b>	Entradas de alimentación y tierra del circuito.
<b>V<sub>alim-</sub></b>	Tensión de salida del LM79L05.
<b>V<sub>alim+</sub></b>	Tensión de salida del LM78L05.
<b>V<sub>b</sub></b>	Tensión de salida de TL431; alimentación del HCM1001.
<b>V<sub>fs</sub></b>	Tensión en el fondo de escala.
<b>V<sub>off</sub></b>	Tensión de corrección de offset; Tensión a la entrada Ref del INA128.
<b>V<sub>ref</sub></b>	Tensión de cátodo de TL431.
<b>V<sub>s</sub></b>	Salida diferencial del puente equilibrado.

- $X$  Parámetro variable de las resistencias del puente.
- $\Omega$  Ohmio.
- $\omega$  Pulsación.



# Índice general

---

<b>Capítulo 1.-Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1.- Magnetismo _____	2
1.2.- Campo magnético terrestre y geodinamo _____	3
1.3.- Transductores magnéticos _____	5
1.4.- Transductor en puente de medida equilibrado _____	8
1.5.- Amplificador de instrumentación _____	9
1.6.- Estructura de la memoria del TFG _____	10
<b>Capítulo 2.-Objetivos y Planificación.....</b>	<b>13</b>
2.1.- Objetivos _____	13
2.2.- Planificación temporal _____	14
<b>Capítulo 3.-Materiales y Métodos .....</b>	<b>17</b>
3.1.- Materiales _____	17
3.2.- Métodos _____	22
<b>Capítulo 4.-Diseño .....</b>	<b>29</b>
4.1.- Cálculos _____	29
4.2.- Diseño del circuito _____	40
<b>Capítulo 5.-Ensayos y Resultados .....</b>	<b>45</b>
5.1.- El prototipo _____	45
5.2.- Ensayos en el laboratorio _____	46
5.3.- Ensayos en campo _____	47
<b>Capítulo 6.-Conclusiones.....</b>	<b>53</b>
6.1.- Mejoras a corto plazo _____	54
6.2.- Futuros trabajos _____	54
<b>Bibliografía .....</b>	<b>57</b>



# Índice de Figuras

---

Figura 1-1: Representación del campo magnético terrestre [5].	3
Figura 1-2: Orientación geográfica del dipolo magnético terrestre [5].	4
Figura 1-3: Esquema de la generación de campo magnético según la teoría de la geodinamo.	4
Figura 1-4: Representación de coordenadas H - F - Z - D [5].	5
Figura 1-5: Orientación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético.	7
Figura 1-6: Puente equilibrado.	9
Figura 1-7: Esquema genérico del amplificador de instrumentación.	10
Figura 2-1: Cronograma de la realización del Trabajo Fin de Grado.	15
Figura 3-1: Dispositivo HMC1001 con moneda para apreciar escala.	18
Figura 3-2: Patillaje y puente equilibrado de HMC1001 [10].	18
Figura 3-3: Patillaje y esquema interno del INA128 [11].	19
Figura 3-4: Patillaje de LM78L05 (izq.) y LM79L05 (dch.) encapsulado TO92 (inferior) [12], [13].	20
Figura 3-5: Patillaje de TL431 encapsulado TO92 (superior) [14].	20
Figura 3-6: Esquema de unas bobinas de Helmholtz.	21
Figura 3-7: Sensor de Inducción conectado a osciloscopio tras realizar una medida.	22
Figura 4-1: Regulador en configuración de salida ajustable.	30
Figura 4-2: Configuración de tensión ajustable para TL431.	32
Figura 4-3: Esquema de circuito de corrección de offset.	35
Figura 4-4: Circuito de Set/Reset.	36
Figura 4-5: Modelización del puente equilibrado del HCM1001.	38
Figura 4-6: Esquema del prototipo de sensor magnetorresistivo.	42
Figura 4-7: Plano (layout) del circuito para su implementación física.	43
Figura 5-1: Prototipo montado.	46
Figura 5-2: Detalle de la parte inferior del circuito.	46
Figura 5-3: Medida del sensor de inducción.	48
Figura 5-4: Magnetograma [5].	49
Figura 5-5: Disposición inicial de la bobina de Helmholtz.	50
Figura 5-6: Brújula apuntando al este en el interior de la bobina de Helmholtz.	51
Figura 5-7: Sensor magnético calibrado al origen.	51
Figura 5-8: Lecturas del magnetómetro en orientación norte y este.	52



# Índice de Tablas

---

Tabla 1-1: Características generales de transductores magnéticos [8].	6
Tabla 2-1: Planificación temporal del proyecto.	15



# Resumen

---

Existen diversas hipótesis sobre el origen de la vida en la Tierra, pero de lo que no cabe duda es que jamás habría prosperado si no fuera por la existencia del campo magnético terrestre. Éste actúa como un escudo frente a las radiaciones exteriores principalmente del sol, sin el cual nuestro planeta sería un yermo desolado, muy parecido a nuestro vecino Marte.

El magnetismo era un fenómeno ya conocido en la antigua Grecia y China; se conoce que estos últimos utilizaban la brújula como método de navegación antes del siglo IX. No obstante, las primeras evidencias de considerar la Tierra como un imán se tienen en los escritos de William Gilbert (Siglo XVII), y no fue hasta la década de 1830 que Carl Friedrich Gauss midió la intensidad del campo magnético terrestre por primera vez.

En la actualidad, gracias al desarrollo tecnológico y a un mayor entendimiento de los principios físicos del electromagnetismo, no es necesario poseer caro instrumental o realizar complicados cálculos para poder efectuar mediciones del campo magnético terrestre.

En este Trabajo Fin de Grado se detalla paso a paso como construir un sensor magnético funcional con la precisión suficiente para medir la intensidad de nuestro escudo protector en un lugar determinado. Todo lo necesario para la construcción de dicho sensor puede encontrarse aquí, desde las opciones exploradas y los conceptos teóricos relacionados hasta los cálculos y diseños necesarios, pasando por los procedimientos utilizados. El trabajo concluye con los resultados de un prototipo finalizado y comparándolos con las medidas de otros sensores cuya precisión ya ha sido demostrada para validar los mismos.

**Palabras clave:** Campo magnético terrestre, electromagnetismo, sensor magnético.



# Abstract

---

There are different hypotheses that try to explain the origin of life on Earth, but what's beyond any shadow of doubt is that life would never flourish without Earth's magnetic field. It acts as a shield against external radiations coming mainly from the Sun, and without that protection our planet would be a barren wasteland, pretty much like our neighbour planet Mars.

Magnetism is a physical phenomena already known by the ancient Greek and Chinese cultures; it is known that the latter already used compasses by the IX century. Nonetheless, the first evidence Earth being considered as a giant magnet come from the works of William Gilbert (XVII century), and not until the decade of 1830 was its magnitude measured by Carl Friedrich Gauss.

Luckily, nowadays expensive instruments nor elaborate math aren't needed to appropriately measure the Earth magnetic field, thanks to both technological development and a deeper understanding of the physical principles of electromagnetism.

This final dissertation includes step by step detailed instructions of how to build a fully functional magnetic sensor, with enough precision to measure our protective shield's force intensity in a given place. Everything required to make the sensor is here; from the considered options to the underlying theory to the required calculation and design. The report concludes with the results of a working prototype and comparing them with the measurement results of other sensors which precision has already been proved.

**Keywords:** Earth magnetic field, electromagnetism, magnetic sensor.



# Capítulo 1.- Introducción

---

*En este capítulo se ofrece una exposición comprensiva de las razones que han impulsado la realización de este Trabajo Fin de Grado, así como explicaciones introductorias de los conceptos aplicados más importantes y un resumen de los resultados obtenidos.*

El magnetismo era un fenómeno ya conocido en la antigua Grecia y China; se conoce que estos últimos utilizaban la brújula como método de navegación antes del siglo IX. No obstante, las primeras evidencias de considerar la Tierra como un imán se tienen en los escritos de William Gilbert (Siglo XVII), y no fue hasta la década de 1830 que Gauss midió la intensidad del campo magnético terrestre por primera vez.

El campo magnético terrestre es de naturaleza dinámica, por lo que su magnitud varía a lo largo del tiempo. Su valor es de interés para muchos campos de la ciencia, así como objeto de estudio en sí mismo. En España, el Instituto Geográfico Nacional o IGN cuenta con una sección dedicada a la medición del campo geomagnético en los observatorios de Toledo, Tarragona y Tenerife.

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo final la producción de un prototipo de sensor magnético con especificaciones suficientes para medir el campo magnético terrestre. En esta memoria se describen los conceptos teóricos relacionados y los procedimientos y

herramientas utilizados para la elaboración del prototipo. Por último, se mostrarán los resultados del prototipo funcional y se analizará la precisión de su respuesta respecto a lo calculado, planteando posibles mejoras al dispositivo.

El grupo de Investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemetría (TIC-017) de la Universidad de Almería publicó, dentro del proyecto *Avances en sensorización procesado de señales en la banda ELF TEC2014 60132-P (2014-2019)*, diferentes resultados en lo referente a la medida de un fenómeno electromagnético natural [1], [2]. Este fenómeno se conoce como Resonancias Tierra – Ionosfera o Resonancias de Schumann [3].

Dichas resonancias se encuentran en la banda ELF (*Extreme Low Frequency*, o muy baja frecuencia), para las que la magnitud del campo magnético se corresponde con el valor de medición de corriente continua o 0Hz en dicha banda.

El objetivo de la construcción del sensor es poder realizar medidas del campo magnético terrestre y correlacionarlas con resultados anteriores con la intención de continuar dicha línea de investigación.

## **1.1.- Magnetismo**

El magnetismo es un fenómeno producto de la interacción entre partículas con carga eléctrica en movimiento. Es decir, los campos magnéticos son generados por cargas eléctricas en movimiento, afectando a su vez a otras cargas eléctricas en movimiento.

La fuerza aplicada sobre una partícula de carga  $q$  que se desplace a una velocidad  $v$  por el seno de un campo magnético  $B$  y un campo eléctrico  $E$  [4, p. 921] viene dada por la Ecuación (1).

$$\vec{f} = q \cdot (\vec{E} + v \times \vec{B}) \quad (1)$$

Esta fuerza, llamada fuerza electromagnética se denomina también la *fuerza de Lorentz*. Cuando el componente del campo eléctrico es nulo, se habla de fuerza magnética.

Este es el fundamento físico que gobierna todas las interacciones de tipo electromagnético, incluyendo el campo magnético terrestre.

## 1.2.- Campo magnético terrestre y geodinamo

El campo magnético que se observa en un punto de la tierra tiene dos orígenes, uno interno y otro externo. Puede verse una representación artística de ambos en la Figura 1-1.

El campo de origen externo es debido principalmente a la actividad del Sol sobre la ionosfera y la magnetosfera. Este campo externo presenta variaciones periódicas siendo la más importante la variación diaria con período de 24 horas; también son periódicas la variación lunar, la variación anual y la variación undecenal. Otras variaciones rápidas de origen externo son las pulsaciones magnéticas, las tormentas magnéticas, las bahías, los efectos cromosféricos, etc.



Figura 1-1: Representación del campo magnético terrestre [5].

El campo de origen interno es semejante al producido por un dipolo magnético situado en el centro de la Tierra con una inclinación de  $11,5^\circ$  respecto al eje de rotación (como puede apreciarse en la Figura 1-2), y es el responsable de más del 90% del campo observado. Los polos geomagnéticos son los puntos en los que el eje del dipolo intersecta a la superficie terrestre, y el ecuador magnético es el plano perpendicular a dicho eje. Este campo de origen interno no es constante ni uniforme, sino que presenta una variación lenta en el tiempo que se conoce como variación secular.

La teoría más aceptada para justificar la existencia del campo interno es la geodinamo, que afirma que son las corrientes de fluidos cargados eléctricamente en el núcleo terrestre las responsables de dicho campo magnético.

Estas corrientes se dan en el núcleo externo, que se encuentra en estado líquido y se compone principalmente de aleaciones de hierro y níquel. Las corrientes se originan debido al gradiente de temperatura existente entre el núcleo interno y el manto. Las fuerzas de Coriolis provocadas por la rotación de la tierra hace que estas corrientes circulen describiendo espiras, las cuales

inducen un campo magnético según la ley de Ampère [6]. La Figura 1-3 presenta un esquema de los procesos que ocurren en el interior del núcleo terrestre.

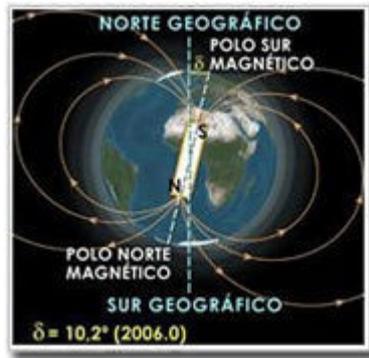


Figura 1-2: Orientación geográfica del dipolo magnético terrestre [5].

La naturaleza de estas corrientes es dinámica, y por lo tanto también lo es el campo magnético terrestre. No obstante, estas variaciones ocurren lentamente a lo largo del tiempo, por lo que puntualmente puede tratarse como un campo magnético constante.

Desde que Carl Friedrich Gauss publicara su estudio en la década de 1830 [7] el magnetismo de la tierra ha sido objeto de estudio, modelado y medición, como indica el gran número de trabajos existentes relativos al mismo. Desde ese momento, los métodos e instrumentos de medida también han mejorado, y hoy día contamos con una gran variedad de sensores y transductores magnéticos.

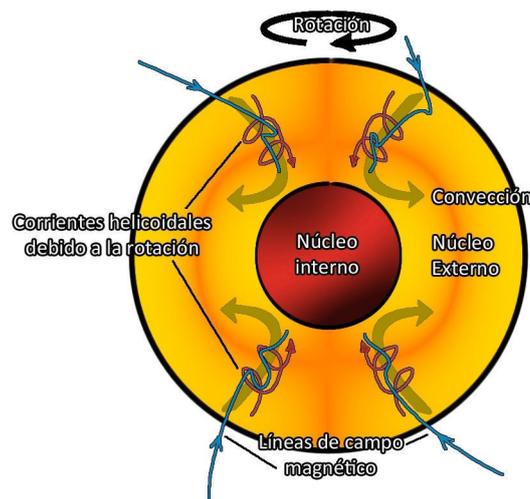


Figura 1-3: Esquema de la generación de campo magnético según la teoría de la geodinamo.

