

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial

Autora: María de los Ángeles Galvarro Cano

Tutores: Pedro Luis Cruz Romero

Francisco de Paula García López

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Diseño de un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial

Autora:

María de los Ángeles Galvarro Cano

Tutores:

Pedro Luis Cruz Romero

Francisco de Paula García López

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Diseño de un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial

Autor: María de los Ángeles Galvarro Cano

Tutores: Pedro Luis Cruz Romero
Francisco de Paula García López

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

La elaboración de este Trabajo de Fin de Grado no hubiera sido posible sin la ayuda de numerosas personas a las que les estoy muy agradecida.

En primer lugar, agradecer a mis tutores de este proyecto, Pedro Cruz y Francisco de Paula, que me han apoyado y ayudado durante toda la elaboración del mismo.

Agradecer también a mis compañeros y amigos del Grado, que me han acompañado a lo largo de estos cuatro años.

Por último, agradecer a mi familia, que siempre ha tratado de apoyarme y aconsejarme en todo lo que les ha sido posible.

María de los Ángeles Galvarro Cano

Sevilla, 2018

El objetivo de este proyecto es el diseño de un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial. Esto es, un aparato capaz de medir el campo magnético de una máquina o dispositivo eléctrico en varios puntos de su superficie. Con estas medidas, se puede obtener el patrón que sigue dicho campo magnético.

La finalidad de este registrador es la de detectar posibles anomalías en el patrón del campo magnético medido, lo que puede resultar muy útil, por ejemplo, en operaciones de mantenimiento de máquinas.

Para llevar a cabo el diseño se ha realizado una búsqueda exhaustiva de los diferentes elementos que lo componen, entre los que cabe destacar el sensor de campo magnético. También se han empleado diversos programas, como SIMULINK de Matlab para la simulación de los circuitos; Proteus para el diseño de las placas; o el entorno de desarrollo IDE de Arduino para la programación de la placa de control.

Abstract

The goal of this project is the design of a portable device which can measure uniaxial magnetic field. The magnetic field in several points of a machine surface can be known thanks to this device, so the pattern of the magnetic field can be determined.

The objective of this device is to detect faults in the patterns. This can be very useful in different kinds of works and activities, such as the machine maintenances.

A thorough research has been made in order to select the best components for the design. For instance, the selection of the magnetic sensor is one of the most important parts of this project. Several programs have also been used for the development of the Project, such as: Simulink for the circuit simulations; Proteus for the design of the boards; and IDE of Arduino to program the Arduino board.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
2 Selección del sensor de campo magnético	3
2.1. <i>Clasificación de los sensores de campo magnético</i>	3
2.1.1 Sensores Inductivos	3
2.1.2 Sensores de efecto Hall	4
2.1.3 Sensores magnetorresistivos	5
2.2. <i>Propiedades de los sensores de campo magnético</i>	7
2.2.1 Sensibilidad	7
2.2.2 <i>Offset</i>	8
2.2.3 No linealidad	8
2.2.4 Intervalo de temperatura	8
2.2.5 Coeficiente térmico de sensibilidad	8
2.2.6 Histéresis	9
2.2.7 Tamaño	9
2.2.8 Precio	9
2.3. <i>Preselección de los sensores de campo magnético</i>	9
2.3.1 Sensores analógicos	9
2.3.2 Cálculo de incertidumbre de sensores analógicos de campo magnético	14
2.3.3 Conclusiones	17
2.3.4 Sensores digitales	17
3 Selección del lector de código de barras	23
3.1. <i>Características del lector a implementar</i>	23
3.1.1 Tipo de códigos leídos	23
3.1.2 Tecnología	24
3.1.3 Interfaz	24
3.1.4 Precio	25
3.1.5 Tamaño y peso	26
3.2. <i>Preselección del lector de código de barras</i>	26
3.2.1 DFRobot	26
3.2.2 Champtek y Adafruit Industries	27
3.2.3 Honeywell	27
3.2.4 Omron Microscan	27
3.2.5 Rakinda Technologies	28

3.2.6	ZYXRZYL, Blueskysea Technology y Aibecy	28
3.2.7	Scan Home	28
3.2.8	Yumite	28
3.2.9	Conclusiones	28
4	Selección de la placa de control	31
4.1.	<i>El microcontrolador</i>	31
4.1.1	Origen	31
4.1.2	Definición y componentes	31
4.1.3	Diferencias entre microcontrolador y microprocesador	32
4.2.	<i>Selección de la placa de control</i>	32
4.2.1	Propiedades comunes a ambas placas	32
4.2.2	Arduino	33
4.2.3	Texas Instruments	39
5	Diseño del conjunto	44
5.1.	<i>Pines del sensor HMC1001</i>	44
5.1.1	Pines Vbridge y GND	44
5.1.2	Pines S/R+ y S/R-	45
5.1.3	Pines OFFSET+ y OFFSET-	49
5.1.4	Pines Out+ y Out-	49
5.2.	<i>Acondicionamiento de señal</i>	50
5.3.	<i>Eliminación del Offset</i>	52
5.4.	<i>Implementación del lector de código de barras</i>	53
5.5.	<i>Implementación de la tarjeta de memoria</i>	55
6	Diseño de PCB	57
6.1.	<i>Características de las placas PCB</i>	57
6.1.1	Placa de acondicionamiento	57
6.1.2	Placa Set/Reset	57
6.1.3	Consideraciones para el diseño	58
6.1.4	Regulador LM317	58
6.1.5	Placas de prueba	59
7	Programación de la placa de control	61
7.1.	<i>Arduino IDE</i>	61
7.2.	<i>Funcionamiento del dispositivo</i>	61
7.3.	<i>Programación de la placa</i>	61
7.3.1	Librerías	61
7.3.2	Código implementado	62
8	Pruebas en el laboratorio	67
8.1.	<i>Lectura de medidas del sensor HMC1001</i>	67
8.2.	<i>Salida del pulso de tensión para la placa Set/Reset</i>	68
8.3.	<i>Lectura del código de barras a partir del modulo escáner DFR0314</i>	68
8.4.	<i>Almacenamiento de datos en tarjeta microSD</i>	69
9	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	71
9.1.	<i>Conclusiones</i>	71
9.2.	<i>Futuras líneas de trabajo</i>	71
	Referencias	73
	Índice de siglas y acrónimos	77
	Anexo I	79
	Anexo II	105

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Clasificación de sensores analógicos de campo magnético	10
Tabla 2.2. Sensores de Multi Dimension Technology	10
Tabla 2.3. Sensores de Honeywell	11
Tabla 2.4. Sensores de NVE Corporation	12
Tabla 2.5. Sensores de Asahi Kasei Microdevices	12
Tabla 2.6. Sensores de TDK-Micronas	13
Tabla 2.7. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 5 V	16
Tabla 2.8. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 6 V	16
Tabla 2.9. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 9 V	16
Tabla 2.10. Incertidumbre con sensor TMR2701	16
Tabla 2.11. Incertidumbre con sensor AAH002-02	17
Tabla 2.12. Clasificación de sensores digitales de campo magnético	19
Tabla 3.1. Clasificación de lectores de código de barras	26
Tabla 3.2. Segunda clasificación de lectores de código de barras	29
Tabla 3.3. Características generales del lector de código de barras RT206	30
Tabla 4.1. Propiedades Arduino Uno Rev3	37
Tabla 4.2. Propiedades Arduino Leonardo	38
Tabla 4.3. Propiedades Arduino Mega 2560 Rev3	39
Tabla 4.4. Propiedades MSP-EXP430G2	41
Tabla 4.5 Propiedades EK-TM4C123GXL	42
Tabla 5.1 Especificaciones de corriente del lector DFR0314	54

Índice de Figuras

Figura 1.1. Sensor de flujo de dispersión [2].	1
Figura 1.2. Bloques que conforman el registrador portátil	2
Figura 2.1. a) Sensor inductivo más simple b) Tres bobinas perpendiculares entre sí [6].	4
Figura 2.2. Efecto Hall para una corriente debida a partículas negativamente cargadas	5
Figura 2.3. Estructuras de elementos AMR, GMR y TMR	5
Figura 2.4. Puente de <i>Wheatstone</i>	6
Figura 2.5. Variación resistencia con ángulo de vector de magnetización y corriente [10].	6
Figura 2.6. a) Vector magnetorresistencia M sin presencia de campo b) Vector magnetorresistencia M en presencia de campo. (Configuración <i>barber pole</i>) [10].	7
Figura 2.7. Sensibilidad [12]	8
Figura 2.8. Curva de histéresis	9
Figura 2.9. Sensor Honeywell HMC1001 [22].	17
Figura 2.10. LGA de una placa base	20
Figura 3.1. Código de barras unidimensional	23
Figura 3.2. Código de barras bidimensional (código QR)	24
Figura 3.3. Tres tipos de interfaces: PS/2; RS-232 y USB	25
Figura 3.4. Módulo lector de código de barras modelo DFR0314. [35]	29
Figura 3.5. Módulo lector de código de barras bidimensional modelo RT206. [40]	30
Figura 4.1. Características generales de la placa Arduino Uno	36
Figura 4.2. Placa MSP-EXP430G2. [48]	41
Figura 4.3. Placa Arduino Leonardo. [44]	43
Figura 5.1. Pines del sensor HMC1001 [17].	44
Figura 5.2. Montaje del circuito <i>Set/Reset</i>	46
Figura 5.3. Curva Mosfet [51].	47
Figura 5.4. Simulación circuito <i>Set/Reset</i> obtenida en Simulink	49
Figura 5.5. Acondicionamiento de señal	50
Figura 5.6. Simulación acondicionamiento de señal obtenida en Simulink	52
Figura 5.7. Modificación acondicionamiento de señal para eliminar el efecto <i>offset</i>	53
Figura 5.8. Convertidor macho a DB9	54
Figura 5.9 Conector USB a 5.5 mm/ 2.1 mm 5V conector CC	55
Figura 5.10 Conexión del módulo lector de código de barras	55
Figura 5.11. Módulo lector tarjeta Micro SD	56
Figura 5.12. Conexión entre módulo de tarjeta microSD y placa de control	56
Figura 6.1. Pines del regulador de voltaje LM317	58

Figura 6.2. Montaje del regulador de voltaje LM317	59
Figura 6.3. Placa de acondicionamiento	59
Figura 6.4. Placa <i>Set/Reset</i>	60
Figura 8.1. Montaje para prueba de lectura del sensor HMC1001	67
Figura 8.2. Montaje para prueba de pulso para placa <i>Set/Reset</i>	68
Figura 8.3. Montaje para prueba de lectura del código de barras	68
Figura 8.4. Montaje para prueba de almacenamiento de datos en microSD	69

Notación

$\frac{dY}{dX}$	Derivada de la variable Y con respecto a la variable X
cos	Función coseno
Δ	Variación
G	Gauss
T	Tesla
Oe	Oersted
$1 \text{ G} = 10^4 \text{ T} = 1 \text{ Oe}$	Conversión unidades

1 INTRODUCCIÓN

Toda carga eléctrica en movimiento genera campos magnéticos. El origen de los mismos es muy variado, distinguiéndose desde el campo terrestre generado por la Tierra en su núcleo, hasta el originado en el organismo de las personas por el latido del corazón y el resto de órganos. También hay que tener en cuenta la multitud de campos procedentes de los aparatos eléctricos y otras invenciones de los seres humanos. Ante tal presencia de campos magnéticos en el medio, resulta lógico que se disponga de aparatos capaces de cuantificarlos, como magnetómetros, gaussímetros... cuyas características se mejoran y adaptan continuamente conforme a las nuevas necesidades que van surgiendo.