El campo magnético terrestre es una magnitud de carácter vectorial, por lo que para estudiar sus componentes se toma como referencia en un punto de la superficie de la Tierra un sistema cartesiano de coordenadas XYZ de ejes en dirección N-S, E-O y vertical. De esta forma, la

intensidad total del campo (F) y sus proyecciones horizontal (H) y vertical (Z) están relacionadas a través del ángulo de declinación (D) que forma H con el norte geográfico, y del ángulo de inclinación magnética (I) que forman F y H. Puede apreciarse una representación de estas coordenadas superpuesta a los ejes cartesianos en la Figura 1-4.

Así, para expresar el campo magnético en un punto bastan tres cantidades, utilizándose normalmente una de las siguientes ternas: H-D-Z, X-Y-Z, o F-I-D.

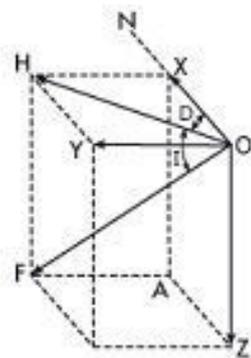


Figura 1-4: Representación de coordenadas H - F - Z - D [5].

### 1.3.- Transductores magnéticos

El transductor es el elemento primordial de todo sistema de instrumentación para poder medir la magnitud deseada. Se define como un elemento físico que posee una propiedad destacada cuya magnitud depende de la magnitud de un estímulo externo. Esto implica que diseñando un circuito cuya salida dependa del valor de esa propiedad destacada se puede obtener el valor de la magnitud del estímulo externo.

En lo relativo a este proyecto, se requiere un transductor que transforme la magnitud de un campo magnético en una magnitud medible electrónicamente. En términos de lo expuesto anteriormente, el estímulo externo debe ser el campo magnético.

Siendo el elemento crucial del circuito, se han estudiado los distintos tipos de transductores magnéticos disponibles [8]. Teniendo en cuenta que el objetivo es la construcción de un prototipo de un sensor magnético sin partes móviles, se analizaron los pros y los contras de cada tecnología.

La Tabla 1-1 muestra una comparativa de las características generales de las tecnologías típicas de transductores magnéticos.

Tecnología	Rango (mT)	Resolución (nT)	Ancho de Banda (Hz)	Comentario
Bobinas de Inducción	$10^{-10}$ a $10^6$	Variable	$10^{-1}$ a $10^6$	No pueden medir campos estáticos
Fluxgate	$10^{-4}$ a 0.5	0.1	CC hasta $2 \times 10^3$	Propósito general
SQUID	$10^{-9}$ a 0.1	$10^{-4}$	CC hasta 5	Mayor sensibilidad
Efecto Hall	0.1 a $3 \times 10^4$	100	CC hasta $10^8$	Adecuado para campos de más de 1T
Magnetorresistivo	$10^{-3}$ a 5	10	CC hasta $10^7$	Adecuado para rangos medios
Precesión protónica	0.02 a 0.1	0.05	CC hasta 2	Propósito general – escalar
Bombeo óptico	0.01 a 0.1	0.005	CC hasta 5	Alta resolución – escalar

Tabla 1-1: Características generales de transductores magnéticos [8].

A continuación se exponen, de forma resumida, las características más notables de cada una de las tecnologías.

## Bobinas de inducción

Basadas en la ley de Faraday, son un método de uso extendido de fiabilidad y robustez demostrada. Este método requiere elementos móviles (es necesario hacer girar la bobina en el seno del campo magnético para obtener la medida) pero se incluye como referencia, ya que el prototipo que resulte de este proyecto se comparará con el sensor de este tipo del que dispone el grupo de Investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemetría (TIC-017).

## Fluxgate

Este transductor muestra un potencial eléctrico proporcional a la magnitud del campo magnético. Al igual que las bobinas de inducción, posee robustez y fiabilidad, con la adición de no requerir partes móviles. Actualmente es el tipo de tecnología más utilizada en el campo de la instrumentación magnética, estando su uso ampliamente extendido en la industria. Por contra, su coste no lo hace apto para este proyecto, y su implementación no es sencilla. Otra característica que no lo hace deseable para este TFG es su naturaleza electrodinámica; al requerir un suministro variable de corriente eléctrica para tomar una lectura, esta perturbaría otro tipo de magnetómetros próximos como los utilizados para medir las resonancias tierra ionosfera [2].

## SQUID

El nombre de este transductor proviene de Superconducting Quantum Interference Device, se basa en que la magnitud de la corriente crítica que aparece entre dos superconductores separados mediante una fina capa de material aislante (efecto Josephson continuo) varía con el campo magnético [8]. Son los magnetómetros más sensibles que existen actualmente, pero sus condiciones de funcionamiento (es necesario alcanzar una temperatura de 4 °K para que se produzca el efecto Josephson) lo hacen poco robusto, y especialmente caro.

## Dispositivo de efecto Hall

Probablemente el más extendido para medir campos magnéticos fuertes, se basa en el efecto que provoca un campo magnético en la corriente eléctrica según la fuerza de Lorentz, cuya expresión aparece en la Ecuación (1). El desplazamiento de cargas que ocasiona la presencia de un campo magnético genera un campo eléctrico para compensar la corriente, ya que ésta no puede desviarse al encontrarse el circuito cerrado. Es barato, y de implementación sencilla.

## Magnetorresistivo

También llamados AMR (Anisotropic Magneto Resistance), los transductores magnetorresistivos se basan en la variación que experimentan las propiedades conductoras de los materiales ferromagnéticos tras una reorientación de sus dominios magnéticos. William Thompson (Lord Kelvin) fue el primero en observar este efecto al comprobar que la conductividad del hierro y el níquel variaba si se sometía el material a un campo magnético. La conductividad aumentaba si ésta ocurría a favor de las líneas de magnetización y disminuía en caso contrario [9]. Esto se debe a que los dominios magnéticos internos del material se reorientan como muestra la Figura 1-5, haciendo un medio mucho más apto para la circulación de corriente.

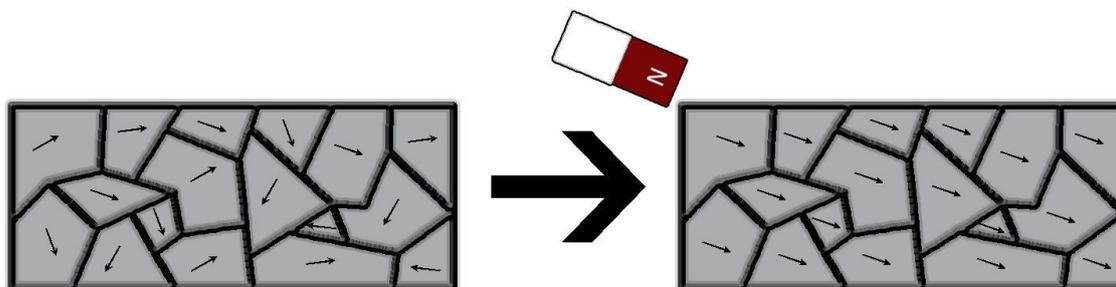


Figura 1-5: Orientación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético.

Aunque su precio es levemente superior a los de Efecto Hall, su precisión es mayor y su rango mucho más adecuado.

## **Precesión protónica**

Basado en el efecto de precesión de los núcleos al ser sometidos a un campo magnético y que es proporcional al mismo. No obstante, el hecho de que las medidas sean puramente escalares lo hace poco deseable, ya que reduce la escalabilidad del proyecto; usar transductores vectoriales es más apropiado porque da la opción de construir un sensor vectorial.

## **Bombeo óptico**

Se basan en el efecto Zeeman, en el que varios componentes ven sus líneas espectrales divididas al encontrarse bajo la influencia de un campo magnético. Al ofrecer medidas escalares, muestra los mismos inconvenientes que el de precesión protónica.

Tras sopesar los pros y contras de cada tipo de tecnología, se concluye que lo más conveniente era utilizar tecnología magnetorresistiva, ya que además de poseer las características de rango, sensibilidad y resolución apropiadas para cumplir los objetivos propuestos, pueden obtenerse a un precio asequible e implementarse en un circuito sin necesidad de herramientas adicionales. Otra característica fundamental es que es capaz de realizar medidas de componente continua, lo cual es fundamental para el objetivo de este Trabajo Fin de Grado.

La implementación típica de la tecnología magnetorresistiva es la del puente equilibrado; es típico que los transductores magnéticos consten de un puente equilibrado ya implementado junto con otros elementos accesibles por distintas patillas.

## **1.4.- Transductor en puente de medida equilibrado**

Como puede apreciarse en la Figura 1-6, un puente equilibrado consta de cuatro elementos resistivos, dispuestos en paralelo con una alimentación en tensión o corriente y también entre sí dos a dos. De los elementos resistivos que lo forman, uno o más pueden ser transductores. Las salidas del puente equilibrado se toman en la unión intermedia de dichos elementos.

La mayor ventaja de esta disposición reside en la obtención de medidas de tensión diferenciales proporcionales a la tensión de alimentación. Esto permite detectar variaciones pequeñas del valor de la resistencia y, por lo tanto, obtener medidas más precisas.

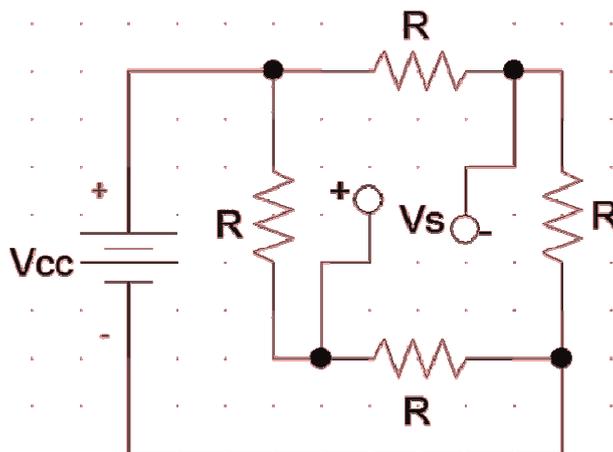


Figura 1-6: Puente equilibrado.

El mayor inconveniente del puente equilibrado es que la respuesta del circuito es, por defecto, no lineal. No obstante, el efecto de este inconveniente puede mitigarse mediante la circuitería apropiada, por lo que siempre es conveniente analizar el tipo de respuesta del puente equilibrado bajo distintas configuraciones, para así elegir la más conveniente.

La tensión obtenida a la salida de los puentes equilibrado necesita ser acondicionada para que el valor de salida sea proporcional a la magnitud medida. La salida de los puentes equilibrados suelen ser de muy pequeña magnitud, lo cual hace necesario que la siguiente etapa amplificadora tenga una serie de características:

- **Entrada diferencial:** la salida del puente equilibrado es diferencial, por lo que esta característica es fundamental.
- **Alta ganancia controlable:** las tensiones diferenciales pueden tener valores muy pequeños, por ello es necesario poder controlar la ganancia en un amplio margen.
- **Elevado rechazo del modo común:** una componente continua afectando a ambas entradas con una magnitud similar o superior a la que se obtiene a la salida del puente equilibrado es un grave problema, ya que en la práctica la entrada diferencial no la elimina por completo.

El único amplificador que cumple estas características es el amplificador de instrumentación.

## 1.5.- Amplificador de instrumentación

Como se muestra en la Figura 1-7, un amplificador de instrumentación costa como mínimo de tres amplificadores operaciones y un conjunto de resistencias, de las cuales destaca la indicada como  $R_g$ . Esto se debe a que la ganancia del dispositivo depende directamente del valor de  $R_g$ , lo

cual puede demostrarse mediante el análisis matemático del circuito. Ésta es una de las características principales de los amplificadores de instrumentación; no sólo poseen alta ganancia, sino que además esta puede determinarse con gran precisión fijando un valor determinado de  $R_g$ .

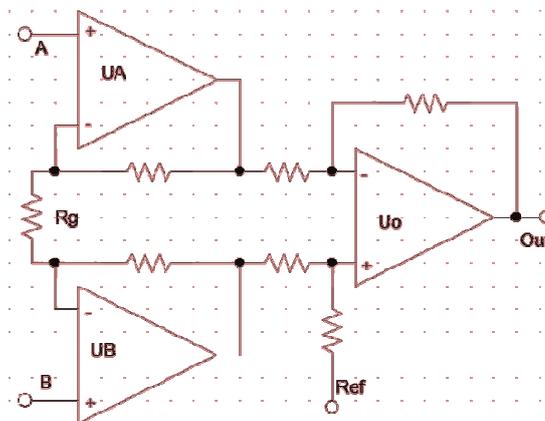


Figura 1-7: Esquema genérico del amplificador de instrumentación.

Los Amplificadores de instrumentación prácticos poseen ciertos comportamientos dañinos cuyo efecto debe minimizarse. Los más críticos para este trabajo son el offset, que representa un desplazamiento de la señal sobre la referencia, y la deriva de offset, que es el cambio que experimenta el valor del offset cuando cambia la temperatura ambiente a la que está el dispositivo.

La conexión Ref permite fijar el valor de referencia que tomará a la hora de amplificar la salida, lo que permite incorporar un circuito de corrección de offset. Controlar la deriva de offset queda fuera del alcance de un Trabajo Fin de Grado, por lo que será necesario comprobar el error que introduce en el sistema.

## 1.6.- Estructura de la memoria del TFG

Para la exposición de este trabajo se ha dividido la memoria en seis capítulos, donde se detallan desde una escueta referencia introductoria al tema tratado hasta llegar a las conclusiones obtenidas del trabajo tras analizar los resultados obtenidos en las medidas de campo. A continuación se describe cada capítulo.

- **Introducción:** capítulo en el que se explican las consideraciones teóricas realizadas de cara al diseño del prototipo.