A continuación, se expondrán una serie de circunstancias en las que se pone de manifiesto la utilidad de la medición de campos magnéticos, aunque existen muchas otras.

Desde un punto de vista social, a finales del siglo pasado, surgió cierta preocupación en la población por los efectos negativos sobre la salud que pueden causar los campos magnéticos y eléctricos, originados tanto por las líneas de alta tensión, transformadores... como por aparatos eléctricos presentes en el ámbito doméstico. Tras los resultados de numerosas investigaciones, parece poco probable que la exposición a estos campos constituya un peligro para la salud. No obstante, al existir cierto grado de incertidumbre, se siguen llevando a cabo investigaciones sobre el tema.

Los campos magnéticos también juegan un papel fundamental en la investigación sobre los orígenes de la Tierra y, en general, de la formación de los planetas. Un caso específico es el de los investigadores del Instituto Tecnológico de Massachussets, que consiguieron medir diminutos campos magnéticos de un asteroide cuyo origen es cercano al nacimiento del Sistema Solar. Esto les permitió realizar grandes avances sobre el origen del mismo.

En cuanto a aspectos más industriales, la medición del campo magnético se ha convertido en una herramienta cada vez más empleada en operaciones de mantenimiento. Tradicionalmente, el mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas consistía en repararlas una vez que se había producido el fallo (mantenimiento correctivo); o en sustituir de forma periódica las partes que pudieran causar averías (mantenimiento preventivo). No obstante, los inconvenientes que presentan los métodos anteriores, como las interrupciones en la producción causadas por el primero; y el gasto al realizar sustituciones innecesarias debidas al segundo, motivaron la aparición del mantenimiento predictivo. Este consiste en arreglar un fallo antes de que provoque averías en la máquina.

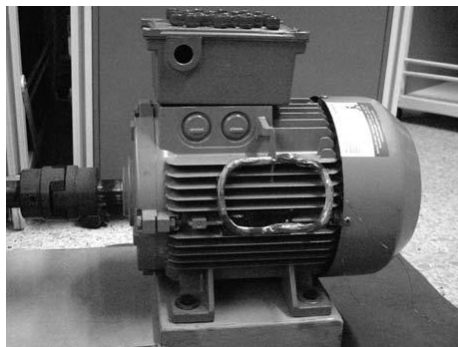


Figura 1.1. Sensor de flujo de dispersión [2].

Con este propósito, se vienen investigando formas de medir el flujo axial de dispersión de estas máquinas mediante el uso de bobinas. De esta forma, se podrán detectar comportamientos anormales debidos a diversas causas, como pueden ser: cortocircuitos de las espiras del estator y el rotor, desalineamiento o excentricidad dinámica o estática del eje de un motor de inducción, etc.

Con los ejemplos anteriores, queda expuesto cómo la medición del campo magnético ha sido y sigue siendo una herramienta fundamental, tanto para el desarrollo de nuevas tecnologías como para el ámbito de la investigación.

El objetivo de este proyecto se centra en el último punto puesto como ejemplo, es decir, en la medición de campo magnético como herramienta para detectar fallos en máquinas y dispositivos eléctricos de manera predictiva. En este contexto, se han encontrado numerosas investigaciones (tesis, proyectos de fin de grado,...) que tratan de definir un sistema de diagnóstico de fallos basado en la medición del campo magnético y de su espectro. No obstante, pocos se centran en el diseño del dispositivo que permita obtener dichas medidas de manera fácil y rápida. Por esta razón, el presente proyecto se centra en este último aspecto.

En concreto, se diseñará un aparato capaz de medir variaciones muy pequeñas de campo magnético (del orden de 1-10 μT) en una dirección, de manera que, más que en la propia medición del campo, se centrará en la detección de anomalías presentes en su patrón. Estas anomalías pueden surgir por razones muy diversas, como por ejemplo, tras producirse un calentamiento excesivo en alguna parte de un aparato eléctrico, como puede ser la pantalla de un ordenador o un cuadro de baja tensión. Por consiguiente, conocido el patrón de campo del dispositivo en condiciones normales y comparándolo con el medido, podrá comprobarse su correcto funcionamiento o detectarse anomalías.

Otras características del aparato a diseñar son: las mediciones tomadas serán almacenadas para después poder ser analizadas (no se mostrarán en pantalla); y será portátil, permitiendo su fácil transporte.

En una primera aproximación, se pretendía que el aparato fuera de barrido, es decir, que con un único sensor se tomaran las mediciones de campo magnético de varios puntos de la superficie en cuestión. No obstante, esto resultaría complejo para el operario, que tendría que ser capaz de realizar el barrido con precisión. Por esta razón, se decidió modificar el diseño e implementar en el mismo un número de sensores indeterminado, N, de forma que el operario tendrá que situar el aparato sobre la superficie a medir una sola vez.

En definitiva, este proyecto se lleva a cabo con el fin de diseñar un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial. En los capítulos sucesivos se procederá a elegir razonadamente los modelos más adecuados de los diferentes elementos que formarán parte del registrador portátil.

A modo de resumen, en la figura 2.2 se muestra un diagrama de bloques con las partes principales que formarán el registrador portátil.

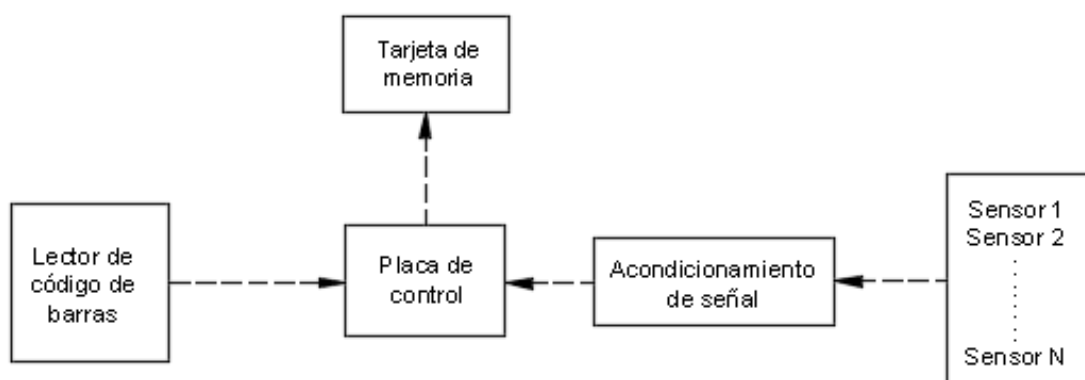


Figura 1.2. Bloques que conforman el registrador portátil

2 SELECCIÓN DEL SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO

En este capítulo se llevará a cabo la elección del sensor, que es uno de los elementos más importantes del registrador portátil.

Para poder tomar una decisión adecuada, primero se presenta una pequeña introducción sobre los diferentes tipos de sensores de campo magnético disponibles en el mercado. Tras esto, se comparan las características de los sensores que sean adecuados para el diseño en cuestión y, entre ellos, se escoge el que se va a implementar, justificando la decisión tomada.

2.1. Clasificación de los sensores de campo magnético

Según la RAE, un sensor es un “dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente”. En el caso de un sensor de campo magnético, como su propio nombre indica, detecta campos magnéticos. Estos sensores son ampliamente utilizados, no solo para la medición de campo y corriente, sino también en otras aplicaciones como: posicionamiento, proximidad y medición de ángulo.

Según su principio de funcionamiento, se distinguen tres tipos: inductivos, magnetorresistivos y de efecto Hall. A continuación, se pasará a realizar una breve descripción de cada uno de ellos.

2.1.1 Sensores Inductivos

El sensor inductivo es uno de los sensores más antiguos, a pesar de lo cual sigue teniendo múltiples aplicaciones en la actualidad, como por ejemplo en la detección de materiales ferrosos. Su funcionamiento se basa en la Ley de Faraday de la Inducción [7]:

$$V = -n * \frac{d\phi}{dt} = -n * A * \frac{dB}{dt} = -\mu_0 * n * A * \frac{dH}{dt}$$

Donde ϕ es el flujo magnético que pasa a través de una bobina con un área A y un número de vueltas n ; B es la densidad de flujo; μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío; y H la intensidad de campo magnético.

De la ecuación de la ley de Faraday, se deduce que el voltaje inducido es igual a la rapidez con la que varía el flujo magnético a través del área de la bobina, independientemente de las causas que provoquen esa variación de flujo.

Por tanto, para obtener cualquier señal de salida de voltaje del sensor, la densidad de flujo debe variar con el tiempo, es decir, los sensores inductivos son capaces únicamente de medir campos magnéticos alternos (CA). En el caso de campos magnéticos de corriente continua, la variación de la densidad de flujo puede ser forzada cambiando la posición de la bobina con respecto al flujo constante. Sin embargo, el término “campo magnético de continua” puede considerarse relativo, puesto que usando un amplificador de gran sensibilidad y una gran bobina, es posible determinar bajas frecuencias de campo. Por consiguiente, también es posible

estudiar campos magnéticos cuasiestacionarios con sensores estacionarios.

Los sensores inductivos son solo sensibles al flujo en dirección perpendicular a su eje. Por lo tanto, para poder determinar todas las componentes del vector de campo magnético, se necesita usar tres bobinas perpendiculares entre sí.

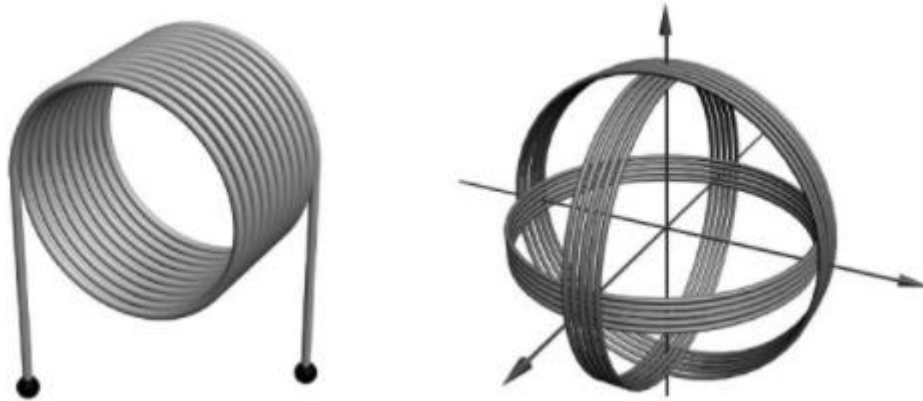


Figura 2.1. a) Sensor inductivo más simple b) Tres bobinas perpendiculares entre sí [6].