- **Objetivos y planificación:** capítulo dedicado a la exposición de los objetivos que se pretenden alcanzar y la planificación que se ha seguido para alcanzarlos.
- **Material y métodos:** en este capítulo se ilustra la lista de componentes y herramientas a utilizar para la construcción del prototipo.
- **Diseño:** en este capítulo se exponen las consideraciones iniciales, cálculos necesarios, fórmulas utilizadas y resultados obtenidos para el cálculo de los componentes necesarios, así como capturas de pantalla de las capas relevantes del circuito.
- **Resultados:** capítulo que muestra imágenes del prototipo implementado así como resultado de calibración y medidas de campo obtenidas.
- **Conclusiones:** este capítulo se dedica a resaltar las deducciones más importantes del trabajo desde el punto de vista de los resultados, así como futuras mejoras aplicables a la construcción de sensores magnéticos sin partes móviles.



# Capítulo 2.- Objetivos y Planificación

---

*A continuación se exponen los elementos organizativos considerados en este Trabajo Fin de Grado, diferenciando entre objetivos a cumplir, tareas a realizar, y organización temporal de las mismas.*

El orden y la claridad son fundamentales para conseguir un trabajo bien hecho, así como para servir de marco al trabajo realizado. Con esa intención se ha completado esta sección de la memoria en la que se plantean las metas a alcanzar, y se muestra la distribución temporal general que se estableció a priori y la asignación de tareas final que se desarrolló durante el trabajo.

## 2.1.- Objetivos

El objetivo principal es diseñar e implementar un prototipo de sensor magnético sin partes móviles que pueda realizar medidas del campo magnético terrestre. Esto permitirá correlacionar con las ya medidas dentro del proyecto *Avances en sensorización procesado de señales en la banda ELF TEC2014 60132-P (2014-2019)*. El proyecto en cuestión es financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad – Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación –

Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, en la modalidad de Proyectos de I+D.

El objetivo principal se compone de una serie de objetivos secundarios.

- **Estudiar la historia y evolución de los métodos y sistemas de medida del campo geomagnético:** localizar y estudiar documentación apropiada para conocer el estado del arte.
- **Diseñar un sensor magnetorresistivo:** debe ser un sistema sin elementos mecánicos móviles que permita realizar medidas del campo magnético terrestre, garantizando un margen de error inferior a  $1\mu\text{T}$  (0,01G) y que posea una autonomía de varias horas.
- **Fabricar el sensor magnetorresistivo previamente diseñado:** fabricar un prototipo del sensor magnético, comprobar su funcionalidad respecto a lo esperado teóricamente y comparar sus medidas con un sensor de inducción electromagnética basado en la ley de Faraday, disponible en la Universidad de Almería.
- **Pruebas en terreno:** efectuar una campaña de medidas en algunos puntos de la Provincia de Almería.
- **Difusión del trabajo:** publicar en diferentes revistas de impacto internacional los trabajos realizados.

## 2.2.- Planificación temporal

Para la consecución del objetivo propuesto se elaboró a priori una planificación temporal para estructurar el trabajo, dividida en las siguientes fases de desarrollo.

- **Estudio y formación:** comprende lectura de bibliografía, análisis de métodos, revisión de datasheets.
- **Diseño:** elección de componentes, realización de cálculos, ejecución de simulaciones.
- **Implementación física:** obtención de los componentes, preparación de la placa del circuito, soldado, terminación y prueba.
- **Documentación:** disposición de los cálculos en medio digital, redacción del anteproyecto y la memoria, revisión y formato.

La Figura 2-1 muestra la distribución inicial de las fases de desarrollo que se planteó, en la que cada columna corresponde a una semana laborable de trabajo.

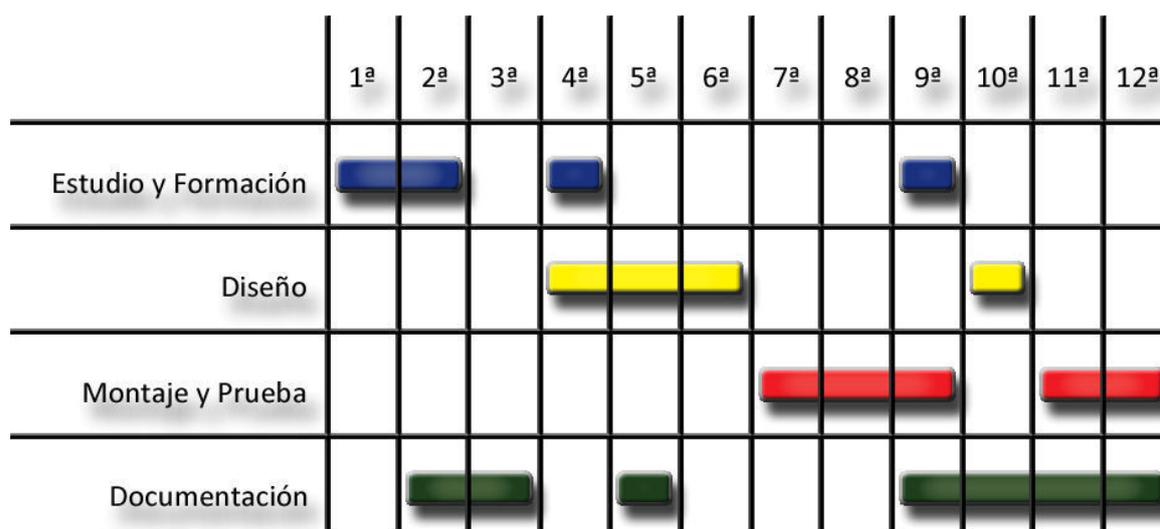


Figura 2-1: Cronograma de la realización del Trabajo Fin de Grado.

La Tabla 2-1 muestra un desglose de las actividades realizadas durante el tiempo dedicado a este trabajo, así como la fase con la que dichas actividades están relacionadas, el mes en el que se realizó la actividad, y la duración en días de trabajo que se dedicó.

Fase	Actividad Realizada	Mes	Duración
<b>Estudio y formación</b>	Lectura de la documentación proporcionada. Búsqueda de documentación adicional. Familiarización con los conceptos implicados en el proyecto.	Abril	7 días
<b>Documentación</b>	Composición de bibliografía inicial en base a la documentación.	Abril - Mayo	5 días
<b>Estudio y formación</b>	Estudio de viabilidad comparativa de los transductores magnéticos disponibles y consulta a tutores, concluyendo con la elección del AMR.	Mayo	2 días
<b>Documentación</b>	Redacción del Anteproyecto.	Mayo	3 días
<b>Estudio y formación</b>	Lectura de documentación referente a aplicaciones del transductor AMR para recopilar consideraciones mínimas a la hora de realizar un diseño inicial.	Junio	5 días

Tabla 2-1: Planificación temporal del proyecto.

Fase	Actividad Realizada	Mes	Duración
<b>Diseño</b>	Realización de un diseño inicial con las características mínimas para asegurar el funcionamiento del dispositivo, incluyendo cálculo de componentes, diseño de circuito en OrCAD.	Junio-Julio	12 días
<b>Documentación</b>	Documentación del proceso de diseño.	Julio	5 días
<b>Implementación física</b>	Implementación física del diseño inicial incluyendo insolado y revelado de placa, soldadura de componentes, y prueba inicial del dispositivo.	Julio	6 días
<b>Documentación</b>	Consulta a tutores. Unificación de la documentación redactada hasta ahora para formar la Memoria del Trabajo Fin de Grado.	Julio-Agosto	4 días
<b>Diseño</b>	Revisión de los cálculos realizados.	Agosto	2 días
<b>Documentación</b>	Redacción de la memoria del Trabajo Fin de Grado.	Agosto	6 días
<b>Implementación física</b>	Arreglos en el dispositivo. Ensayos de calibración y medida. Comparación con el sensor de inducción magnética.	Septiembre	2 días
<b>Documentación</b>	Redacción de resultados en la memoria del Trabajo Fin de Grado.	Septiembre	6 días
<b>Implementación física</b>	Ajustes en el prototipo	Septiembre	2 días
<b>Documentación</b>	Preparación de la presentación	Septiembre	5 días

**Tabla 2-1: Planificación temporal del proyecto (Cont.)**

Se estima una duración de 72 días, que a una media de 6 horas trabajadas por día equivalen a 432 horas trabajadas, cumpliendo sobradamente los requisitos establecidos en la normativa de realización del Trabajo Fin de Grado.

# Capítulo 3.- Materiales y Métodos

---

*En este capítulo se analizan en detalle los circuitos elegidos para la implementación del prototipo, así como las herramientas y procedimientos a utilizar en el proceso.*

## 3.1.- Materiales

La complejidad de los componentes electrónicos va desde los circuitos integrados, que poseen una complejidad considerable, a los elementos pasivos como resistencias y condensadores, que son comparativamente más simples. A continuación se describirán en el nivel apropiado de detalle los componentes que se utilizarán en la fabricación del prototipo.

### HCM1001

De los distintos dispositivos magnetorresistivos disponibles se ha seleccionado el HCM1001. Su aspecto y dimensiones pueden observarse en la Figura 3-1.

Además de poseer características que le permiten cumplir las especificaciones requeridas, se ha valorado muy positivamente que esté disponible en encapsulado SIP-8, que es de montaje en orificio pasante. Esto permite montar zócalos adecuados para el dispositivo en los circuitos que se diseñen en lugar de soldarlo directamente, lo que facilitará la iteración del proceso de diseño al poder reutilizar el dispositivo en varios prototipos.

Como se muestra en la Figura 3-2, la parte del dispositivo relativa a la medida es un puente equilibrado en el que los cuatro elementos resistivos son transductores. Cada transductor es un elemento resistivo de permalloy (aleación de hierro y níquel) depositada sobre una oblea de silicio [10].

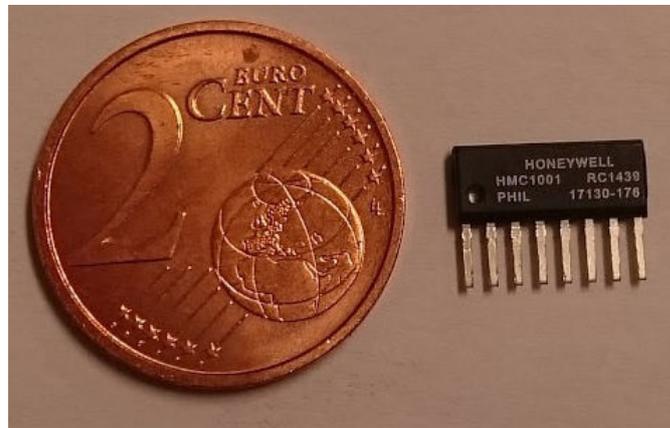


Figura 3-1: Dispositivo HMC1001 con moneda para apreciar escala.

La disposición de las magnetorresistencias tiene la doble intención de obtener una respuesta lo más lineal posible, y de hacer que el dispositivo sea especialmente sensible a las variaciones de campo magnético en un eje, que a efectos prácticos es la dirección en la que el dispositivo captará la magnitud del campo.

También en la Figura 3-2 puede observarse el patillaje del dispositivo, en el que aparecen elementos de compensación (Offset) y de reorientación de dominios magnéticos de las resistencias (Set/Reset). Su objetivo principal es corregir el error de repetitividad que se produce por la histéresis magnética, pero con la circuitería adecuada permiten un aumento de precisión y un mayor ajuste en la medida [10].

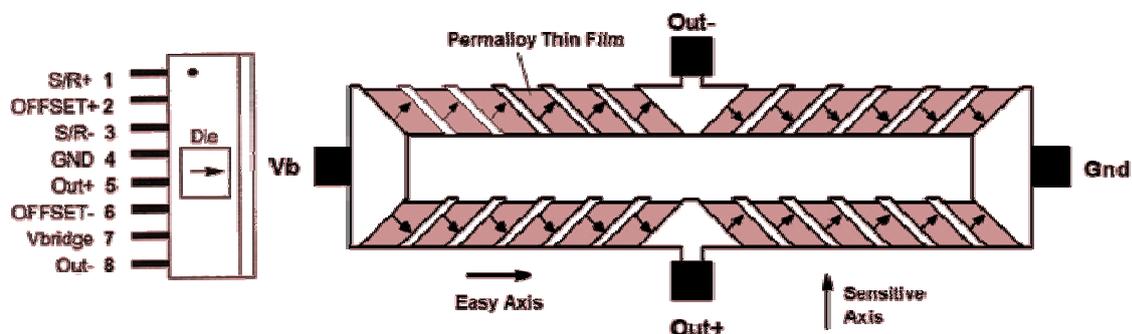


Figura 3-2: Patillaje y puente equilibrado de HMC1001 [10].

Este dispositivo realiza medidas magnéticas vectoriales, en la dirección dada por la flecha que aparece en la imagen izquierda de la Figura 3-2, marcada como Die. La disposición en el circuito se hará del tal manera que se mida la coordenada geomagnética H.

## INA128

Este amplificación de instrumentación de uso general y alta ganancia [11] se utilizará para el acondicionamiento de la señal del puente equilibrado.

El patillaje indicado se corresponde a los encapsulados de orificio pasante (DIP-8) y montaje superficial (SO-8). En este proyecto se utilizará el primer tipo por las mismas razones expuestas en el HCM1001. Su esquema interno se corresponde con el esquema genérico del amplificador de instrumentación mostrado en la Figura 3-3 por lo que se aplicarán todas las consideraciones comentadas en el apartado *Amplificador de instrumentación*.

En el mismo apartado se mencionó que el offset y el offset drift eran las características cuyo efecto podía ser crítico a la hora de analizar el error; por ello se ha prestado especial atención a su magnitud. El offset en tensión tiene un valor máximo de  $50\mu\text{V}$ , y la deriva de offset es de  $0.5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  [11]. Su efecto se evaluará en el capítulo *Diseño*.

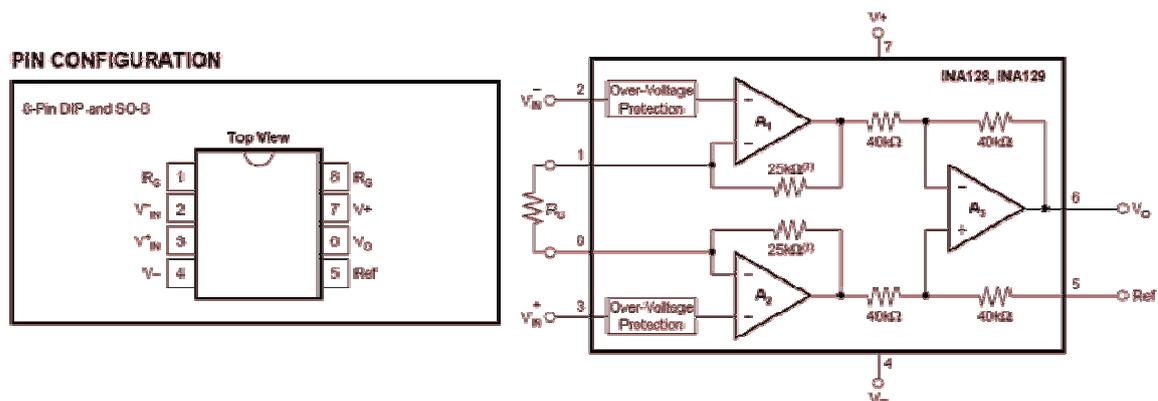


Figura 3-3: Patillaje y esquema interno del INA128 [11].

## LM7xL05

Para evitar irregularidades en la alimentación y no hacer que el circuito dependa de una fuente de tensión constante, se disponen sendos reguladores de tensión, LM78L05 para la tensión positiva y LM79L05 para la negativa. Para cubrir el rango de medida es necesaria una tensión mayor por lo que ambos se dispondrán con la configuración que les permite suministrar 10V.

La Figura 3-4 muestra el patillaje de ambos dispositivos en el tipo de encapsulado que se utilizará en el prototipo.

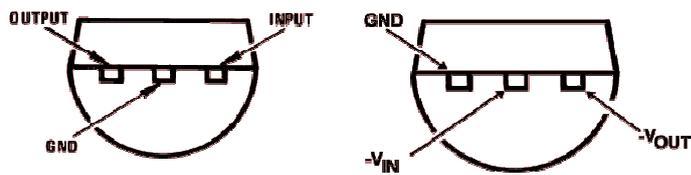


Figura 3-4: Patillaje de LM78L05 (izq.) y LM79L05 (dch.) encapsulado TO92 (inferior) [12], [13].

## TL431AC

Esta referencia de tensión cuyo patillaje en el encapsulado TO92 puede observarse en la Figura 3-5 está preparada para dar 2.5 voltios a su salida con un error de  $\pm 5\text{mV}$  [14]. Adecuadamente configurada se puede conseguir que muestre 5V a la salida, que es la tensión recomendada para alimentar el HCM1001.

El objetivo de colocar esta referencia es proporcionar la tensión requerida al dispositivo magnetorresistivo asegurando estabilidad adicional.

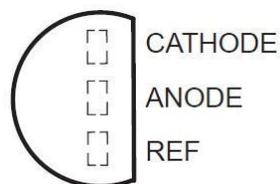


Figura 3-5: Patillaje de TL431 encapsulado TO92 (superior) [14].

## Bobina de Helmholtz

La disposición de las bobinas de Helmholtz permite, mediante la circulación de una corriente de determinado valor por ellas, la anulación del campo magnético en su interior. A primera vista, el esquema requerido es muy sencillo, como muestra la Figura 3-6. No obstante las bobinas deben estar fabricadas con materiales de alta calidad y métodos muy precisos para su adecuado funcionamiento.

En el esquema propuesto, la corriente puede controlarse mediante el valor de  $R_s$ . La capacidad de anular el campo magnético en su interior surge mayormente de su disposición geométrica, en concreto, de que las bobinas estén situadas a una distancia igual a su radio.

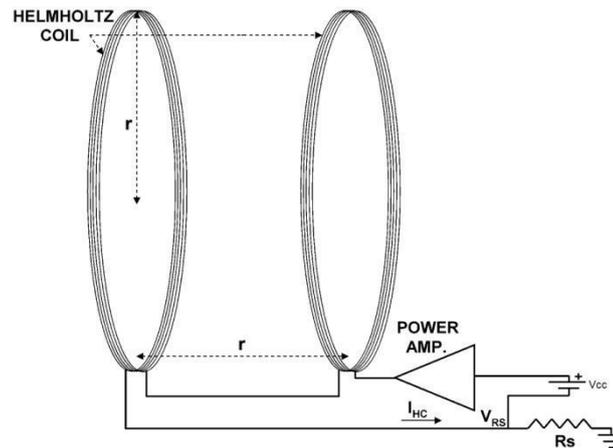


Figura 3-6: Esquema de unas bobinas de Helmholtz.

Para poder anular un campo magnético, la bobina debe producir uno de igual magnitud. La expresión del campo magnético producido figura en la Ecuación (2).

$$|B| = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I_{HC}}{r} \quad (2)$$

El área de tecnología electrónica cuenta con una de estas bobinas, con un total de 154 espiras ( $n$ ) y un radio de 0.2 metros.

### Sensor por Bobina de Inducción

Para los ensayos de calibración y ajuste será necesario conocer el campo magnético terrestre en diversas ocasiones. Para ello se utilizará un solenoide de 12000 espiras y  $0.00165 \text{ m}^2$  de área que, conectándolo a un osciloscopio y haciéndolo girar, nos permite obtener la tensión inducida en la bobina y de ella se puede obtener el campo magnético, despejándolo de la ley de Faraday tal y como se desarrolla en la Ecuación (3).

$$\vec{V} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot n \cdot s; \vec{B} = \vec{B} \cdot \sin \omega t \rightarrow V = \omega B \cos \omega t \cdot n \cdot s \rightarrow |B| = \frac{|V|}{\omega \cdot n \cdot s} \quad (3)$$

Puede observarse el sensor de inducción conectado al osciloscopio en la Figura 3-7.

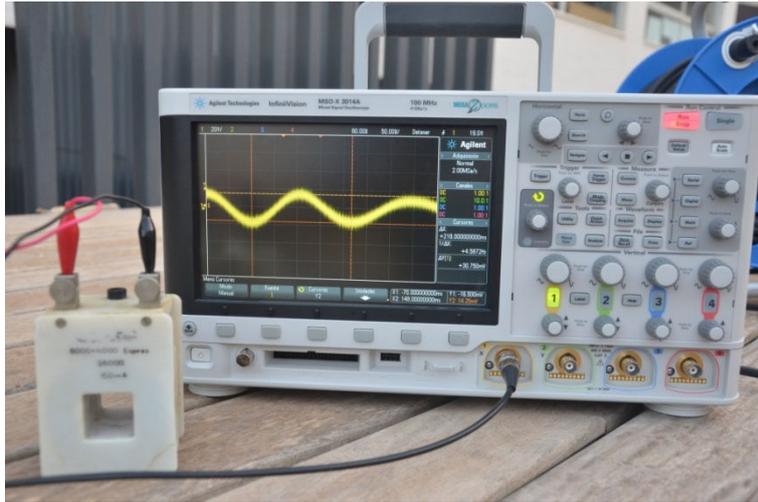


Figura 3-7: Sensor de Inducción conectado a osciloscopio tras realizar una medida.

## Componentes pasivos

Para completar el circuito se requieren condensadores y resistencias. Los condensadores cumplirán principalmente funciones de desacoplo, por lo que no son críticos. Sin embargo, los valores de las resistencias afectan al comportamiento del dispositivo por lo que se utilizarán resistencias con tolerancia inferior al 1% en la medida de lo posible.

## 3.2.- Métodos

A continuación se describen los procedimientos y herramientas que se utilizarán en el proceso de diseño y montaje del circuito integrado, y el orden en el que será necesario utilizarlas.

### OrCAD

Este paquete software es un conjunto de herramientas de diseño de circuitos asistido por ordenador. Se ha elegido por estar muy familiarizado con su uso, ya que se ha utilizado para la realización de las prácticas en las asignaturas de electrónica.

Cada uno de los programas que lo componen cumple una función específica en el proceso de diseño. En este caso se usan principalmente dos; Capture y Layout.

#### Capture

OrCAD Capture es una herramienta para el diseño de esquemas de circuitos. La utilidad principal de esta herramienta es que nos permite conectar los componentes del circuito en una forma

comprensible y familiar como es el esquema eléctrico, para luego pasar las conexiones al diseño del circuito físico. Esto es especialmente conveniente ya que permite empezar la disposición del circuito con los componentes ya conectados.

Los dos elementos más destacados a utilizar en el diseño de este circuito son la creación de componentes y la asignación de huellas.

- La creación de componentes permite diseñar nuevos elementos para colocarlos en el esquema a partir de los ya existentes.
- La asignación de huellas (footprint) permite al usuario definir cómo quedará representado ese componente en el circuito físico.

Una vez diseñado el esquema, la información se exporta para usarla de base a la hora de diseñar las pistas tal y como aparecerán sobre el circuito; para ello se utilizará OrCAD Layout.

### *Layout*

Esta herramienta se utiliza para diseñar las conexiones físicas de los componentes del circuito. Éstos se conectan mediante pistas que discurren en distintas capas; el programa permite crear las pistas a partir de las conexiones definidas mediante Capture y seleccionar las distintas capas en las que se va a trabajar.

Asimismo incorpora una herramienta para la creación de huellas de componentes, en la que se pueden definir los puntos de contacto que tendrá un componente sobre el circuito, e incluso definir detalles estéticos para facilitar la comprensión del circuito.

Generalmente el producto final de este programa son las capas terminadas en un formato de imagen vectorial 2D denominado Gerber. Esos archivos pueden enviarse a una empresa de fabricación de circuitos para obtener un resultado totalmente profesional. No obstante, el alcance de este Trabajo Fin de Grado consiste en fabricar un prototipo funcional, por lo que se utilizarán medios más caseros. Para ello se trabajará a una sola capa y se imprimirá esta en papel de acetato a tamaño real.

El objetivo de realizar la impresión en papel de acetato es obtener un fotolito, que en el mundo de la impresión por contacto se define como el soporte que reproduce un objeto sobre un soporte transparente. Ésta se fijará en la placa en el proceso de insolación.

## **Insolación o copia por contacto**

Este método permite obtener circuitos impresos artesanales de alta calidad mediante el uso de una insoladora, que no es más que una caja opaca que en su interior contiene una serie de lámparas de alta intensidad, y sobre ellos una superficie sólida y transparente, generalmente cristal.

El propósito de este proceso es imprimir el diseño del circuito sobre una placa, para luego mediante procesos adicionales obtener las pistas sobre dicho circuito. Para ello se toma un fotolito del circuito (impresión en acetato obtenida de OrCAD Layout) y se introduce en la insoladora junto a una placa de baquelita con una capa de cobre en una de sus caras, a su vez barnizada una solución fotosensible.

La exposición a la luz de la insoladora durante unos minutos (el tiempo exacto depende de la potencia de la insoladora) modifica las propiedades de la solución fotosensible, dejando la placa lista para su revelado.

## **Revelado**

Al terminar el proceso de insolado es necesario sumergir la placa en una solución acuosa de sosa cáustica, típicamente en una proporción de 7 gramos de sosa por litro de agua. Esto hará que los segmentos de la solución que determinan las pistas de los componentes se hagan más resistentes, mientras que el resto se retirarán de la placa y pasarán a la solución.

La sosa cáustica es un producto altamente corrosivo y puede provocar quemaduras graves en contacto con la piel. Para la realización de este procedimiento es recomendable utilizar equipo de protección, tales como gafas de plexiglás y guantes de goma.

Una vez preparada la solución, se vierte en una cubeta de tamaño adecuado para poder cubrir la placa. A continuación se sumerge la placa en la solución asegurándose que la cubra completamente y se agita la cubeta suavemente, facilitando la actuación del producto. Pasados unos minutos (dependiendo de la concentración de la solución) el cobre de las partes que no corresponden a las pistas quedará a la vista, marcando el final del proceso de revelado.

Cuando el cobre queda visible, se vierte abundante agua en el interior de la cubeta para neutralizar la solución. Tras haber aclarado abundantemente, puede vaciarse la cubeta, extraer la placa y secarla. Sobre el cobre deberá verse claramente dibujada la forma de las pistas en barniz fotosensible, quedando el cobre expuesto en el resto.

El siguiente paso consiste en eliminar el cobre sobrante para que permanezcan sólo las pistas, lo cual se consigue mediante otra reacción química.

## Atacado

Este proceso consiste en usar una solución reactiva al cobre para eliminar el cobre no deseado de la superficie de la placa, para obtener la placa correspondiente al circuito diseñado, en el que sólo aparecen las pistas del mismo. Esto ocurre porque el agente de atacado ataca la superficie del cobre expuesto, mientras que las pistas quedan protegidas por el barniz fotosensible.

Pueden adquirirse agentes de atacado en tiendas especializadas, pero también es posible comprar los productos químicos por separado y realizar la mezcla de forma casera. En este caso se utilizará una solución de ácido clorhídrico y perborato sódico, ya que los componentes son fácilmente adquiribles, y la reacción se produce en un tiempo moderado; una reacción demasiado rápida puede acabar dañando las pistas a pesar de estar protegidas, y una reacción demasiado lenta nunca es deseable por requerir mucho tiempo.

Al igual que ocurría en el proceso de revelado, el agente atacante es una sustancia corrosiva y tóxica y debe manipularse con extremo cuidado. Además, al tratar una solución de ácido clorhídrico es conveniente utilizar una mascarilla para evitar respirar las emisiones tóxicas producto del cloro.

El proceso es simple; se vierte el agente atacante en una cubeta (o se mezclan los productos en ella) y se sumerge la placa dejando a la vista la cara con las pistas de cobre. El indicador de que la reacción se está produciendo es que el cobre adquiere un color asalmonado. Mover suavemente la cubeta acelerará la reacción, pero no es necesario hacerlo. No obstante, sí es conveniente mover la placa cada cierto tiempo para eliminar las burbujas que se adhieren a la superficie producto de la reacción.

Una vez que el cobre comienza a desaparecer de la superficie de la placa se puede utilizar una varilla de madera para agitar el ácido en las zonas en las que queden restos y acelerar la reacción. Cuando sólo las pistas protegidas por el barniz fotosensible estén a la vista, se neutralizará la reacción de la misma forma que se hizo en el paso del revelado.

Por último, solo queda incorporar los elementos electrónicos al circuito para que este esté completo. Para ello es necesario eliminar el barniz protector con disolvente, perforar la placa del

circuito en los lugares adecuados y, a continuación, colocar cada componente en su sitio y proceder a soldarlo a las pistas de cobre.