Este sensor es prácticamente el único que puede ser directamente elaborado por sus usuarios (en comparación con los de efecto Hall o los magnetorresistivos). Su elaboración es simple y los materiales necesarios para ello son fáciles de encontrar. Por esta razón, prácticamente todo el mundo puede realizar investigaciones usando estos simples sensores de bajo coste, pero bastante precisos.

2.1.2 Sensores de efecto Hall

Se distinguen dos tipos de sensores Hall: los utilizados para detectar la ausencia o presencia de campos magnéticos y los usados para determinar su magnitud. Como el objetivo de este proyecto es la medición de un campo magnético, los más interesantes para este caso son los del segundo grupo.

El efecto Hall fue descubierto en 1879 por el estudiante Edwing Hall. Consiste en la aparición de un voltaje entre los extremos de un conductor, por el que circula una corriente eléctrica, al aplicar un campo magnético en dirección perpendicular al movimiento de las cargas del conductor. Por la ley de la Fuerza de Lorentz [6]:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Donde F es la fuerza total, q es la carga de la partícula, E es el campo eléctrico y v la velocidad de la partícula.

Como vemos en la ecuación anterior, la fuerza F está compuesta por dos términos: la fuerza ejercida por la presencia de un campo eléctrico ($\vec{F}_{elec} = q\vec{E}$); y la ejercida por la presencia de un campo magnético ($\vec{F}_{mag} = q(\vec{v} \times \vec{B})$).

En la figura 2.2 que se muestra a continuación, se aprecia un conductor por el que circula una corriente I , que se encuentra en el seno de un campo magnético dirigido hacia dentro del papel. Las partículas negativamente cargadas se desplazan en dirección contraria a la que circula la corriente. Por tanto, aplicando la expresión de la fuerza de Lorentz, y teniendo en cuenta que no se considera la presencia de campo eléctrico, la fuerza resultante es la mostrada en la figura 2.2. Esta es perpendicular al campo magnético y a la velocidad de las partículas. De esta forma, las cargas son impulsadas hacia uno de los extremos del conductor, generándose el denominado voltaje Hall.

Por tanto, para que un sensor Hall cree un voltaje saliente son necesarias dos acciones: que circule corriente por el sensor; y que este se aproxime a un campo magnético que vaya en dirección perpendicular al mismo. Conocido el valor de la corriente, se puede calcular la fuerza del campo magnético; o si una corriente que circula por una bobina genera un campo magnético, se puede medir el valor de dicha corriente.

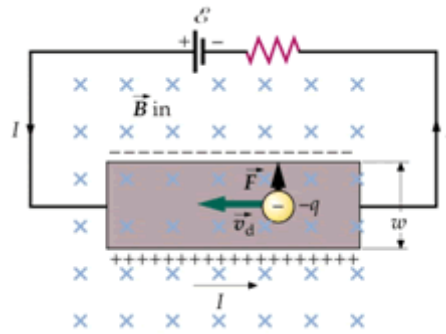


Figura 2.2. Efecto Hall para una corriente debida a partículas negativamente cargadas

En cuanto a la sensibilidad del sensor, un factor a tener en cuenta es la movilidad de la partícula, que se representa mediante la letra μ . Cuanto mayor sea, mayor será la sensibilidad, por lo que se deben usar materiales cuyas partículas gocen de alta movilidad. Como los electrones presentan una movilidad mayor que los huecos, los semiconductores tipo n son los más adecuados.

Además de lo anterior, la sensibilidad también depende de otros factores, como por ejemplo, de las dimensiones del sensor. De hecho, es proporcional al área del sensor.

2.1.3 Sensores magnetorresistivos

Los sensores magnetorresistivos se basan en el fenómeno de la magnetorresistencia, que consiste en la variación de la resistencia de un material al ser sometido a un campo magnético externo. La anterior relación suele expresarse de la forma [6]:

$$R=f(B)$$

Existen diferentes tipos de magnetorresistencia: anisótropa, gigante, túnel y colosal. Se pueden encontrar sensores de campo magnético basados en los tres primeros tipos. En la actualidad, se realizan numerosas investigaciones relacionadas con este fenómeno que cada vez se está implantando en más ámbitos de la tecnología.

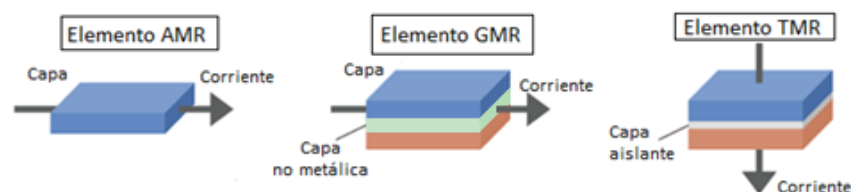


Figura 2.3. Estructuras de elementos AMR, GMR y TMR

Los sensores magnetorresistivos suelen estar contruidos con cuatro magnetoresistores idénticos (que consisten básicamente en resistencias cuyos valores varían con el campo magnético) de película fina Permalloy¹, conectados en una configuración de puente de *Wheatstone*. El principio de esta configuración consiste en crear dos divisores de tensión, de forma que sus impedancias sean iguales cuando el campo detectado sea nulo. Por tanto, la tensión por cada uno de los divisores de tensión tiene que ser la misma e igual a la mitad de la tensión a la que estén siendo alimentados. Por el contrario, al detectarse campo, los valores de las resistencias varían y, por consiguiente, la tensión que circula por cada divisor. Esta variación de tensión es la salida del sensor de campo magnético.

¹ Permalloy: aleación magnética compuesta por Hierro y Níquel (aproximadamente 20 % y 80 %, respectivamente)

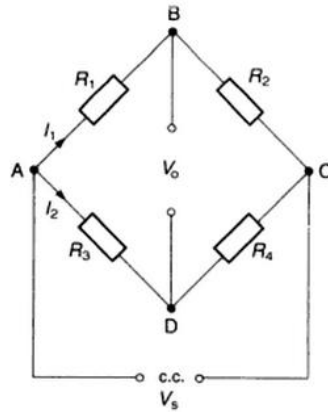


Figura 2.4. Puente de *Wheatstone*

La magnetorresistencia anisótropa (AMR), descubierta en 1857 por William Thomsom, es un efecto dado comúnmente en materiales ferromagnéticos. La resistencia de estos materiales presenta variaciones de entre el 2 % y 5 %, y su valor depende del ángulo formado por el vector de magnetización interna y la dirección de la corriente de flujo. De esta forma, la resistencia es máxima cuando ambas direcciones son paralelas y es mínima cuando ambas son perpendiculares. La expresión matemática es la siguiente [8]:

$$R=R_0+\Delta R\cos^2\theta$$

Donde: θ es el ángulo formado por el vector de magnetización interna y la corriente de flujo.

Tanto a partir de la expresión matemática como de su representación, que aparece a continuación en la figura 2.3, se deduce la simetría de la variación de la resistencia con este ángulo.

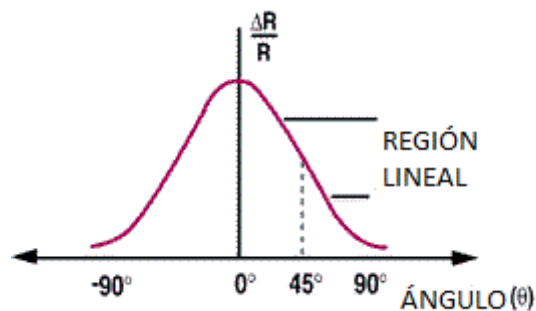


Figura 2.5. Variación resistencia con ángulo de vector de magnetización y corriente [10].

Se observa una región lineal en torno a un ángulo de 45° , por lo que, con el objetivo de lograr una mejora en la respuesta, los aparatos son fabricados de forma que se obligue a la corriente a fluir en una dirección de 45° con respecto al campo magnético. Esto es lo que se conoce como configuración *barber pole*.

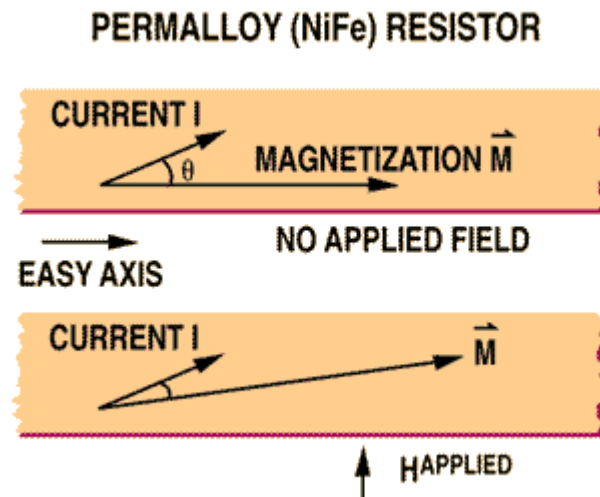


Figura 2.6. a) Vector magnetorresistencia M sin presencia de campo b) Vector magnetorresistencia M en presencia de campo. (Configuración *barber pole*) [10].

En relación a la magnetorresistencia gigante (GMR), fue descubierta por separado por los investigadores Baibich et al. y Binasch et al. en 1988. Ambos observaron que, en estructuras de películas delgadas compuestas por una secuencia de delgadas capas magnéticas separadas por otras capas no metálicas de igual espesor (ver figura 2.3), la corriente eléctrica estaba fuertemente influenciada por la orientación relativa de la magnetización de las capas magnéticas. De esta forma, pueden conseguirse grandes variaciones en la resistencia de estructuras multicapa, llegando al 200 % a temperatura ambiente.

El efecto de la magnetorresistencia túnel (TMR) fue observada por primera vez en 1975 por Michael Julliere, pero no fue hasta 1995, tras el interés generado por la magnetorresistencia gigante, cuando volvió a tenerse en cuenta por Moodera et. al. El esquema es parecido al de una estructura GMR, cambiando la barrera que separa las capas magnéticas por una fina capa de aislante (del orden de varios nanómetros). Los electrones pueden cruzar esta capa de aislante y pasar de una capa magnética a otra, violando los principios de la Física Clásica. Basándose en este efecto, se pueden conseguir variaciones en la resistencia del 200 %.

2.2. Propiedades de los sensores de campo magnético

Para poder comparar de manera crítica los diferentes sensores disponibles, es preciso contar con un conocimiento previo sobre las características que los definen. Por esta razón, se hará una breve introducción sobre las propiedades más relevantes y que serán tenidas en cuenta para la selección del sensor. Estas son: sensibilidad, no linealidad, intervalo de temperatura, coeficiente térmico de sensibilidad, *offset*, tamaño y precio.

2.2.1 Sensibilidad

Según el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología), la sensibilidad se define como “el cociente entre la variación de una indicación de un sistema de medida y la variación correspondiente del valor de la magnitud medida”. Se calcula como la pendiente de la curva de calibración. De forma más general, puede definirse como la mínima señal de entrada que es capaz de generar un cambio en la señal de salida. Se corresponde con la siguiente expresión [12]:

$$S_{x0} = \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=x0}$$

En el caso en cuestión, la sensibilidad del sensor de campo magnético es igual al cociente de la variación de los milivoltios de salida y la variación del campo magnético, en microteslas.

Se trata de una propiedad sumamente importante, debido a que el objetivo es medir variaciones muy pequeñas de campo magnético (0-10 μT). Dado que para esto se necesita una alta sensibilidad, propiedad que no muchos sensores poseen, se han encontrado algunas dificultades en la búsqueda del sensor.

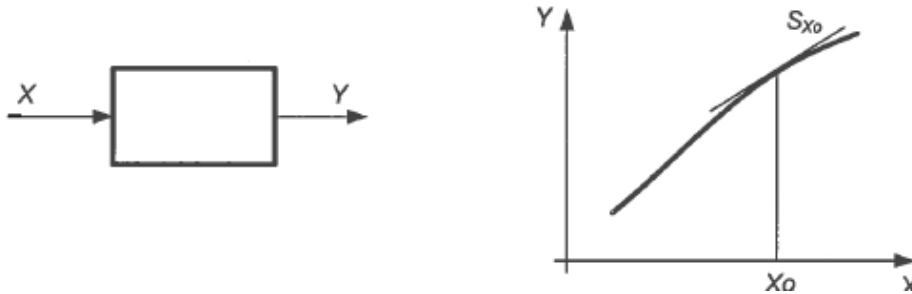


Figura 2.7. Sensibilidad [12]

2.2.2 Offset

El *offset* es el valor de la lectura cuando el valor del mensurando es cero, es decir, la señal de salida que se mide cuando esta debería ser cero. Este valor es constante en todo el rango de medida. Por tanto, para los sensores de campo magnético, cuya salida es en tensión, el *offset* se expresa en mV. También puede expresarse en mV/V, es decir, el *offset* que se produce (mV) por cada voltio de la tensión de alimentación.

Su valor resulta relevante, puesto que, al implementar varios sensores en el registrador, aunque sean del mismo modelo, el valor del *offset* no será igual para todos, sino que estará comprendido entre unos valores máximos y mínimos. No obstante, existen diferentes métodos para corregir esta desviación en la medida, por lo que no será una característica prioritaria a la hora de escoger el sensor.

2.2.3 No linealidad

La no linealidad se define como la máxima diferencia entre los valores de la curva de calibración y la recta que mejor se ajusta a la curva. Habitualmente se expresa en % *FS*, donde *FS* es la abreviatura de *Full Scale* (fondo de escala), esto es, la amplitud máxima que es capaz de medir. En este caso, sería la diferencia entre el mayor y menor campo magnético que el sensor puede medir.

Interesa que el sensor sea lo más lineal posible para que sea más sencillo la medición del campo magnético. Además, hay que tener en cuenta en qué intervalo es válido el dato de linealidad dado por el fabricante, puesto que si se trabaja fuera del mismo, no se tendrán garantías de las mediciones tomadas. En este caso, al querer medir campos magnéticos muy pequeños, prácticamente el intervalo de todos los sensores será considerablemente mayor al que se requiere.

2.2.4 Intervalo de temperatura

El intervalo de temperatura indica entre qué temperaturas máxima y mínima el aparato funciona adecuadamente.

En este diseño esta propiedad no es crítica. Esto se debe a que el registrador está pensado para trabajar en condiciones ambientales, o en todo caso a temperaturas un poco más elevadas como consecuencia del calentamiento de los propios aparatos a medir. Aún así, conviene cerciorarse de que los sensores elegidos presenten un intervalo de temperatura suficientemente amplio.

2.2.5 Coeficiente térmico de sensibilidad

El coeficiente térmico de sensibilidad se define como el cambio relativo de la sensibilidad cuando la temperatura varía un grado. La manera habitual de expresarlo es en $\%/^{\circ}\text{C}$, donde el tanto por ciento es respecto a la medida tomada.

El valor de este coeficiente no está disponible en la ficha técnica de todos los sensores. No es fundamental conocerlo, aunque resulta interesante, dado que así se podrán corregir las medidas tomadas por el sensor cuando se lleve a cabo la programación del mismo. En cualquier caso, si no se conociera, siempre podrá obtenerse mediante ensayos en el laboratorio.

2.2.6 Histéresis

Según la RAE, la histéresis consiste en el “fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa y que se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce”. Es decir, es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado. Por tanto, el valor de una medida dependerá del sentido (creciente o decreciente) en el que se haya tomado la misma.

La histéresis se expresa en unidades de campo magnético (μT).

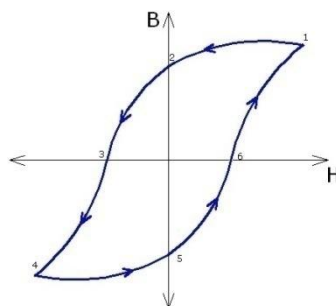


Figura 2.8. Curva de histéresis

Por tanto, se deduce que lo conveniente es que la histéresis presente un valor pequeño, para que la incertidumbre de la medida también lo sea.

2.2.7 Tamaño

El tamaño del sensor debe ser lo menor posible, puesto que al tener que implementar N sensores en el aparato, de ello va a depender en gran medida el tamaño total del mismo. Por tanto, será una característica a tener en cuenta, puesto que para que sea portátil, es necesario que el volumen no sea excesivamente grande.

2.2.8 Precio

El precio es una característica fundamental. Por muy adecuadas que sean el resto de propiedades de un sensor, si el precio es demasiado elevado, no podrá implementarse en el diseño. Esto se debe a que lo encarecería e impediría la fabricación del mismo, que es el objetivo final del proyecto.

2.3. Preselección de los sensores de campo magnético

En primer lugar, se considerarán de manera independiente los sensores analógicos y digitales de campo magnético. Primero, se analizarán los presentes en el mercado cuya salida sea analógica, esto es, cuya salida varía de forma continua. Tras esto, se presentarán aquellos que tengan una salida digital, es decir, que varíe de forma discreta. De esta forma, se podrá seleccionar el más adecuado de cada tipo para el proyecto en cuestión y comparar las ventajas e inconvenientes que presentan.

2.3.1 Sensores analógicos

En la tabla 2.1 que aparece a continuación, se recogen los sensores analógicos que se han seleccionado en una primera aproximación. Las únicas propiedades que se han recogido de los mismos son la sensibilidad y el precio, por ser dos de las más importantes. No obstante, en la descripción detallada que se hace de cada sensor sí se nombrarán sus diferentes propiedades.

Tabla 2.1. Clasificación de sensores analógicos de campo magnético

	Modelo	Fabricante	Sensibilidad (mV/ μ T)	Precio (€)
Magnetorresistivo	TMR2701	Multi Dimension Technology	[0.12, 0.84]	17.24
	TMR2703		[0.135, 0.945]	22.42
	TMR2705		[0.20, 1.4]	27.60
	HMC1001	Honeywell	[0.16, 0.48]	16.88
	AAH002-02	NVE Corporation	[0.11, 0.216]	11.75
Efecto Hall	EQ-430L	Asahi Kasei Microdevices	0.13	0.71
	EQ-730L		0.13	0,86
	HAL 2455	TDK-Micronas	0.17	3.71
	HAL 1820		[0.01, 0.11]	2.34
Inductivo	MC95	Magnetic Sciences	0.1	128.60

2.3.1.1 Multi Dimension Technology

Multi Dimension Technology es una empresa que fue fundada en China en el año 2010. Tiene su oficina central en Zhangjiagang Free Trade Zone, Jiangsu, China; y actualmente cuenta con dos sucursales, una en Shanghai, China, y otra en San José, Estados Unidos. Se trata de una mediana empresa, es decir, tiene entre 51 y 200 trabajadores.

Se dedica a la fabricación de sensores de campo magnético basados en el fenómeno de la magnetorresistencia túnel. No existen muchas empresas que comercialicen productos basados en este tipo de magnetorresistencia, puesto que ha empezado a implantarse en la tecnología desde no hace mucho. Estos sensores pueden ser de todo tipo: de ángulo, lineales, de corriente, etc.

Con respecto a los sensores de campo magnético, cuenta con unos 25 diferentes, entre los que se distinguen de tipo triaxial y uniaxial. Los valores de la sensibilidad van desde 0.3mV/V/Oe hasta 300mV/V/Oe. Desde un punto de vista técnico, el más adecuado para el diseño sería el que proporcionara mayor sensibilidad. No obstante, este es también el más caro, por lo que para llegar a una solución de compromiso, se han preseleccionado los sensores con unas sensibilidades intermedias. Estos son: TMR2701, TMR2703 y TMR2705.

Sus propiedades se recogen en la tabla 2.2:

Tabla 2.2. Sensores de Multi Dimension Technology

Modelo	Máxima tensión (V)	Sensibilidad (mV/ μ T)	Offset (mV/V)	Intervalo linealidad (μ T)	No Linealidad (% FS)	Intervalo temperatura (°C)	Coef. term. sensibilidad (%/°C)	Histéresis (μ T)	Tamaño (mm)	Precio (€)
TMR2701	7	[0.12, 0.84]	± 30	± 1500	1	[-40, 125]	-0.1	30	6x5x1.5	17.24
TMR2703	7	[0.135, 0.945]	± 7	± 1500	3	[-40, 125]	-0.06	30	3x3x0.75	22.42
TMR2705	7	[0.20, 1.4]	± 7	± 1500	3	[-40, 125]	-0.04	30	3x3x0.75	27.60

Se observa que los tres presentan muchas propiedades idénticas, mientras que otras varían según el precio. De esta forma, como las mejoras no compensan el incremento de precio, se escoge el modelo TMR2701.

Al tratarse de una empresa nueva, que no cuenta con sucursales ni distribuidores en Europa, sus productos

únicamente pueden ser obtenidos a través de la compañía de Amazon. Esto, unido al hecho de que los modelos de los sensores anteriores hay que comprarlos en grupos de cinco, dificulta y limita la libertad de compra. Al precio del producto, habría que sumarle también los gastos de envío (siendo estos igual a 4.27 €).

2.3.1.2 Honeywell

Honeywell se trata de una empresa multinacional estadounidense, cuyo origen se remonta más de 150 años atrás, con la invención del termostato de Albert Butz. Su nombre se debe al ingeniero Marck Honeywell, que en 1906 cambió el nombre de la empresa a Minneapolis-Honeywell Regulator Co. En 1963, finalmente pasó a llamarse Honeywell Inc., nombre que perdura hasta la actualidad.

Tiene su sede en Nueva Jersey, Estados Unidos y cuenta con unas 1 250 oficinas repartidas en 70 países diferentes de todo el mundo y con más de 131 000 trabajadores.

Presenta una amplia gama de productos, destinada a una gran variedad de clientes, desde compradores particulares hasta grandes corporaciones. De esta forma, abarca varios campos de la industria, como son: aeroespacial y defensa; transporte; petróleo y gas; medicina, etc.

Sus productos son fáciles de comprar, puesto que cuenta con numerosos distribuidores. En el caso concreto de los sensores de campo magnético, los podemos encontrar en las páginas web de las siguientes compañías electrónicas: Farnell, RS, Digi-Key, Mouser Electronics, etc.