## **Taladrado y soldado**

El último proceso de la placa es de naturaleza mecánica. Utilizando un taladro de mano y juego de brocas de acero al cobalto de pequeño diámetro y apropiado a los componentes a insertar. Se realizarán perforaciones en todo lugar en el que sea necesario introducir la patilla de un componente para su posterior soldado.

Una vez realizados todos los taladros, se puede dar un pulido a las pistas para mejorar su afinidad al estaño de la soldadura y también lijar con cuidado las perforaciones para eliminar las rebabas de cobre. A continuación se van soldando los componentes uno a uno introduciéndolos en su posición adecuada y se sueldan a la placa, cortando con unos alicates cualquier elemento del componente que sobresalga de la soldadura.

Para poder afirmar que una soldadura se ha realizado apropiadamente hay que seguir una serie de pasos:

1. Colocar un poco de estaño en la punta del soldador antes de aplicarlo sobre el circuito. El estaño derretido facilita una transmisión de calor homogénea y favorece el calentamiento de la zona de soldadura. Además protege a la punta del soldador de sobrecalentamientos extremos.
2. Aplicar el soldador inclinado, de forma que la punta esté en contacto con la pista y la patilla del componente a soldar.
3. Tras unos cuantos segundos para dejar que tanto la pista como la patilla se calienten, aplicar estaño a la unión del componente y la patilla; nunca sobre la punta del soldador, ya que puede provocar una soldadura fría (aparición de bola y no de cono como sería correcto) que dará problemas al no estar bien soldado y provocar mal contacto.
4. Una vez que el estaño se ha distribuido adecuadamente alrededor de la patilla, se retira el soldador.

El indicativo de que la soldadura se ha realizado correctamente es que no presenta forma de gota o bola, sino que entre la pista y la patilla queda una forma parabólica que une ambos elementos con una pendiente suave.

Es importante tener especial cuidado con los componentes activos, ya que son especialmente sensibles a la temperatura y aplicar el soldador durante mucho tiempo puede dejarlos inservibles. Por ello es importante aplicar el soldador en tiempos reducidos y, en el caso de componentes de muchas patillas, utilizar zócalos que pueden soldarse en la placa sin miedo, y luego introducir el componente activo en el zócalo.



# Capítulo 4.- Diseño

---

*En este capítulo aparecen todos los cálculos relativos al diseño del circuito, comentando las consideraciones previas, fórmulas utilizadas y resultados obtenidos. En último lugar se muestran imágenes de la fase de diseño asistido por ordenador y de la implementación final del prototipo.*

El diseño de un circuito electrónico es una parte crucial de la que dependerá el buen funcionamiento del mismo. Es conveniente ser meticulosos con los cálculos, ya que si estos fallan, el circuito no se comportará como se espera sin importar lo esmerada que sea su implementación física.

## 4.1.- Cálculos

En este apartado se detallan las etapas del circuito que han requerido cálculos. En cada etapa se describen las consideraciones previas, las fórmulas utilizadas y los resultados obtenidos.

## Alimentación - Reguladores

Se desea una alimentación simétrica de  $\pm 10V$  utilizando los reguladores LM78L05 y LM79L05, mencionados en el apartado anterior. Observando ambos datasheets se observa que el comportamiento de ambos dispositivos es simétrico, por lo que a efectos de calcular su salida se tomará como referencia el LM78L05 y luego se aplicarán los resultados a ambos.

La disposición que permite una salida ajustable se obtiene del datasheet y se muestra en la Figura 4-1. Igualmente en el datasheet se indican las ecuaciones que permiten calcular la tensión de salida para dicha disposición [12].

$$V_{alim+} = 5V + \left( \frac{5V}{R_{r1+}} + I_Q \right) \cdot R_{r2+} \quad (4)$$

$$\frac{5V}{R_{r1+}} > 3I_Q \quad (5)$$

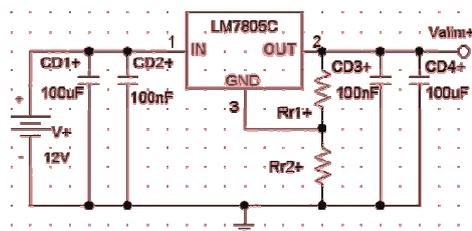


Figura 4-1: Regulador en configuración de salida ajustable.

Siendo  $V_{Alim+}$  la tensión de alimentación que se suministrará al circuito, e  $I_Q$  la corriente quiescente, que va desde la patilla GND a tierra y cuyo valor lo proporciona el Datasheet [12] se puede obtener el límite superior para el valor de  $R_1$  sustituyendo en la Ecuación (5).

$$I_Q = 3mA \rightarrow R_{r1+} < 555.56 \Omega$$

Una vez que se conoce rango de valores que puede tomar  $R_{r1+}$  se despeja  $R_{r2+}$  de la Ecuación (4).

$$R_{r2+} = \frac{V_{alim} - 5V}{\left( \frac{5V}{R_{r1+}} + I_Q \right)} \quad (6)$$

Por último se calcula  $R_{r2+}$  sustituyendo los valores conocidos en la Ecuación (6) y asignando un valor de  $220\Omega$  a  $R_{r1+}$ .

$$\left. \begin{array}{l} V_O = 10V \\ R_{r1+} = 220\Omega \\ I_Q = 3mA \end{array} \right\} R_{r2+} = \frac{5V}{0.0055A} = 194.35\Omega$$

Aplicando a las resistencias sus valores normalizados más próximos (denotados por  $\mathbb{R}$ ) se sustituyen dichos valores en la Ecuación (1) para comprobar que el valor de tensión suministrado es suficiente.

$$\left. \begin{array}{l} R_1^{\mathbb{R}} = 220 \\ R_2^{\mathbb{R}} = 200 \end{array} \right\} V_{|alim|}^{\mathbb{R}} = 10.14V$$

Como ya se dijo al principio, los esquemas del regulador positivo y negativo son simétricos por lo que se considera que el valor obtenido es el valor de alimentación de ambos. Los valores obtenidos cumplen las condiciones establecidas.

## Alimentación - Puente equilibrado

Para la alimentación del puente equilibrado se utilizará una referencia **TL431AC** configurada para obtener 5V de tensión de salida. Se ha elegido este valor de tensión por aparecer como valor típico de alimentación para el HMC1001 [10], por lo que se tiene más información sobre el comportamiento del dispositivo a esa tensión.

El valor típico de  $V_{ref}$  puede obtenerse del datasheet. Como se calculó previamente en el apartado *Alimentación - Reguladores* la tensión de entrada a este dispositivo será de 10V, por lo que se fijará el valor de  $R_{5Vs}$  a 4k7 $\Omega$ , lo que garantiza una corriente de 2.1mA.

La fórmula que calcula la tensión de salida de la configuración mostrada en la Figura 4-2 es la siguiente.

$$V_b = V_{ref} \left( 1 + \frac{R_{5V1}}{R_{5V2}} \right) + I_{ref} \cdot R_{5V1} \quad (7)$$

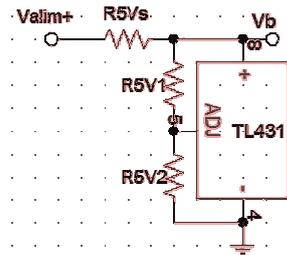


Figura 4-2: Configuración de tensión ajustable para TL431.

Siendo  $V_{ref}$  la tensión interna del dispositivo entre las conexiones de  $R_{5V2}$  e  $I_{ref}$  la corriente que circula por  $R_{5V1}$  hasta la referencia. Se despeja  $R_{5V2}$  de la Ecuación (7).

$$R_{5V2} = \frac{V_{ref} \cdot R_{5V1}}{V_b - I_{ref} \cdot R_{5V1} - V_{ref}} \quad (8)$$

Conocidos los valores típicos de  $V_{ref}$  y  $I_{ref}$ , se fija arbitrariamente un valor normalizado para  $R_{5V1}$  y se sustituyen en la Ecuación (8).

$$\left. \begin{array}{l} I_{ref} = 2\mu A \\ V_{ref} = 2.495V \\ V_b = 5V \\ R_1 = 100k\Omega \end{array} \right\} R_{5V2} = \frac{249500}{2.305} \Omega = 108242k\Omega$$

A continuación se normalizan los valores y se recalcula  $V_b$  sustituyendo los valores normalizados en la Ecuación (7).

$$\left. \begin{array}{l} R_{5V1}^{\mathbb{R}} = 100k\Omega \\ R_{5V2}^{\mathbb{R}} = (100k + 8k2)\Omega \end{array} \right\} V_b^{\mathbb{R}} = 5V$$

A la hora de normalizar los valores de  $R_{5V2}$  se ha visto apropiado realizar una asociación de dos resistencias en serie, por lo que la resistencia  $R_{5V2}$  queda representada por  $R_{5V21}$  y  $R_{5V22}$ .

Los valores normalizados se aproximan mucho al resultado teórico por lo que la tensión de salida no varía. Las resistencias de elevado valor hacen despreciable la resistencia de 4k7 por lo que la tensión no disminuirá notablemente.

## Amplificación - Ganancia

El valor de la ganancia dependerá de la respuesta del dispositivo magnetorresistivo y de los valores de salida que se deseen. En el datasheet del HMC1001 se puede obtener su sensibilidad típica [10], cuyo valor expresado en función de la alimentación del puente equilibrado  $V_b$  viene dada por la Ecuación (9).

$$S = 3.2 \frac{mV}{V} \cdot V_b \quad (9)$$

El valor de alimentación del puente equilibrado es conocido, por lo que se pueden realizar operaciones para concluir ganancia necesaria.

$$V_b = 5V \rightarrow S = 16 \frac{mV}{G} = 16 \frac{mV}{G} \cdot 0.01 \frac{G}{\mu T} = 0.16 \frac{mV}{\mu T}$$

Para obtener una lectura en tensión proporcional al campo magnético aplicado sobre el dispositivo, es necesaria una ganancia proporcional al inverso de la sensibilidad. Se va a fijar arbitrariamente una salida en tensión del dispositivo tal que una lectura de 0.1V a la salida implique un campo de  $1\mu T$ , por lo que hay que aumentar dos órdenes de magnitud. Con tales datos se puede calcular la ganancia.

$$g = \frac{100}{S} = 625 \frac{\mu T}{mV} \quad (10)$$

Una vez conocida la ganancia necesaria, es necesario averiguar la disposición que permitirá al amplificador de instrumentación tener esa ganancia. Por ello se obtiene la fórmula de la ganancia del INA128 del datasheet [11], la cual como ya se adelantó depende únicamente del valor de una resistencia.

$$g = 1 + \frac{50k\Omega}{R_g} \quad (11)$$

Despejando  $R_g$  de la Ecuación (11) y habiendo obtenido el valor de  $g$  la Ecuación (10).

$$g = 625 \rightarrow R_g = 80.13\Omega;$$

Para tener margen de maniobra a la hora de calcular la ganancia se dispondrá en serie una resistencia variable  $R_{gv}$  de valor  $10\Omega$ . Se requiere una asociación de resistencias a la que se hará

referencia como  $R_g'$  cuyo valor esté contenido en el rango  $[75.13\Omega, 85.13\Omega]$ . Los cálculos se realizarán asumiendo el valor inferior  $R_g' = 75.13\Omega$ .

$$R_g' = \frac{R_{g1}R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} = 75.13\Omega \quad (12)$$

Despejando  $R_{g1}$  de la Ecuación (12).

$$R_{g1} = \frac{R_g'R_{g2}}{R_{g2} - R_g'} \quad (13)$$

Asignando un valor normalizado a  $R_{g2}$  y sustituyendo en la Ecuación (13)

$$\left. \begin{array}{l} R_g' = 75.13\Omega \\ R_{g2} = 105\Omega \end{array} \right\} R_{g1} = 264.1\Omega$$

Por último, se busca el valor normalizado más próximo, y se recalcula  $R_g'$  sustituyendo los valores en (12).

$$\left. \begin{array}{l} R_1^{\mathbb{R}} = 270\Omega \\ R_2^{\mathbb{R}} = 105\Omega \end{array} \right\} R_g^{\mathbb{R}'} = 75.6\Omega$$

El valor deseado de  $R_g$  se encuentra en el rango de ajuste que ofrece  $R_{gv}$  conectada en serie con  $R_g'$  por lo que el cálculo es válido.

## **Amplificación - Corrección de Offset**

Se considera disponer un circuito de corrección de offset con un rango de  $[-2.5, 2.5]$  V, con la intención de cubrir sobradamente cualquier variación a la salida. El circuito se conectará a la patilla Ref del INA128, la cual actúa como un elemento sumador, permitiendo desplazar el origen de la señal amplificada [11].

El circuito de ajuste que se implementará responde al esquema mostrado en la Figura 4-3.

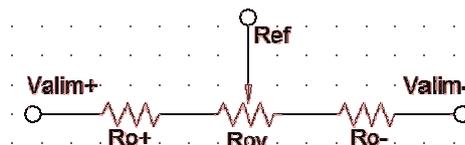


Figura 4-3: Esquema de circuito de corrección de offset.

Siendo  $R_{ov}$  una resistencia variable de  $1k\Omega$ , que en su posición central debe tener un potencial de salida cero. Si se desea un rango de corrección de  $[-2.5, 2.5]$  mV, quiere decir que si la salida de  $R_{ov}$  se desplaza totalmente hacia un extremo,  $V_{off} = 2.5V$ . Se procede a obtener los valores que cumplen dicha condición.