En relación a los sensores de medición de campo magnético, encontramos uniaxiales y triaxiales de tipo magnetorresistivo, concretamente basados en la magnetorresistencia anisótropa. Poseen diferentes sensores uniaxiales, pero para cumplir con la condición de sensibilidad exigida, se escoge el modelo HMC1001.

Sus propiedades se muestran en la tabla 2.3:

Tabla 2.3. Sensores de Honeywell

Modelo	Máxima tensión (V)	Sensibilidad (mV/ μ T)	Offset (mV)	Intervalo linealidad (μ T)	No Linealidad (% FS)	Intervalo temperatura ($^{\circ}$ C)	Coef. térm. sensibilidad (%/ $^{\circ}$ C)	Histéresis (μ T)	Tamaño (mm)	Precio (€)
HMC1001	12	[0.125, 0.48]	-15	\pm 100	0.1~0.5	[-55, 150]	[-0.32, -0.28]	[0.05, 0.1]	11.253 \times 7.3x0.249	16.88

2.3.1.3 NVE Corporation

Esta empresa fue fundada en 1989 por un antiguo ejecutivo de la compañía Honeywell. Tiene su sede en Minnesota, Estados Unidos y no cuenta con ninguna sucursal. Se trata de una mediana empresa, es decir, tiene entre 50 y 201 empleados.

Se centra en la comercialización de aisladores, sensores y memorias SRAM basados en la espintrónica. Esta tecnología emergente utiliza la propiedad del electrón del espín para la obtención, el almacenamiento y la transmisión de información.

Con respecto a los sensores, ofrecen gran variedad: analógicos, digitales, de ángulo, de corriente, etc. La mayoría de ellos se basan en la magnetorresistencia gigante a partir de la espintrónica. Cabe señalar que NVE Corporation es una empresa pionera en el uso de esta tecnología, siendo la primera que, en 1955, desarrolló un sensor comercial que utilizase este tipo de tecnología.

En este caso, se ha seleccionado la clase AAH de sensores de campo magnético, que son sensores analógicos con elevada sensibilidad. En concreto, se ha escogido el modelo AAH002-02, por ser uniaxial y poseer una sensibilidad adecuada.

Tanto los sensores como los aisladores pueden ser comprados a través de la tienda online de la compañía o de la página de Digi-Key. Los aisladores también están disponibles en la página de Farnell.

En la tabla 2.4 se recogen las propiedades del sensor elegido:

Tabla 2.4. Sensores de NVE Corporation

Modelo	Máxima tensión (V)	Sensibilidad (mV/ μ T)	Offset (mV/V)	Intervalo linealidad (μ T)	No Linealidad (%) unipolar ²	Intervalo temperatura ($^{\circ}$ C)	Coef. térm. sensibilidad (%/ $^{\circ}$ C)	Histéresis (%) unipolar ¹	Tamaño (mm)	Precio (€)
AAH002-02	12	[0.11, 0.216]	± 5	[60, 300]	4	[-50, 150]	0.0	15	0.436 x3.370	11.75

2.3.1.4 Asahi Kasei Microdevices

Asahi Kasei Microdevices es una filial de la empresa multinacional japonesa Asahi Kasei Corporation. Esta última fue fundada en 1922 e inicialmente los productos que comercializaban eran únicamente químicos. Poco a poco fue creciendo y ampliando su campo de trabajo, distinguiéndose en la actualidad seis ámbitos diferentes: Asahi Kasei Microdevices, Asahi Kasei Homes, Asahi Kasei Construction Materials, Asahi Kasei Pharma, Asahi Kasei Medical y ZOLL Medical.

Con respecto a Asahi Kasei Microdevices, que es la relevante para este proyecto, fue fundada en 1980. Tiene oficinas en varios países de Asia: Japón, Taiwán, China y Corea; así como en Europa, concretamente en Alemania y en Estados Unidos. Cuenta con un número de empleados comprendido entre 1 000 y 5 000.

Aunque ofrece diversos tipos de productos, se centra en la venta de elementos basados en el efecto Hall y en circuitos integrados.

Sus productos pueden comprarse online en la página web de la compañía electrónica Digi-Key. También pueden comprarse directamente en las diferentes tiendas de la compañía Matrix Electrónica (Madrid, Barcelona...) o a través de su página web.

En relación a los sensores de campo magnético, cuenta con diferentes tipos: uniaxiales, triaxiales, de corriente, de ángulo, etc. Pero, en este caso, los que interesan son los sensores lineales de efecto Hall. En concreto, se han seleccionado los EQ-430L y EQ-730L por ser los únicos que poseen una sensibilidad suficiente.

En la tabla 2.5 que se muestra a continuación, aparecen sus propiedades más destacadas:

Tabla 2.5. Sensores de Asahi Kasei Microdevices

Modelo	Máxima tensión (V)	Sensibilidad (mV/ μ T)	Offset (mV)	Intervalo linealidad (μ T)	No Linealidad (% FS)	Intervalo temperatura ($^{\circ}$ C)	Tamaño (mm)	Precio (€)
EQ-430L	5.5	0.13	7.07	± 13000	0.5	[-40 , 100]	4.4x3.6x1.2	0.71
EQ-730L	5.5	0.13	7.07	± 13000	0.5	[-40 , 100]	18x4.1x1.15	0.86

Como puede observarse, los dos modelos son muy parecidos. No obstante, difieren en algunas de sus propiedades, como son el tiempo de respuesta o el tipo de cubierta, que no aparecen en la tabla 2.5 por no tratarse de características relevantes. Cabe mencionar que el coeficiente térmico de sensibilidad y el error de histéresis no se muestran en la tabla porque no son proporcionados por el fabricante.

Ambos modelos pueden ser comprados en la página de Digi-Key, pero con un gran inconveniente: el

² Unipolar se refiere a la exposición a campos magnéticos de una única polaridad. Por ejemplo, de 0 a 30 Gauss o de -2 a -50 Gauss, pero no de -20 a 30 Gauss. En caso de que fuera bipolar, la no linealidad y la histéresis se verían incrementadas.

número mínimo de sensores del modelo EQ-430L es 5 000, y el mínimo del EQ-730L es 500. Por tanto, no resulta viable la compra de ninguno de ellos.

2.3.1.5 TDK-Micronas

TDK-Micronas es una filial de la empresa multinacional TDK Corporation. Esta última fue fundada en 1935 en Tokyo, Japón. Se trata de una empresa de electrónica, especializada en la venta de componentes pasivos, productos magnéticos y dispositivos de almacenamiento y de grabación de datos.

En cuanto a TDK-Micronas, fue fundada en 1989. Aunque TDK Corporation es una empresa japonesa, esta filial tiene su sede central en Freiburg, Alemania. Cuenta con más de 900 empleados y está presente en todo el mundo, pues tiene oficinas en Estados Unidos, en Europa (Francia, Italia...) y en Asia (Corea, Japón...).

Se dedica al desarrollo de productos semiconductores para aplicaciones industriales y al sector automovilístico. Sus productos incluyen sensores de campo magnético y de corriente basados en el efecto Hall, así como controladores integrados. De esta forma, cuenta con sensores lineales e interruptores de efecto Hall, sensores de ángulo, etc.

En cuanto a los sensores de medición de campo magnético, presentan una variada gama de productos, distinguiendo una serie de modelos que podrían ser válidos: HAL1820 y HAL2455. Se trata de una serie de sensores programables por el usuario, de forma que es posible ajustar sus propiedades según sea más conveniente para el uso que se les vaya a dar.

En España, sus productos pueden obtenerse tanto en franquicias de empresas distribuidoras en Barcelona y Madrid (Endrich y Rutronik), como a través de Internet en las páginas de Digi-Key, Mouser Electronics o de las compañías anteriores. Por tanto, los productos son fácilmente adquiribles en el mercado.

En la tabla 2.6 se recogen las propiedades más destacadas de los sensores HAL1820 y HAL2455.

Tabla 2.6. Sensores de TDK-Micronas

Nombre	Máxima tensión (V)	Sensibilidad (mV/ μ T)	Offset (mV)	No Linealidad (% ³)	Interv. temperatura (°C)	Coef. térmico sensibilidad (%/°C)	Tamaño (mm)	Precio (€)
HAL 1820	5.5	[0.01, 0.11]	[3, 5]	± 1	[-40, 170]	[-0.31, -0.255]	18.01x2.6x1.20	2.34
HAL 2455	5.5	0.17	-	-	[-55, 150]	-	18.05x5.08x0.9	3.71

Como puede verse en la tabla 2.6, no se dispone de mucha información del sensor HAL1820, y aún menos del sensor HAL2455. Esto, unido al hecho de que sean programables, los hacen menos atractivos para el fin en cuestión.

2.3.1.6 Magnetic Sciences

Magnetic Sciences se trata de una empresa localizada en Massachussets, Estados Unidos. Únicamente cuenta con un número de empleados comprendido entre 2 y 10.

Al ser una pequeña empresa local, resulta más complicado encontrar información sobre sus orígenes y sobre sus productos que en el caso de las empresas anteriores. A pesar de ello, se sabe que se dedica a la venta al por menor y al alquiler de diferentes aparatos, como son: gausímetros, magnetómetros, medidores de radio frecuencia, sensores y sondas para la medición de campos magnéticos y electromagnéticos. Sus productos únicamente pueden comprarse online a través de su página web.

Con respecto a los sensores de campo magnético que ofrece, son de tipo inductivo, distinguiéndose unos ocho modelos diferentes, pero con características similares. De entro ellos se escoge el MC95, que es el que presenta unas propiedades más adecuadas para nuestro caso.

³ % de la tensión de alimentación. Valor válido si la tensión de salida está comprendida entre 0.3V y 4.7V y más del 50% del intervalo de campo magnético es utilizado.

Los fabricantes no proporcionan la hoja de especificaciones del modelo MC95. En su página web hacen una breve descripción del dispositivo, aunque es demasiado escueta, de modo que no se proporcionan propiedades del mismo que resultarían relevantes. Por esta razón, en lugar de realizar una tabla con las características, como en los casos anteriores, se nombran las más importantes, que son:

- La sensibilidad es de $0.1 \text{ mV}/\mu\text{T}$.
- El intervalo de temperatura es de $[-33, 55] \text{ }^\circ\text{C}$.
- Las dimensiones son $52 \times 40 \times 29 \text{ mm}$.
- El precio es 128.60 € .

Aunque no se cuenta con mucha información de este sensor, es fácil ver que no presenta propiedades adecuadas para el proyecto en cuestión. En primer lugar, el tamaño es demasiado grande, puesto que al tener que implementar N sensores, ocuparían demasiado espacio y el aparato sería difícil de transportar. Con respecto a la sensibilidad, aunque es suficiente, existen otros tipos de sensores capaces de proporcionar una mejor sensibilidad. Por último, el precio es demasiado elevado, de forma que aunque cumpliera con el resto de requisitos no sería viable comprarlo.

Por tanto, este sensor no es adecuado para los requerimientos exigidos. En general, los sensores inductivos no se ajustan a las necesidades que se requieren en este proyecto. Este es el único presente en el mercado que presenta unas propiedades más cercanas a las que se necesitan y, a pesar de ello, no son suficientes.

2.3.1.7 Conclusiones

Una vez vistas las diferentes características de los sensores de campo magnético, y tras una breve descripción de sus fabricantes, se reducirá el número de sensores que se consideran aceptables. Para esto, se resumirán las razones por las que se han descartado los sensores.

En primer lugar, se descartan los sensores EQ-430L y EQ-730L de la empresa Asahi Kasei Microdevices, debido a que no resultan rentables económicamente al ser necesario comprar un elevado número de los mismos. En cuanto al sensor MC95 de Magnetic Sciences, no puede utilizarse principalmente por su gran tamaño y elevado coste. Por último, tampoco se van a considerar los modelos HAL1820 y HAL2455 de TDK-Micronas, puesto que no presentan características relevantes con respecto a otros aquí presentes; y como añadido requieren ser programados y no se dispone de mucha información sobre sus propiedades.

Por tanto, los sensores que quedan son: TMR2701 de Multi Dimension Technology, HMC1001 de Honeywell y AAH002-02 de NVE Corporation.

2.3.2 Cálculo de incertidumbre de sensores analógicos de campo magnético

Para poder realizar una comparación más exhaustiva de los sensores, se calcula la incertidumbre de los preseleccionados. Antes del desarrollo numérico, se explicarán algunos términos para una mejor comprensión de los resultados obtenidos.

El Centro Español de Metrología define la incertidumbre como “un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”. Se diferencian dos tipos de incertidumbre: A y B. La primera se obtiene a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones; y la segunda es evaluada a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información. Por consiguiente, como en este caso se calcula la incertidumbre a partir de los datos proporcionados por las hojas de especificaciones de los sensores, esta será de tipo B.

Es muy importante no confundir el término de incertidumbre con el de error, que según el Centro Español de Metrología se trata de “la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia”. Se distinguen dos clases de errores: sistemático, que varía de forma predecible, y aleatorio, que varía de manera impredecible.

La incertidumbre de una medida puede presentar un valor elevado y el error un valor pequeño, o viceversa.

Por ejemplo, el resultado de una medición (tras su corrección) puede estar, sin saberlo, muy próximo al valor del mensurando (y, en consecuencia, tener un error despreciable) aunque tenga una incertidumbre elevada.

Otro término relacionado con los anteriores es el de la exactitud. El Centro Español de Metrología lo define como “la proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando”. Además, aclara que la exactitud no es una magnitud y, por consiguiente, no se expresa numéricamente. En la norma UNE-EN 61298-2:2008 se especifican los términos que la componen: histéresis, precisión y linealidad. A nivel cualitativo, cuanto mayor sea la incertidumbre, menor será la exactitud. Por tanto, resulta más práctico el cálculo de la incertidumbre, ya que es un concepto estadístico que proporciona una franja de valores en donde estará, con cierta probabilidad, el valor exacto.

A pesar de todo lo anterior, la mejor forma de cuantificar el error de una medida, es mediante la banda de error total. Se trata de una especificación que incluye todas las fuentes posibles de error de un dispositivo dentro del rango de medidas y de temperaturas de operación del mismo. Tiene en cuenta los términos que constituyen la exactitud (linealidad, precisión e histéresis), así como el *offset*, el alcance de la escala y el efecto de la temperatura en los términos anteriores. No obstante, este no aparece en la hoja de especificaciones de los sensores de que se disponen, por lo que habrá que limitarse al cálculo de la incertidumbre.

Tras esta pequeña introducción, se llevará a cabo el cálculo del valor de la incertidumbre. Esta puede estar compuesta por diferentes términos, independientemente de que sea de tipo A o B. En este caso, los efectos que deben tenerse en cuenta son los debidos a: la repetitividad, la histéresis, la temperatura y la no linealidad. Todos ellos ya han sido explicados en el apartado anterior, excepto la repetitividad o precisión, que consiste en el grado de concordancia de diferentes mediciones de un mensurando en las mismas condiciones de medida.

De forma que la incertidumbre total vendría dada por la siguiente expresión:

$$u_{\text{Total}}^2 = u_R^2 + u_T^2 + u_L^2 + u_H^2 \quad [15]$$

Donde: u_R, u_T, u_L y u_H son las incertidumbres debidas a la repetitividad, temperatura, linealidad e histéresis, respectivamente.

No obstante, la repetitividad solo viene definida en la hoja de especificaciones del sensor de la marca Honeywell, no conociéndose su valor para los de Multi Dimension y NVE Corporation. Por consiguiente, a pesar de la importancia de este término, no será posible tenerlo en cuenta en el cálculo de la incertidumbre de tipo B.

A continuación, se mostrará la incertidumbre que presentan los distintos sensores, calculada para distintas medidas tomadas: 1, 10, 100 y 500 μT ; y distintas temperaturas ambientes: 25, 40 y 5 $^{\circ}\text{C}$. También resulta interesante tener en cuenta la tensión a la que se alimenta el sensor. Sin embargo, esto solo ha sido posible hacerlo en el sensor HMC1001, puesto que es del único del que se proporcionan los datos a tensiones de alimentación distintas.

Aunque se calcule la incertidumbre según distintas medidas y temperaturas, las que más nos interesan son las que se producen en un rango de medidas comprendido ente 1-10 μT , y a temperaturas de [25, 40] $^{\circ}\text{C}$. La razón de ello es que estas serán las condiciones en las que haremos trabajar al sensor. Las incertidumbres calculadas se expresarán en μT .

2.3.2.1 Sensor HMC1001

En las tablas siguientes (2.7, 2.8 y 2.9), se muestran las incertidumbres calculadas para unas tensiones de alimentación de 5, 6 y 9 V, respectivamente del sensor HMC1001:

Tabla 2.7. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 5 V

		Medida (μT)			
		1	10	100	500
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	5	0.23	0.61	6.00	30.00
	25	0.22	0.22	0.22	0.22
	40	0.22	0.50	4.50	22.50

Tabla 2.8. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 6 V

		Medida (μT)			
		1	10	100	500
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	5	0.40	0.69	6.00	30.00
	25	0.33	0.33	0.33	0.33
	40	0.34	0.56	4.50	22.50

Tabla 2.9. Incertidumbre con sensor HMC1001 para 9 V

		Medida (μT)			
		1	10	100	500
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	5	0.66	0.69	6.04	30.00
	25	0.66	0.66	0.66	0.66
	40	0.66	0.56	4.55	22.50

Se observa que, a medida que las medidas tomadas tienen valores mayores, las incertidumbres para las distintas tensiones de alimentación se asemejan si la temperatura es distinta de la nominal (25°C). Esto se debe a que el término de incertidumbre relacionado con la temperatura, al depender de la medida tomada, es el predominante a medidas grandes.

Para el caso de las medidas de 1-10 μT , las incertidumbres son relativamente pequeñas, sobre todo a tensiones de alimentación más bajas.

2.3.2.2 Sensor TMR2701

En la tabla 2.10 se recogen las incertidumbres a diferentes medidas y temperaturas del sensor TMR2701:

Tabla 2.10. Incertidumbre con sensor TMR2701

		Medida (μT)			
		1	10	100	500
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	5	42.43	42.43	42.47	43.59
	25	42.43	42.43	42.43	42.43
	40	42.43	42.43	42.45	43.08

Se observa que la incertidumbre permanece en todos los casos considerados en valores en torno a $42.4 \mu\text{T}$. Esto se debe a que tanto el término de histéresis como el de linealidad permanecen constantes, cada uno de ellos a un valor de $30 \mu\text{T}$. Por tanto, el pequeño aumento de la incertidumbre se debe únicamente al efecto de

la temperatura, que es mayor cuanto mayor sean las medidas tomadas.

En este caso, la incertidumbre presenta valores demasiado elevados cuando trabajamos en un rango de 1-10 μT .

2.3.2.3 Sensor AAH002-02

Como el coeficiente térmico de sensibilidad proporcionado es de 0.0 $\%/^{\circ}\text{C}$, el término de temperatura de la incertidumbre es nulo bajo cualquier condición. Esto no significa que la temperatura no tenga ningún efecto, sino que este es menor de 0.0. Además, los valores dados de histéresis y linealidad son válidos si el sensor solo está expuesto a campos magnéticos de una polaridad, pero en nuestro caso el dispositivo trabajará sometido a un campo de alterna. Por consiguiente, sabemos que la incertidumbre será mayor que la que aparece recogida en la tabla 2.11, aunque no es posible cuantificar cuanto mayor.

Tabla 2.11. Incertidumbre con sensor AAH002-02

	Medida			
	1	10	100	500
U_{TOTAL}	0.16	1.62	16.16	80.78

En definitiva, aunque los valores de incertidumbre aquí mostrados no resultan elevados, no se puede saber si bajo las condiciones de funcionamiento requeridas presentará una incertidumbre mucho mayor.

2.3.3 Conclusiones

Tras todas las comparaciones y cálculos realizados, se toma el sensor HMC1001 como el más adecuado para ser implementado en este diseño. Tanto el tamaño, como la sensibilidad y el precio son aceptables y, además, es el que presenta menor incertidumbre de los preseleccionados. También hay que tener en cuenta que el fabricante, Honeywell, es una compañía multinacional con mucha experiencia en el sector, por lo que resulta bastante fiable.

En el Anexo I, se recoge la hoja de características del sensor HMC1001.

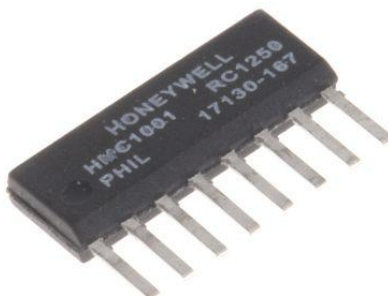


Figura 2.9. Sensor Honeywell HMC1001 [22].

2.3.4 Sensores digitales

La oferta de sensores digitales de campo magnético en el mercado es considerablemente menor a la de los analógicos. Esto ha dificultado mucho su búsqueda, puesto que además se requiere un sensor con unas características muy específicas. A pesar de ello, aunque ya se cuente con un sensor analógico que puede ser implementado en el registrador, en este apartado se va a tratar de encontrar una opción alternativa mediante el uso de un sensor digital. El motivo de ello es la desventaja que presentan los sensores analógicos frente a los digitales: las interferencias electromagnéticas, también conocidas por sus siglas en inglés, EMI (*Electro Magnetic Interference*).

La interferencia electromagnética, en términos generales, consiste en un fenómeno en el que las perturbaciones de un campo magnético interfieren en otro existente, de forma que ambos se ven distorsionados. En el caso de los sensores analógicos, como se verá más adelante en el capítulo 5, será

necesario realizar un circuito de acondicionamiento de la señal, lo que provocará una serie de interferencias electromagnéticas entre los mismos, siendo mayor la distorsión cuanto mayor sea el número de circuitos de acondicionamiento y, por consiguiente, de sensores. Estas interferencias son difíciles de cuantificar y eliminar, por lo que para evitarlas se pueden utilizar sensores digitales, pues, como la salida es digital, no requieren de un circuito de acondicionamiento de señal.