Al ser un circuito simétrico respecto a la posición central de  $R_{ov}$ , se puede analizar solo uno de los lados del circuito y aplicar los resultados a ambos. Esto da lugar a un divisor resistivo cuya expresión se corresponde con la Ecuación (14).

$$V_{off} = \frac{\frac{R_{ov}}{2}}{\frac{R_{ov}}{2} + R_{o+}} V_{alim+} \quad (14)$$

Se despeja  $R_{o+}$ .

$$R_{o+} = \frac{R_{ov} \cdot V_{alim+}}{2V_{off}} - \frac{R_{ov}}{2} \quad (15)$$

Conocidos los valores de  $V_{ref}$ ,  $V_{alim+}$  y  $R_{ov}$  se calcula  $R_{o+}$  sustituyendo en la Ecuación (15).

$$\left. \begin{array}{l} V_{alim+} = 10V \\ V_o = 2.5V \\ R_{ov} = 1k\Omega \end{array} \right\} R_{o+} = 1500\Omega$$

Para aproximar ese valor se utilizarán dos resistencias en serie. A las que se hará referencia como  $R_{o+1}$  y  $R_{o+2}$  y, análogamente para la parte negativa,  $R_{o-1}$  y  $R_{o+2}$ .

$$R_{o+}^{\mathbb{R}} = R_{o-}^{\mathbb{R}} = (315 + 1000)\Omega$$

Sustituyendo el valor normalizado de las resistencias del circuito de corrección de offset en la Ecuación (14) se obtendrá el rango de tensión real.

$$R_{o+}^{\mathbb{R}} = (315 + 1000)\Omega \rightarrow V_{off}^{\mathbb{R}} = 2.75V$$

El rango deseado queda sobradamente cubierto.

## Circuito de Set-Reset

Uno de los elementos indispensables que hay que incorporar al HMC1001 es un circuito que reoriente los dominios magnéticos, ya que si este proceso no se realiza de una forma o de otra, la histéresis magnética afecta muy negativamente a la repetitividad de la medida [10].

El circuito más simple de Set-Reset es un condensador que se carga positiva o negativamente, y al descargarse provoca un Set o un Reset dependiendo de si se cargó positiva o negativamente. Para ello se dispondrá un condensador con conexiones a la alimentación positiva y negativa, que se cargará mediante contacto manual, con una disposición que se corresponda a la que muestra la Figura 4-4: Circuito de Set/Reset.

Para la apropiada reorientación de los dominios magnéticos es necesario un pulso de corriente  $I_R=3-4$  Amperios (dependiendo de la intensidad del campo) de  $1\mu s$  de duración, con cuidado de que la caída del pulso nunca baje de cero [10].

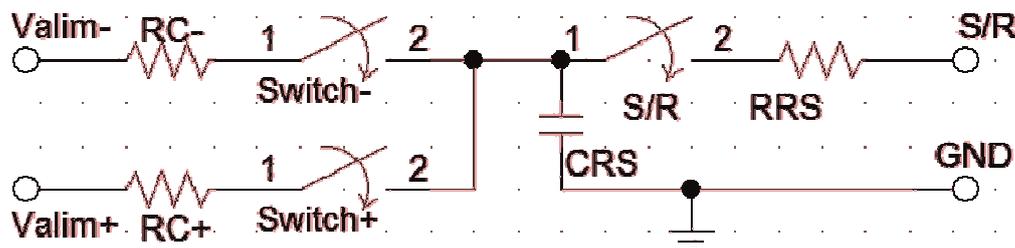


Figura 4-4: Circuito de Set/Reset.

Tomando el valor medio del rango de corriente y conociendo el valor de la tensión de alimentación, la Ecuación (16) muestra el valor de la resistencia apropiada. Recuérdese que la alimentación es simétrica por lo que el cálculo en valor absoluto es apropiado.

$$R_T = \frac{|V_{alim}|}{I_R} = \frac{10V}{3.5A} = 2.85\Omega \quad (16)$$

$R_T$  se corresponde con una asociación de resistencias en serie; por un lado la resistencia de las bobinas internas de reorientación con un valor típico de  $R_{SR} = 1.5\Omega$ , y la resistencia  $R_{RS}$  dispuesta como parte del diseño para alcanzar el valor que sea necesario. Calculado el valor del conjunto en la Ecuación (16), el valor de  $R_{RS}$  se calcula en la Ecuación (17).

$$R_{RS} = R_T - R_{SR} = 1.35\Omega \quad (17)$$

Buscando el valor normalizado más próximo se obtendrá a su vez el valor normalizado del conjunto.

$$R_{SR}^{\mathbb{R}} = 1.2\Omega \rightarrow R_T^{\mathbb{R}} = 2.7\Omega \quad (18)$$

El condensador se cargará negativa o positivamente cuando S/R está abierto y se cierre Switch- o Switch+, respectivamente. Para controlar que la carga no se haga bruscamente se limitará la corriente de entrada mediante las resistencias  $R_{C-}$  y  $R_{C+}$  entre la alimentación y los interruptores.

La descarga ocurrirá cuando se cierre el interruptor S/R. En tal caso, el condensador  $C_{RS}$  queda en paralelo con  $R_T$ . El producto resistencia condensador define la constante de tiempo del sistema, que debe ser de  $1\mu s$ . Esto permite plantear la Ecuación (19).

$$R_T \cdot C_{RS} = 1\mu s \quad (19)$$

Se despeja  $C_{RS}$  de la Ecuación (19).

$$C_{RS} = \frac{1\mu s}{R_T} \quad (20)$$

Ya que se ha calculado el valor normalizado de  $R_T$  en (18), se sustituye en (20).

$$R_T^{\mathbb{R}} = 2.7\Omega \rightarrow C_{RS} = \frac{1\mu s}{2.7\Omega} = 350nF$$

Aproximando al valor normalizado más próximo disponible, se obtiene el valor real del condensador.

$$C_{RS}^{\mathbb{R}} = 470nF$$

## Cálculo del error

Uno de los requisitos del TFG es conseguir un margen de error determinado, es importante asegurarse de que tal margen de error puede conseguirse en teoría. Por ello, se revisarán todos los factores críticos que afectarán a la precisión de la medida, utilizando para ello los valores ya calculados.

### Linealidad de la respuesta

Aunque no se tienen datos concretos sobre la disposición interna del puente equilibrado, En la Figura 3-2 se puede observar la disposición de los elementos resistivos. Sabiendo que es un puente equilibrado y observando la figura se pueden deducir dos datos.

- El valor de todas las magnetorresistencias debe ser el mismo para un valor cero de campo magnético (respuesta nula del puente equilibrado).
- La disposición enfrentada de las magnetorresistencias induce a pensar que su respuesta es simétrica; esto es, frente a un campo magnético en su eje sensible, unas aumentarán su valor de resistencia y otras lo disminuirán.

Bajo estas dos consideraciones, se modela el puente equilibrado de magnetorresistencias acorde con lo dispuesto en la Figura 4-5, disponiendo los elementos de la misma forma que aparecen en el esquema de la Figura 1-6.

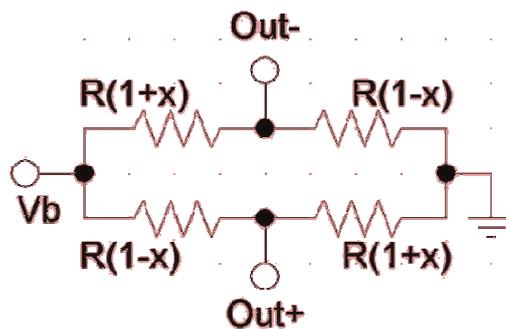


Figura 4-5: Modelización del puente equilibrado del HCM1001.

Se procede al análisis matemático del puente equilibrado planteando las Ecuaciones (21) y (22).

$$Out_+ = \frac{R(1+x)}{R(1-x) + R(1+x)} V_b = \frac{R(1+x)}{2R} V_b = \frac{(1+x)}{2} V_b \quad (21)$$

$$Out_- = \frac{R(1-x)}{R(1+x) + R(1-x)} V_b = \frac{(1-x)}{2} V_b \quad (22)$$

Llamando  $V_s$  a la diferencia de tensión entre  $Out_+$  y  $Out_-$ , se puede definir la siguiente expresión utilizando la Ecuación (21) y la Ecuación (22).

$$V_s = Out_+ - Out_- = \frac{(1+x)}{2} V_b - \frac{(1-x)}{2} V_b = \frac{2x}{2} V_b = x \cdot V_b \quad (23)$$

Derivando el resultado de la Ecuación (23) se puede obtener el error de salida.

$$\Delta V_s = \frac{\partial V_s}{\partial x} = V_b \quad (24)$$

Bajo las suposiciones realizadas, puede verse en la Ecuación (23) que la respuesta  $V_s$  es totalmente lineal respecto a la variación de las magnetorresistencias, y en la Ecuación (24) que el error es proporcional al valor de alimentación. Sin disponer de datos adicionales, puede suponerse que configuraciones adicionales no mejorarían la respuesta del dispositivo.

### Error de linealidad

En el datasheet puede encontrarse un dato para el error de linealidad [10]. El error de linealidad máximo para el rango de  $\pm 1$  Gauss aparece como 0.5 %FS. Siendo FS 4 Gauss:

$$\%FS = \frac{dv}{V_{FS}} \cdot 100; V_{FS} = 16 \frac{mV}{G} \cdot 4 G = 64mV; dv = 0.32mV \quad (25)$$

El error de linealidad máximo es de  $\frac{0.32}{0.16} = 2\mu T$ , lo cual duplica el margen de error establecido. No obstante, es un caso extremo, por lo que no se considera crítico a priori. Se estima conveniente hacer ensayos de linealidad con un primer prototipo para evaluar la conveniencia de técnicas que reduzcan este error.

### Offset Inicial

Considerando que el offset máximo del INA128 es de  $50\mu V$  [11] y que la ganancia deseada es de 625 calculada en la Ecuación (10), se espera un offset a la salida de  $31mV$ . El valor queda claramente en el rango del circuito de corrección de offset, por lo que se desestima su efecto.

### Deriva del Offset con la temperatura

En el datasheet del INA128 se obtiene la expresión de la Ecuación (26) para la deriva de offset máxima [11].

$$O = 1 + \frac{20}{g} \left[ \frac{\mu V}{^{\circ}C} \right] \quad (26)$$

Conocido  $g$  se puede obtener un valor de deriva de offset en un caso de funcionamiento estándar, como por ejemplo a  $25^{\circ}C$ . Sustituyendo dichos valores en la Ecuación (26).

$$O_{25^{\circ}C} = \left( 1 + \frac{20}{625} \right) \cdot 25^{\circ}C = 25.8 \mu V$$

El dispositivo puede considerarse calibrado para esa temperatura. Asumiendo una variación de temperatura en el entorno de trabajo de 0 a 50°C, se conoce que la variación de tensión a 0°C es 0, y se puede calcular sustituyendo una vez más en la Ecuación (26)

$$O_{50^{\circ}C} = \left(1 + \frac{20}{625}\right) \cdot 50^{\circ}C = 51.6 \mu V$$

Asumiendo dichas temperaturas de trabajo como ciertas, la deriva de tensión con la temperatura inducirá un error de  $\pm 25.8 \mu V$ .

### *Error relativo de la deriva de offset*

Se estima una magnitud del campo magnético terrestre próxima a los  $30 \mu T$ , basándonos en medidas recientes realizadas por el Área de tecnología electrónica. Para sobredimensionar el error, se calculará la respuesta del HCM1001 para una medida de  $50 \mu T$ , usando el valor de Sensibilidad para el valor de alimentación fijado calculado en la Ecuación (9).

$$0.16 \frac{mV}{\mu T} \cdot 50 \mu T = 8 mV$$

Se calcula el error relativo de la medida respecto a la deriva de offset, ya que el offset inicial se controlará con el circuito de ajuste.

$$\frac{25.8 \mu V}{8 mV} = 0.003$$

Un error inferior al 1% es tolerable. Siempre y cuando el dispositivo sólo se encuentre afectado por el error de la deriva de offset, cumple teóricamente los requisitos especificados.

## **4.2.- Diseño del circuito**

Para el diseño de la placa se ha utilizado el paquet OrCAD, como ya se describió en el apartado *Métodos*. La Figura 4-6 muestra el esquema realizado en OrCAD Capture.

La etapa de alimentación con los dos reguladores puede verse en la parte izquierda, mientras que el resto del circuito queda organizado en la parte derecha.

En la parte superior del circuito queda el circuito de Set-Reset, y en la parte inferior la referencia TL431 que da alimentación al HMC1001, que aparece a la derecha del circuito de Set/Reset, apropiadamente referenciado.

Justo bajo el HMC1001 se aprecia el INA128, con la asociación de resistencias de ganancia  $R_g$  a la izquierda, y el circuito de ajuste de Offset en la parte superior derecha. La salida del circuito (etiquetada como OUT) queda justo a la derecha del amplificador.

Hay dos elementos que no se han considerado a lo largo del proceso de diseño específico, ya que su necesidad se percibe al ver el conjunto ensamblado. Son las resistencias  $R_{p+}$  y  $R_{p-}$ , que conectan las entradas del INA128 a tierra. Estas resistencias de valor muy elevado tienen como objetivo disipar las corrientes parásitas que pueden falsear la medida, e incluso saturar el dispositivo.

A continuación la Figura 4-7 muestra el resultado de diseño del circuito físico. Los componentes se encuentran apropiadamente etiquetados para poder reconocerlos y que sea fácil transcribir del esquema al dispositivo físico.

El HCM1001 aparece marcado como SENSE, y aunque venga preparado para montaje de orificio pasante no se disponen de brocas de tamaño apropiado (0.5mm), por eso se ha creado una huella de montaje superficial, soldando el zócalo en el que luego se insertará el circuito integrado lo más horizontal que se pueda.

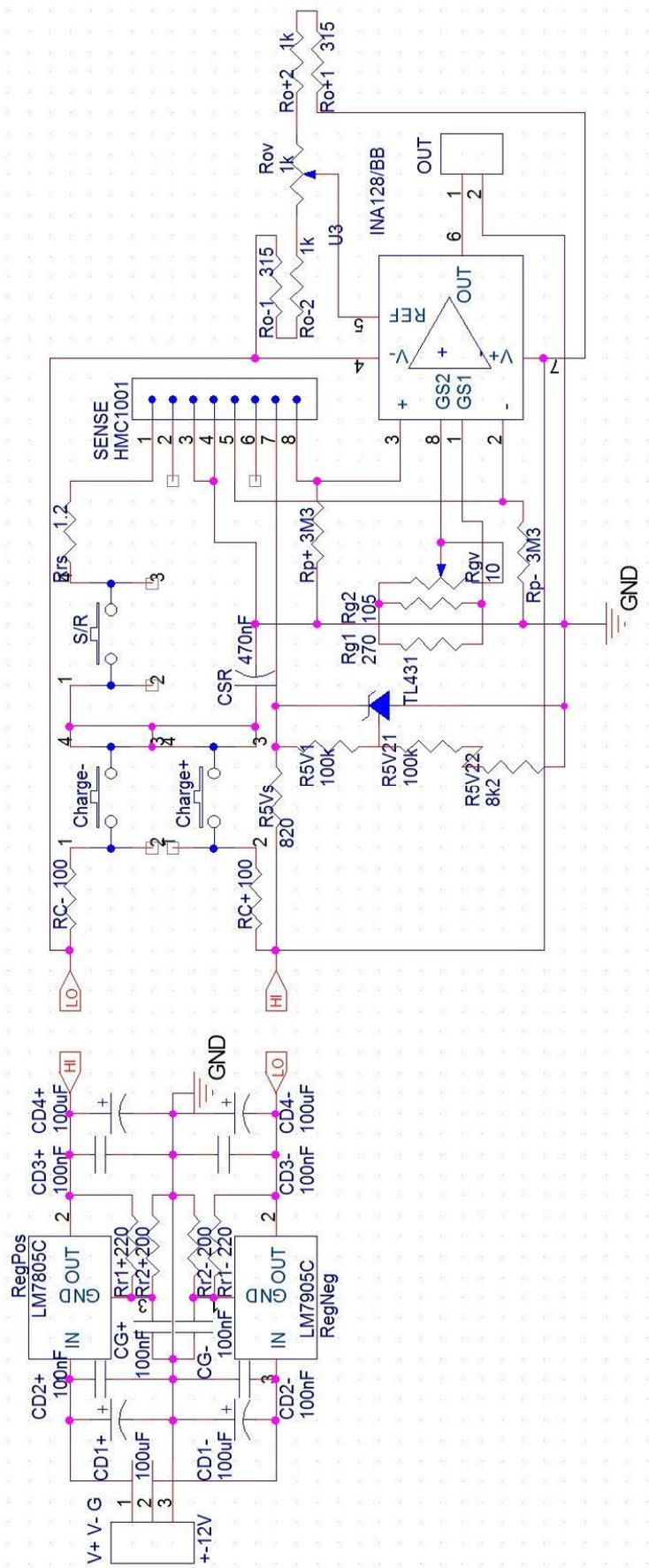


Figura 4-6: Esquema del prototipo de sensor magnetorresistivo.

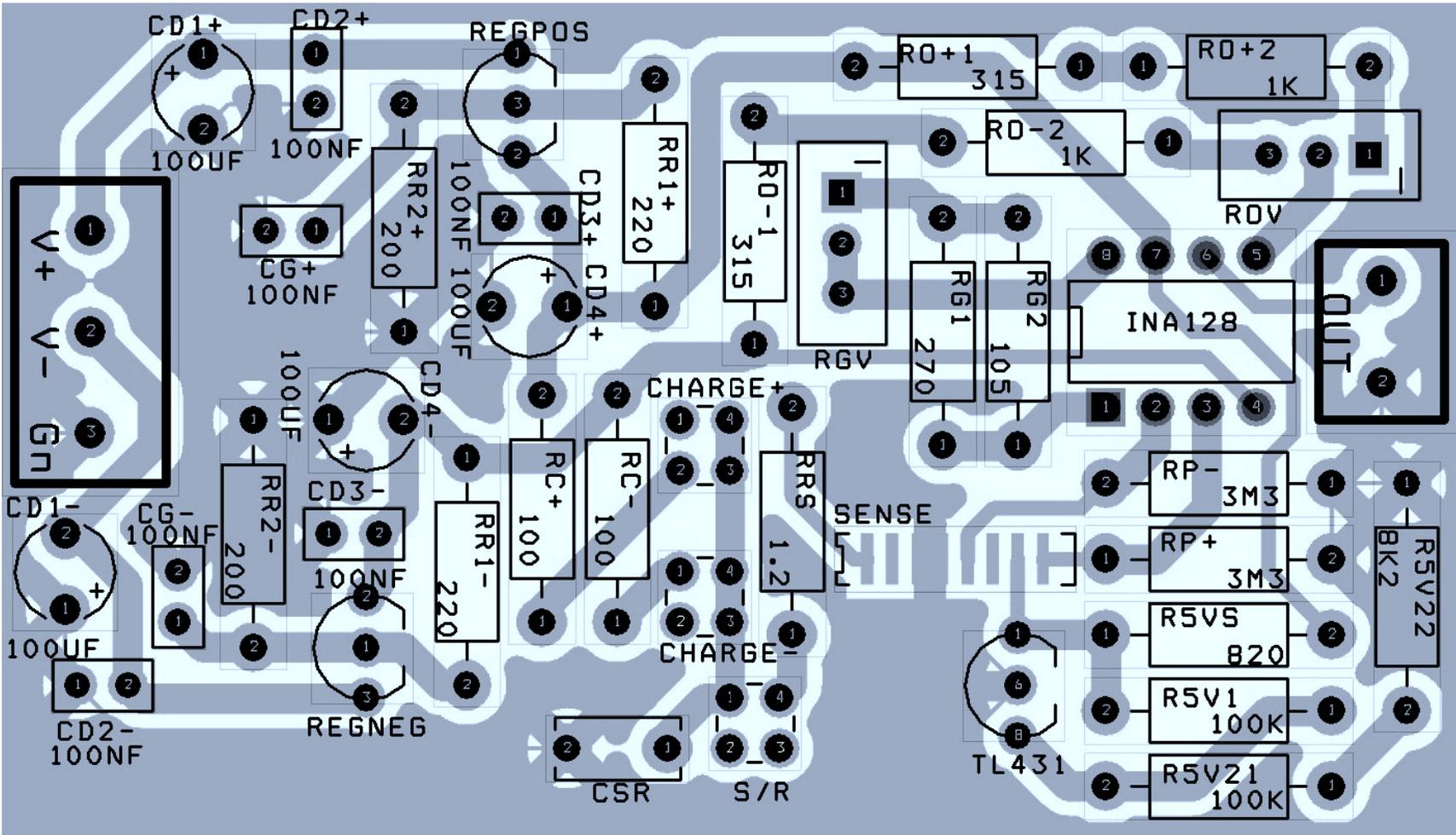


Figura 4-7: Plano (layout) del circuito para su implementación física.



# Capítulo 5.- Ensayos y Resultados

---

*En este capítulo se describen las pruebas realizadas; su objetivo, planteamiento, desarrollo y medidas obtenidas, describiéndolo paso a paso y documentado con imágenes.*

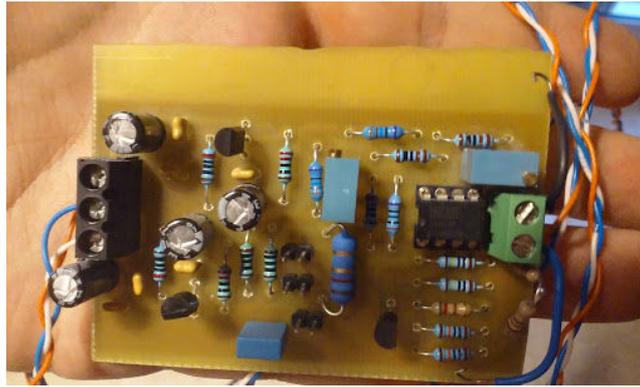
Tener el dispositivo implementado es la mitad del trabajo, o menos. No es sino mediante la prueba y la observación que se puede conseguir el funcionamiento apto del circuito. En primer lugar se presentará el mismo, posteriormente describiendo los ensayos.

## 5.1.- El prototipo

En la Figura 5-1 se muestra una imagen del prototipo finalizado y con los componentes instalados.

Ha sido diseñado de forma que la salida pueda leerse con un voltímetro en la escala adecuada, y posee un margen dinámico próximo a los  $\pm 90\mu\text{T}$ .

La Figura 5-2 muestra el detalle del dispositivo integrado en la parte inferior de la placa; se ha dispuesto el circuito de esa forma para intentar que quede lo más horizontal posible a la hora de realizar las medidas.



**Figura 5-1: Prototipo montado.**



**Figura 5-2: Detalle de la parte inferior del circuito.**

Lo primero que se debe comprobar es que el circuito se comporta de la forma esperada; para esto se acudió al laboratorio, no sólo para tener a mano el instrumental con el que realizar las medidas apropiadas, sino también tener las herramientas necesarias para reparar cualquier defecto que se detecte.

## **5.2.- Ensayos en el laboratorio**

Todas las pruebas en el laboratorio tienen como objetivo comprobar el correcto funcionamiento de los elementos del circuito. Durante estas pruebas se detectaron y corrigieron fallos que permitieron garantizar la funcionalidad del circuito para las pruebas de campo, obteniendo el prototipo que se ha comentado en esta memoria.

A continuación se describen brevemente las pruebas realizadas.

### **Comprobación de funcionamiento**

Tras conectar el circuito a alimentación y disponer un polímetro a su salida, se comprobó que era sensible a la posición y orientación, variando sus valores cuando se movía por el laboratorio.

## Set/Reset

Tras un tiempo encendido, se comprueba como conectar los contactos de carga y descarga provocan set y reset. Se puede comprobar porque la medida cambia de sentido con el set, y vuelve a recuperar el sentido definido con un reset.

## Comprobación de valores

Utilizando un polímetro, se tomaron medidas de tensión en los puntos notables del circuito como la salida de los reguladores y la referencia, la salida del circuito de corrección de offset, y la carga y descarga del condensador.

## Margen dinámico

Aproximando un imán al dispositivo, y girándolo a su alrededor se llevó a la saturación en ambos sentidos, comprobando así el margen dinámico.

## Precalibración

El campo magnético en el interior del laboratorio es inestable, debido a la gran cantidad de equipo electrónico y al hecho de estar en el interior de un edificio con estructura de hierro. A pesar de la inestabilidad del laboratorio se puede realizar una primera aproximación al centro de la escala orientando el circuito en la dirección que marque la mayor medida en valor absoluto, luego girándola 180º y anotando ambas medidas. A continuación se utiliza el ajuste de offset intentando que ambas medidas tengan el mismo valor absoluto, y se repite el proceso.

Tras realizar las comprobaciones en laboratorio, se procede a realizar medidas reales. Para esto es necesario alejarse de las estructuras y los elementos electrónicos, por lo que las medidas se realizaron en el exterior.

## 5.3.- Ensayos en campo

Para calibrar un circuito de instrumentación siempre se parte de dos premisas básicas; situar el cero y comprobar la ganancia. En un sensor magnético, el primer punto es complicado de satisfacer, ya que no hay ningún lugar natural en las proximidades de la provincia de Almería que tenga campo magnético cero; es el mismo fenómeno que queremos medir el que nos dificulta la calibración.

Para poder contrarrestar el campo magnético terrestre se utilizará una bobina de Helmholtz, pero antes es necesario tener un valor fiable y actualizado del campo magnético terrestre.

Todos estos ensayos se realizaron en el exterior para evitar las interferencias magnéticas provocadas por las estructuras y los aparatos eléctricos en funcionamiento.

### Medida del campo geomagnético con sensor de inducción.

En primer lugar, se obtuvo una medida del campo magnético usando el sensor de inducción mostrado en la Figura 3-7. El proceso de medida consiste en obtener una lectura en la que se pueda ver un periodo de una onda senoidal. De él se extrae la frecuencia y la amplitud, y sustituyendo en la Ecuación (3) se obtiene un valor de campo magnético. Se puede ver una fotografía de una de estas medidas, junto con los valores obtenidos con los cursores, en la Figura 5-3. Se considera el valor del campo magnético la media de tres medidas realizadas, que pueden observarse en la Ecuación (27).

$$\left. \begin{array}{l} 4.032 \text{ Hz}, 25.75 \text{ mV}_{pp} \rightarrow |B| = 25.6 \mu\text{T} \\ 3.45 \text{ Hz}, 22.25 \text{ mV}_{pp} \rightarrow |B| = 25.93 \mu\text{T} \\ 4.587 \text{ Hz}, 30.750 \text{ mV}_{pp} \rightarrow |B| = 26.94 \mu\text{T} \end{array} \right\} |\bar{B}| = 26.16 \mu\text{T} \quad (27)$$

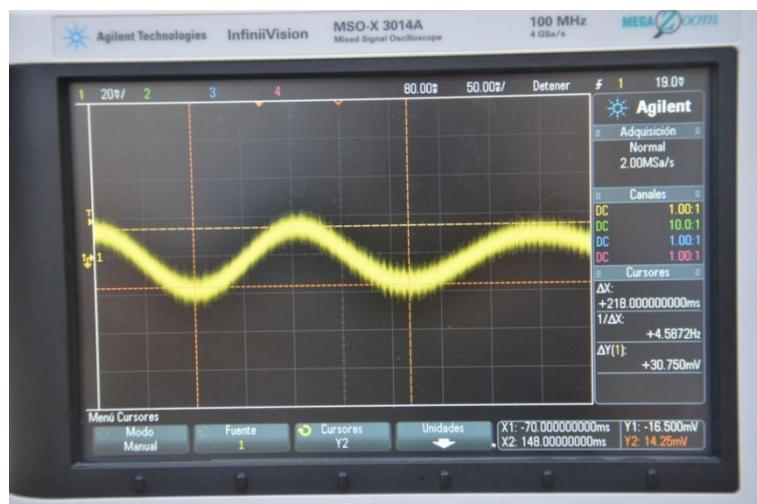


Figura 5-3: Medida del sensor de inducción.

Para corroborar estas medidas se accedió a la web del Instituto Geográfico Nacional, en la cual se ofrecen medidas del campo magnético terrestre en tiempo real en tres de los observatorios que poseen [5]. En la Figura 5-4 se puede observar el magnetograma en San Pablo, Toledo, el día que se realizaron las medidas. Su localización es suficientemente próxima como para poder considerarlo como referencia a la hora de validar las medidas realizadas.