En la búsqueda de sensores digitales, únicamente se han encontrado triaxiales, por lo que, aunque solo se desea medir el campo en una dirección, sería necesario utilizar uno triaxial y dejar sin utilizar las mediciones recogidas en los otros dos ejes. Como en este caso solo se han encontrado cinco sensores que podrían ajustarse a las necesidades del proyecto, se presentarán todos en la tabla 2.12 con todas sus propiedades. Posteriormente, se presentará una pequeña descripción sobre cada uno de ellos.

Tabla 2.12. Clasificación de sensores digitales de campo magnético

Nombre	Fabricante	Máxima tensión (V)	Sensibilidad ($\mu\text{T}/\text{LSB}$)	Offset (μT)	Rango de campo magnético (μT)	No Linealidad (% FS)	Intervalo temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Coefficiente térm. Sensibilidad	ODR (Hz)	Tamaño (mm)	Precio (€)	Tienda
IIS2MDC	ST Microelectronics	4.8	0.15	± 6	± 5000	-	[-40, 85]	± 0.03	[10, 150]	2x2x0.7	1.94	Mouser Electronics
LIS2MDL	ST Microelectronics	4.8	0.15	± 6	± 5000	-	[-40, 85]	± 0.03	[10, 150]	2x2x0.7	1.45	Mouser Electronics
LIS3MDL	ST Microelectronics	4.8	0.015	± 100	± 400	± 0.12	[-40, 85]	-	[0.625, 1000]	2X2X1	1.33	Mouser Electronics
MAG3110	NXP	3.6	0.1	± 100	± 1000	$\pm 0.3/\pm 1$	[-40, 85]	± 0.1	[0.63, 80]	2x2x 0.85	1.24	RS
HMC5883L	Honeywell	4.8	[0.073, 0.435]	-	± 800	± 0.1	[-40, 85]	-0.3	[0.75, 75]	3.0x3.0x0.9	Discontinuo	Arrow Electronics

En la tabla 2.12 mostrada aparece una variable adicional, que no se recogía en las tablas de características de los sensores analógicos. Esta es el ODR (Output Data Rate), esto es, la velocidad con la que el sensor es capaz de tomar medidas. Se mide en Hz, por lo que mediante la inversa de esta variable, se puede calcular el número de medidas que el sensor es capaz de tomar por unidad de tiempo.

2.3.4.1 STMicroelectronics

STMicroelectronics consiste en una compañía internacional, surgida en 1987 de la unión de las empresas SGS Microelettronica (italiana) y Thomson Semiconducteurs (francesa). De hecho, su nombre inicial era SGS-THOMSON Microelectronics, pero en 1998 cambió su nombre al actual.

Su sede está situada en Ginebra, Suiza, y cuenta con 80 oficinas de ventas localizadas en 35 países diferentes, algunas de las cuales se encuentran en España, concretamente en Madrid y Barcelona. Entre ellas hay repartidos más de 450 000 trabajadores, que atienden alrededor de 1 000 000 clientes.

Se dedica al desarrollo de diferentes tipos de productos, pero su campo más amplio es el de los semiconductores, situada entre las 10 mayores compañías en ventas de estos productos. Dichos semiconductores son utilizados en diferentes aplicaciones: sensores, coches inteligentes, microcontroladores, procesadores, etc.

Con respecto a los sensores de campo magnético, esta compañía cuenta con una gama de sensores especialmente diseñados para ser utilizados como brújulas, en los que se combinan un magnetómetro y un acelerómetro. Como para el fin que se persigue en este proyecto no interesan las funciones del acelerómetro, se han preseleccionado aquellos que únicamente cuentan con el magnetómetro.

Como puede observarse en la Tabla 2.12, la tasa de lectura máxima de estos sensores (ODR) no es, en general, lo suficientemente alta, pues se pretende medir una señal de 50 Hz. Por consiguiente, sería difícil obtener el valor eficaz de la señal.

Además de este factor, encontramos otro inconveniente: el paquete en el que viene es de tipo LGA (*Land Grid Array*) o en castellano, una matriz de contactos de rejilla. Consiste en una interfaz de conexión para circuitos integrados basada en una matriz de superficies conductoras que hacen contacto a través de un zócalo, en lugar de presentar pines o esferas, como era el caso de los sensores analógicos anteriormente mostrados. El problema de ello radica en que no se disponen de los medios adecuados para ensamblar este tipo de paquete en el laboratorio, por lo que habría que encargarlo a una empresa externa, lo que encarecería mucho el proyecto.

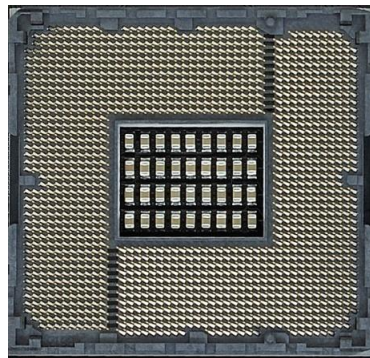


Figura 2.10. LGA de una placa base

2.3.4.2 NXP Semiconductors

Se trata de una compañía internacional creada en 2006 a partir de una división de la gran empresa tecnológica Philips. Tiene su sede en Eindhoven, Países Bajos, pero está presente no solo en el continente europeo, sino también en el americano y asiático. De hecho, cuenta con unos 31 000 empleados distribuidos en 33 países diferentes. En concreto, en España tiene una oficina en Madrid.

Como se deduce del propio nombre, su principal ámbito de trabajo es el de los semiconductores, siendo considerada una de las 10 compañías de semiconductores más influyentes en el mercado. Las aplicaciones en

las que se dan uso a sus semiconductores son similares a las de STMicroelectronics, poniendo especial énfasis en la seguridad, tanto automovilística como en la protección de información y datos.

En cuanto a los sensores, ofrecen de diferentes tipos: de temperatura, de presión... pero de sensores de campo magnético solo se encuentra el que se recoge en la Tabla 2.12. De nuevo, la misión para la que está pensando este sensor es para la medición del campo terrestre, es decir, para funcionar como brújula. Por esta razón, la tasa máxima de lectura es de 80 HZ, por lo que no será posible la obtención del valor eficaz de la señal.

Otro problema que se presenta es, al igual que sucedía en los sensores de MTMicroelectronics, el tipo de paquete. En este caso, es DFN (*Dual Flat No-Lead*). Se trata de una interfaz de conexión similar a la LGA en el sentido de que no tiene esferas o pines para conectarlos. Por tanto, tampoco es posible realizar su conexión en el laboratorio.

2.3.4.3 Honeywell

Como de esta compañía ya se habló en el apartado de los sensores analógicos, no se volverá a repetir aquí.

En cuanto al sensor digital HMC5883L, al estar obsoleto, no se analizarán sus propiedades más en profundidad. Únicamente se muestra en la tabla 2.12 a modo didáctico, para poder comparar las características de diferentes sensores digitales.

2.3.4.4 Conclusiones

Como puede deducirse de los subapartados anteriores, ninguno de los sensores digitales encontrados en el mercado se ajusta a las necesidades del proyecto, por lo que únicamente se considerará la implementación de un sensor analógico de campo magnético.

3 SELECCIÓN DEL LECTOR DE CÓDIGO DE BARRAS

En este tercer capítulo, se llevará a cabo la selección de un lector de código de barras. Este consiste en un dispositivo electrónico que mediante un láser lee el código de barras y transmite el número correspondiente al mismo a otro dispositivo, como por ejemplo a una computadora, a través de una interfaz determinada.

Aunque pueda parecer que este dispositivo no es tan esencial como los sensores de campo magnético o la placa de control, también tiene un papel fundamental. Esto se debe a que, si se toman medidas en diferentes superficies o aparatos de manera consecutiva, posteriormente será necesario distinguir a qué aparato pertenece cada medida. Por esta razón, el operario tendrá que, antes de tomar las medidas, escanear el código de barras del aparato en cuestión. De esta forma, cuando las medidas vayan a ser analizadas, no habrá ninguna duda de a qué aparato corresponden.

3.1. Características del lector a implementar

En primer lugar, el lector de código de barras utilizado es un módulo lector de código de barras, es decir, se trata de un dispositivo de pequeño tamaño, que se puede integrar fácilmente en el registrador portátil. De esta forma, se facilita la labor del operario, que no tendrá que utilizar dos dispositivos diferentes: uno para leer el código de barras del aparato; y otro para tomar las medidas de campo magnético.

A continuación, se hará una breve descripción de las diferentes características de este tipo de dispositivos, especialmente de aquellas que resultan de mayor interés para el presente proyecto. Estas son: el tipo de códigos leídos, la interfaz, la tecnología empleada, el precio, el tamaño y el peso.

3.1.1 Tipo de códigos leídos

Actualmente, se distinguen dos tipos de códigos de barras: los unidimensionales y los bidimensionales. A continuación, se hace una breve descripción de cada uno de ellos:

- Los códigos de barras unidimensionales están formados por rayas y espacios que tienen la misma longitud, pero distinta anchura. A partir de esta anchura se almacena la información en los códigos.



Figura 3.1. Código de barras unidimensional

- Los códigos bidimensionales surgieron por la necesidad de aumentar la información contenida en los mismos. Están formados por diferentes símbolos, no solo por rayas, sino también por puntos, cuadrados, etc. Por tanto, la información se almacena teniendo en cuenta tanto la anchura como la longitud de los símbolos que componen el código.



Figura 3.2. Código de barras bidimensional (código QR)

Aunque el uso de los códigos del segundo grupo se está extendiendo en la actualidad en muchas y diversas aplicaciones, las máquinas eléctricas y los dispositivos electrónicos siguen utilizando fundamentalmente los primeros. Esto, unido a que los lectores de código unidimensionales son más económicos que los bidimensionales, hace que en este proyecto se haya decidido implementar un lector de código unidimensional.

3.1.2 Tecnología

Aunque se distinguen varios tipos de tecnologías utilizadas para la lectura de códigos de barras, tan solo se mencionarán las dos más empleadas en la actualidad. Estas son: la tecnología láser y tecnología de imagen.

- La tecnología láser fue empleada por primera vez para crear un escáner de retícula fijo en la década de 1970. Desde entonces, el escáner láser se ha venido utilizando con diferentes fines, tanto en el mundo del comercio como en el farmacéutico, industrial, etc. Posee un espejo láser que oscila dentro del dispositivo, creando una franja láser que ilumina el código. Esta tecnología lleva siendo desarrollada y perfeccionada durante cerca de 40 años, lo que le confiere una alta fiabilidad. Como desventaja, se tiene que estos lectores solo son capaces de leer códigos unidimensionales, lo que en este caso carece de importancia, puesto que solo se pretende leer este tipo de códigos.
- La tecnología de imagen comenzó a desarrollarse en la década de 1990, diferenciándose dos tipos: CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*, Semiconductor de Óxido de Metal Complementario) y CCD (*Charge Coupled Device*, Dispositivo de Cargas Acopladas). Se estructuran en una matriz de células fotoeléctricas (también llamadas píxeles) que generan una imagen del símbolo. A diferencia de la tecnología anterior, con esta se pueden leer tanto códigos unidimensionales como bidimensionales.