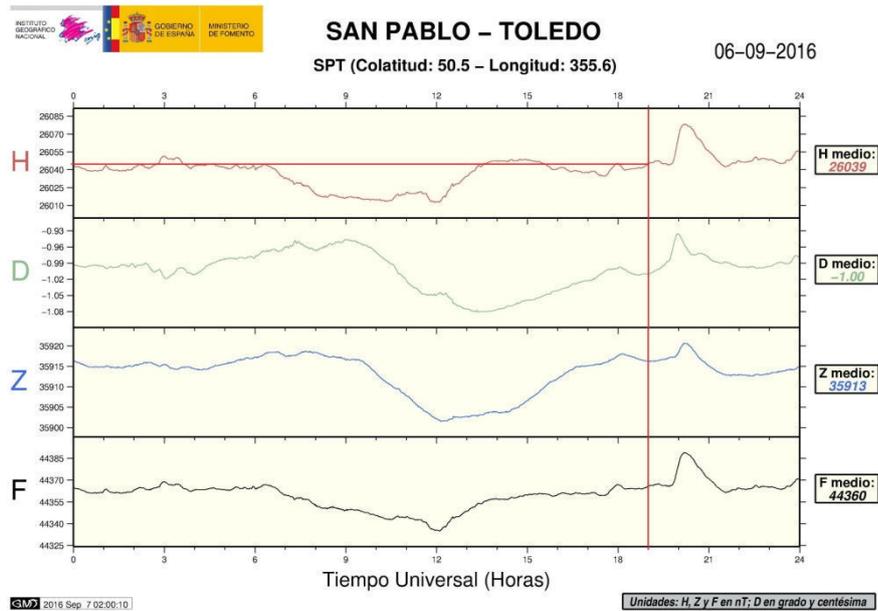


Figura 5-4: Magnetograma [5].

De las gráficas que se muestran en la figura anterior, es de interés la etiquetada como H, ya que se corresponde al valor de la componente horizontal del campo magnético terrestre. Es decir, la que se ha medido. Se ha marcado con una línea roja la hora a la que se realizaron las medidas, y puede comprobarse cómo la diferencia entre la medida realizada con el sensor de inducción y la registrada por el observatorio difiere en el orden de las décimas de microTesla.

Esto se considera suficiente para dar los datos por validados. Con él, se podrán calcular los parámetros de la bobina de Helmholtz que le permitirá anular el campo magnético.

### Anulación de campo magnético

Una vez que se tiene una medida de campo magnético en la componente horizontal H se sustituye en la Ecuación (2), considerando que n ya es conocida (154 espiras) y que  $\mu_0$  es la constante de permeabilidad magnética. Esto nos permite calcular la corriente que hay que transmitir a las bobinas para que generen un campo que anule al campo magnético terrestre. En la Ecuación (28) se muestra el resultado de despejar la corriente en la Ecuación (2) y el valor de corriente necesario.

$$|B| = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n I_{HC}}{r} \rightarrow I_{HC} = \frac{|B| r}{\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \mu_0 n} = 37.8 \text{ mA} \tag{28}$$

A continuación se dispone la bobina de Helmholtz orientadas hacia el norte con la ayuda de una brújula ultrasensible, tal y como muestra la Figura 5-5.



**Figura 5-5: Disposición inicial de la bobina de Helmholtz.**

Una vez que las bobinas están adecuadamente orientadas, se las alimenta con el valor de corriente calculado en la Ecuación (28). Para comprobar que el campo magnético ha quedado anulado, se hace girar la brújula lentamente en el centro de las bobinas de Helmholtz y se observa como la aguja se desplaza en el giro en lugar de apuntar al norte.

En la Figura 5-6 puede apreciarse como la brújula se ha girado casi 90 grados y la aguja ha acompañado el giro, apuntando hacia el este. Idealmente la posición de la aguja no debería de variar, pero la inercia del movimiento de la aguja respecto al que se le aplica al soporte de la brújula ha causado la desviación que se observa.

Mantener un espacio con campo magnético nulo permite por fin la calibración del prototipo, procediendo a utilizar los elementos de ajuste para obtener una medida muy próxima a cero en el interior de la bobina de Helmholtz. Además, este ensayo sirve a modo de validación de las medidas realizadas.



Figura 5-6: Brújula apuntando al este en el interior de la bobina de Helmholtz.

### Calibración - Ajuste al origen.

Una vez que se ha conseguido anular los efectos del campo magnético terrestre en el interior de la bobina de Helmholtz se introduce en ella el circuito, alimentándolo con baterías y con un polímetro de precisión conectado a la salida. Observando el valor de salida se varía la posición de la resistencia variable hasta obtener un valor próximo a cero.

La Figura 5-7 muestra las lecturas del sensor magnético tras haber utilizado la resistencia variable de corrección de offset para obtener, en efecto, un valor próximo a cero.



Figura 5-7: Sensor magnético calibrado al origen.

Una vez que el dispositivo tiene su escala centrada, sólo queda exponer al dispositivo al campo magnético terrestre y ajustarlo una vez más para que la respuesta de éste corresponda con las medidas anteriores.

## Calibración - Ajuste de ganancia

Tras desconectar la bobina de Helmholtz para que no cause interferencias, se deja el dispositivo en el suelo orientado hacia el norte, y se varía el valor de la resistencia variable en la ganancia hasta obtener un valor próximo a los  $26\mu\text{T}$ . La Figura 5-8 muestra los resultados.



Figura 5-8: Lecturas del magnetómetro en orientación norte y este.

Con esta prueba, se considera que el sensor cumple las especificaciones que se plantearon a priori, a falta de comprobar otras características como la repetitividad de la medida, y su comportamiento en periodos largos de funcionamiento.

Es en este tipo de pruebas en las que toma relevancia el circuito Set/Reset cuyo objetivo es eliminar la histéresis magnética, principal motivo de error en procesos de funcionamiento a largo plazo.

## Uso de Set/Reset

Se ha podido comprobar el funcionamiento de esta sección del circuito; en efecto, al cargar el condensador positivamente y descargarlo posteriormente (Set) los dominios magnéticos cambiaban de sentido) determinado por el cambio de signo de la medida) para volver al sentido normal tras cargarlo negativamente y descargarlo.

Este proceso se realizó antes de cada medida por recomendación del fabricante.

# Capítulo 6.- Conclusiones

---

*En base a la experiencia obtenida en el diseño y ensayo del sensor magnético, se plantean las mejoras que se pueden realizar en el dispositivo a corto plazo, y las posibilidades que abre a la realización de futuros trabajos a medio y largo plazo.*

La conclusión que se obtiene de este trabajo es que realmente se puede construir un magnetómetro con precisión suficiente para medir el campo magnético terrestre utilizando sensores magnetorresistivos. El prototipo obtenido así lo demuestra, tomando medidas con la precisión requerida sin haber aplicado ninguna técnica avanzada.

Por extensión, queda probada la funcionalidad del dispositivo HMC1001, pero es también destacable la comodidad de instalar dicho dispositivo. Y se trata de un sistema estático que no produce perturbaciones en detectores sensibles a variaciones de corriente cercanas. Su montaje en puente equilibrado hace de algo tan ajeno a priori como un sensor magnético en un proyecto que un alumno competente puede comprender y manipular.

Adicionalmente, se ha podido comprobar la diferencia existente en la magnitud del campo magnético en el interior de un edificio respecto al exterior. La interferencia provocada por la

estructura metálica y las conexiones eléctricas invalida cualquier tipo de medida realizada en interiores.

## **6.1.- Mejoras a corto plazo**

La sensibilidad del componente a la variación de orientación vertical es muy superior a la esperada. Por ello, un soporte inadecuado dificulta el proceso de medida en un eje específico. Para prevenir el movimiento se intentara inmovilizar el circuito a un soporte que sea fácilmente manipulable, y permita orientarlo adecuadamente, y sujetar los cables para evitar inconvenientes.

Como parte del estudio de la viabilidad del dispositivo, es conveniente realizar también un conjunto de medidas que abarquen un largo periodo de tiempo, para así poder estudiar problemas con la repetitividad o deriva de la señal.

## **6.2.- Futuros trabajos**

Como ya se comentaba en el capítulo *Introducción*, una de las razones para elegir la tecnología magnetorresistiva era la escalabilidad. Sirviendo el prototipo de prueba de concepto, se considera viable llevar el concepto más allá y realizar un sensor magnético con tres transductores en cuadratura, para poder realizar medidas vectoriales. Para este cometido se cuenta con el dispositivo de Honeywell HMC1002, un dispositivo que incorpora dos puentes equilibrados en cuadratura.

Adicionalmente, y con la intención de aplicar técnicas digitales de tratamiento de datos, se dispondrá un convertidor analógico – digital y un microcontrolador que automatice los procesos necesarios (como el set/reset) y que procese y almacene las medidas en una memoria externa.

Por último, se estudiará la viabilidad de disponer un puerto de comunicaciones inalámbrico para poder acceder a los datos telemáticamente.

Una vez integrados esos tres elementos adicionales, se unificarán en el desarrollo de un sistema de medida completo basado en microcontrolador, capaz de medir los ejes H y Z y ofrezca una salida de magnitud absoluta F, incorporando un puerto RS485 y Ethernet. Esto representa un objetivo concreto de trabajo a medio/largo plazo.

Una vez llegado a este punto, el magnetómetro puede cumplir su propósito original de incorporarse al resto de sensores instalados en Calar Alto por el grupo de Investigación de Electrónica, Comunicaciones y Telemetría (TIC-017) con la intención de medir las resonancias Tierra – Ionosfera, y poder contrastar las medidas magnéticas con las medidas del resto de sensores.



# Bibliografía

---

- [1] R. M. García Salvador, J. A. Gázquez Parra, and N. N. Castellano, "Characterization and modeling of high-value inductors in ELF band using a vector network analyzer," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 2, pp. 415–423, 2013.
- [2] J. A. G. Parra, M. F. Ros, N. N. Castellano, and R. M. G. Salvador, "Techniques for Schumann Resonance Measurements : A Comparison of Four Amplifiers With a Noise Floor Estimate," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 10, pp. 2759–2768, 2015.
- [3] W. O. Schumann, "Über die Stralunglosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel die von luftschicht und einer ionospärenhle umgeben ist," *Z. Naturforschaffung*, vol. 7a, pp. 149–154, 1955.
- [4] Y. Hugh D., F. Roger A., and F. A. Lewis, *Física Universitaria con física moderna*, vol. 2. 2009.
- [5] Instituto Geográfico Nacional, "Instituto Geográfico Nacional." [Online]. Available: [www.ign.es](http://www.ign.es).
- [6] M. Gurnis and B. A. Buffett, "Earth's Core and the Geodynamo," vol. 288, no. June 2000, pp. 2007–2012, 2007.
- [7] C. Gauss, "The intensity of the Earth's magnetic force reduced to absolute measurement," *Transl. from Ger. by Susan P. ...*, no. July, 1995.
- [8] S. a Macintyre, "Magnetic field measurement," *CRC Press LLC*, pp. 16–18, 1999.
- [9] W. Thomson, "On the Electro-Dynamic Qualities of Metals : Effects of Magnetization on the Electric Conductivity of Nickel and of Iron," 1857.
- [10] Honeywell International INC, "1- and 2-Axis Magnetic Sensors. HMC1001, 1002, 1021, 1022."
- [11] Burr-Brown, "Precision, Low power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS INA128-INA129," *Datasheet*.
- [12] National Semiconductor, "LM78LXX Series 3-Terminal Positive Regulators LM78LXX Series

- 3-Terminal Positive Regulators LM78LXX Electrical Characteristics LM78L05 LM78L62AC," *Datasheet*.
- [13] Texas Instruments, "LM79LXXAC Series 3-Terminal Negative Regulators LM79LXXAC Series 3-Terminal Negative Regulators," *Datasheet*.
- [14] Texas Instruments, "TL431, TL431A adjustable precision shunt regulators," *Datasheet*.



Existen diversas hipótesis sobre el origen de la vida en la Tierra, pero de lo que no cabe duda es que jamás habría prosperado si no fuera por la existencia del campo magnético terrestre. Éste actúa como un escudo frente a las radiaciones exteriores principalmente del sol, sin el cual nuestro planeta sería un yermo desolado, muy parecido a nuestro vecino Marte.

El magnetismo era un fenómeno ya conocido en la antigua Grecia y China; se conoce que estos últimos utilizaban la brújula como método de navegación antes del siglo IX. No obstante, las primeras evidencias de considerar la Tierra como un imán se tienen en los escritos de William Gilbert (Siglo XVII), y no fue hasta la década de 1830 que Carl Friedrich Gauss midió la intensidad del campo magnético terrestre por primera vez.

En la actualidad, gracias al desarrollo tecnológico y a un mayor entendimiento de los principios físicos del electromagnetismo, no es necesario poseer caro instrumental o realizar complicados cálculos para poder efectuar mediciones del campo magnético terrestre.

En este Trabajo Fin de Grado se detalla paso a paso como construir un sensor magnético funcional con la precisión suficiente para medir la intensidad de nuestro escudo protector en un lugar determinado. Todo lo necesario para la construcción de dicho sensor puede encontrarse aquí, desde las opciones exploradas y los conceptos teóricos relacionados hasta los cálculos y diseños necesarios, pasando por los procedimientos utilizados. El trabajo concluye con los resultados de un prototipo finalizado y comparándolos con las medidas de otros sensores cuya precisión ya ha sido demostrada para validar los mismos.

There are different hypotheses that try to explain the origin of life on Earth, but what's beyond any shadow of doubt is that life would never flourish without Earth's magnetic field. It acts as a shield against external radiations coming mainly from the Sun, and without that protection our planet would be a barren wasteland, pretty much like our neighbour planet Mars.

Magnetism is a physical phenomena already known by the ancient Greek and Chinese cultures; it is known that the latter already used compasses by the IX century. Nonetheless, the first evidence Earth being considered as a giant magnet come from the works of William Gilbert (XVII century), and not until the decade of 1830 was its magnitude measured by Carl Friedrich Gauss.

Luckily, nowadays expensive instruments nor elaborate math aren't needed to appropriately measure the Earth magnetic field, thanks to both technological development and a deeper understanding of the physical principles of electromagnetism.

This final dissertation includes step by step detailed instructions of how to build a fully functional magnetic sensor, with enough precision to measure our protective shield's force intensity in a given place. Everything required to make the sensor is here; from the considered options to the underlying theory to the required calculation and design. The report concludes with the results of a working prototype and comparing them with the measurement results of other sensors which precision has already been proved.