3.1.3 Interfaz

La palabra interfaz proviene del inglés, *interface*, y significa ‘superficie de contacto’. Consiste en la conexión entre dos dispositivos o sistemas que funcionan de manera independiente. Con esta conexión, se permite el intercambio de información entre los dispositivos.

En este caso, hay que conectar el lector de código de barras con la placa de control, para que esta última reciba el código leído por el primero. Se distinguen diferentes tipos de interfaces para lectores de códigos de barras en módulo. Las más comunes son:

- Interfaz PS/2. Este puerto debe su nombre a la serie de computadoras IBM *Personal System2*, creada por IBM en 1987. Se utilizaba originalmente para conectar el teclado y el ratón al ordenador, pero en

la actualidad la mayoría han sido sustituidos por puertos USB. Los puertos PS/2 de teclado y ratón no eran intercambiables, por lo que para diferenciarlos, el del ratón era de color verde y el del teclado de color morado. El principal inconveniente de los puertos PS/2 es que no es posible conectarlos y desconectarlos en caliente, por lo que es necesario apagar la computadora para tal fin.

A pesar de que este tipo de interfaz se está quedando obsoleta, aún se pueden encontrar en el mercado lectores de códigos de barra que la utilicen.

- Interfaz RS-232. A principios de la década de los 60, la EIA (*Electronic Industries Alliance*) estableció la norma RS-232 (*Recommended Standard 232*; Estándar Recomendado 232) para facilitar la conexión entre un DTE (*Data Terminal Equipment*; Equipo Terminal de Datos) y un DCE (*Data Communication Equipment*; Equipo de Comunicación de Datos). De esta forma, se pretendía facilitar la comunicación entre un ordenador (DTE) y un módem (DCE). En la norma se describen todos los parámetros necesarios para llevar a cabo la conexión. Por ejemplo, se establece la siguiente señalización eléctrica bipolar:
 - Nivel lógico 0: de +3V a +15V
 - Nivel lógico 1: de -3V a -15V
 - La región entre -3V y +3V queda indefinida

De lo anterior se deduce que el margen de ruido es grande (por la región que queda indefinida). Sin embargo, tiene el inconveniente de ser una comunicación lenta, puesto que se requiere tiempo para pasar de los -15V a los 15V y viceversa. La corriente máxima que soporta es de 500 mA.

Este último inconveniente es lo que ha hecho que actualmente la mayoría de los ordenadores no dispongan del puerto serial RS-232, siendo sustituidos por los puertos USB.

- Interfaz USB. El puerto USB (*Universal Series Bus*) fue desarrollado en la década de los 90 por un grupo de 7 grandes empresas, con el objetivo de unificar la conexión de los periféricos con sus equipos. Existe una gran cantidad de dispositivos que se pueden conectar mediante este puerto (cámaras de fotos, teclados, ratones, impresoras...), y está sustituyendo al resto de puertos series. La tensión de salida es de 5 V, y la corriente depende de la versión, pudiendo variar entre 500 a 900 mA.

Entre las ventajas de este puerto, cabe destacar las siguientes:

- La elevada velocidad con la que se lleva a cabo la transferencia de datos. De hecho, hay disponibles diferentes estándares de puertos USB, cada uno con una velocidad diferente.
- Pueden conectarse y desconectarse dispositivos en caliente, a diferencia de lo que sucedía con el puerto PS/2.



Figura 3.3. Tres tipos de interfaces: PS/2; RS-232 y USB

3.1.4 Precio

De manera análoga a lo que ocurría en la selección del sensor, el precio es una característica fundamental. Las razones son las mismas: es necesario que el precio no sea excesivo para que no encarezca el diseño del registrador.

3.1.5 Tamaño y peso

Al igual que en el sensor se consideró su tamaño, para el lector se tendrá en cuenta tanto este como su peso. La razón vuelve a repetirse: al tratarse de un registrador portátil, es esencial que sea fácilmente manejable por el operario. Por consiguiente, hay que intentar que el tamaño y peso sean lo menores posibles.

3.2. Preselección del lector de código de barras

Una vez realizada esta pequeña introducción sobre las propiedades que serán tenidas en cuenta para los lectores, en la tabla 3.1 se muestran los lectores que han sido analizados para utilizarlos en el proyecto.

Tras esta, al igual que se hizo con los sensores, se presentará una pequeña descripción de las empresas que fabrican y comercializan dichos lectores.

Tabla 3.1. Clasificación de lectores de código de barras

Nombre	Fabricante	Interfaz	Tamaño (mm)	Peso (g)	Tecnología	Tienda	Precio (€)
DFR0314	DFROBOT	RS-232	46x32x11.5	80	CCD	DFROBOT, MouserElectronics	45.52
MCR12	Champtek	USB, PS/2, RS-232	44 x30 x19.2	17	CCD	Adafruit Industries, Arrow Electronics	69.95
LV12	RAKINDA	RS-232,USB, PS/2	44.15x32.2x20	17	CCD	AliExpress	41.23
LV1000	RAKINDA	TTL232	28x22.7x9.5	6	CCD	AliExpress	61.76
LV100R	RAKINDA	RS-232, USB	49x37x26	70	CMOS	AliExpress	92.21
LV1400	RAKINDA	RS-232, USB	11.5x20x 25	17	CCD	AliExpress	61.43
E1005	YOKO	RS-232,USB	26.8x24.4x11.7	18	CCD	AliExpress	26.34
EP100	AIBECY	RS-232, USB	54x47x24	53	CCD	AliExpress	31.74
EP100	BLUESKYSEA	USB	53x47.3x24.5	37	CMOS	AliExpress	20.58
SH-500-1	SCANHOME	USB, RS-232	88x60x28	80	CCD	AliExpress	44.39
Z2060U	ZYXRZYL	USB, RS-232, PS/2	11.5x20x25	17	CCD	AliExpress	41.54
ER20	YUMITE	RS-232	33.7x25.8x9.9	9	CCD	Alibaba	29.35
MS-3	MICROSCAN	RS-232, RS-422, USB, PS/2	44.5x44.5x21.6	57	Láser	SIVART	970
N4300	Honeywell	RS-232, USB	11.8x 21.6x 15.5	9.1	Láser	Dacom	500

3.2.1 DFRobot

DFRobot se dedica a la distribución de hardware de código abierto, con un catálogo de más de 1 300 componentes entre los que destacan: sensores, plataformas robóticas y módulos de comunicación con impresoras 3D. Entre el hardware de código abierto que manejan, se encuentran Arduino, Raspberry Pi y

LattePanda. Hasta el momento, han vendido unas 1 500 unidades en unos 220 países diferentes.

Esta mediana empresa fue fundada en Pekín, China, en 2008, ciudad donde actualmente continua manteniendo su sede.

Con respecto a la oferta de escáneres, esta es bastante reducida, de forma que solo hay uno que pueda ser estudiado para su implementación en el presente proyecto. Se puede comprar vía online tanto en la página web de la propia empresa, DFRobot, como de otras páginas distribuidoras de dispositivos electrónicos, RobotShop y Mouser Electronics. Su coste es de 46.95\$ en DFRobot y Robotshop y de 38.91€ en Mouser Electronics, sin contar los gastos de envío, que son considerables (12\$, 34.64\$ y 20€, respectivamente).

3.2.2 Champtek y Adafruit Industries

Champtek es una empresa china con sede en Taiwán, especializada en la fabricación y venta de todo tipo de lectores de código: de módulos, de bolsillo, de escritorios, etc. Cuenta con distribuidores repartidos por todo el mundo, dos de ellos en España, PC Mira y Dachs, concretamente en Barcelona. Aunque no se tiene mucha más información sobre esta empresa, y en los distribuidores españoles no se han encontrado los lectores de códigos de barras en módulo que se buscan, se tendrá en cuenta el modelo de lector MCR12, pues este se encuentra en el inventario de la empresa norteamericana Adafruit Industries, que selecciona minuciosamente los productos que ofertan.

La empresa Adafruit Industries fue fundada en 2005, en Nueva York, Estados Unidos, donde mantiene su sede. Se trata de una empresa de código abierto, cuyo propósito es el de hacer que el mundo de la electrónica sea más asequible para todo tipo de personas, desde principiantes hasta expertos en la materia, con tutoriales escritos, vídeos y kits para facilitar los primeros pasos. Actualmente, trabajan en ella más de 100 empleados y en enero 2017 celebraron la llegada del pedido número 1.5 millones.

Su fundadora, la ingeniera eléctrica Limor Fried, posee influencia en la comunidad de Hardware libre, habiendo participado en la primera reunión de Hardware libre. Además, ha sido la primera mujer ingeniera en ocupar la portada de la revista Wired y fue nombrada como *Whitehouse Champion of Change* en 2016, una iniciativa llevada a cabo en Estados Unidos para resaltar el trabajo de personas que ejercen un impacto en su Comunidad. Con respecto a la empresa, también cuenta con varios reconocimientos, como es el aparecer en el reportaje de Google sobre impacto económico.

Al no tener una tienda material, sus productos tienen que ser comprados a través de su tienda online o de los distribuidores que la representan. En España solo hay una tienda material en Barcelona, llamada Inceptum, pero también pueden obtenerse sus productos a través de las páginas webs de distribuidores como Arrow Electronics, Mouser Electronics y Digi-Key.

Con respecto al lector MCR12, este puede comprarse tanto a través de su página web como de la de Arrow Electronics.

3.2.3 Honeywell

De manera similar a lo que sucedía en el apartado de sensores digitales, en este tampoco se aportará más información sobre la compañía. En cuanto a los escáneres, cuentan con diversos tipos: de mano, industriales, de bolsillo, módulos, etc. No obstante, no podrán ser implementados en el diseño, puesto que tras contactar con Atención al Cliente en España de la compañía, se llegó a la conclusión de que la única forma de hacerse con este tipo de productos es mediante distribuidores específicos, como Dacom, que solo atiende pedidos grandes de empresas. Por esta razón, tampoco se ha podido conocer el precio de los mismos. En la tabla 3.1 únicamente se ha recogido un escáner de esta marca por lo explicado anteriormente, aunque existen otros cuyas características técnicas también cumplirían con los requisitos.

3.2.4 Omron Microscan

Microscan se trataba de una filial de Spectris plc, empresa británica fundada en 1915 que se dedica a la producción y venta de instrumentos de medida y de control para aplicaciones industriales. Pero en 2017, la compañía japonesa Omron adquirió la filial. Esta última, fundada en 1933, está formada por diversas filiales, abarcando un amplio ámbito de trabajo, desde automatización industrial y componentes electrónicos hasta

sanidad, soluciones medioambientales, etc.

Los productos que manufactura Microscan incluyen: lectores de códigos, verificadores de códigos de barras y sistemas de visión artificial. Dentro de los lectores de códigos de barras, hay disponible una amplia oferta, desde módulos hasta lectores de mano, así como lectores de códigos unidimensionales y/o bidimensionales. Para el proyecto en cuestión, interesan módulos capaces de leer códigos unidimensionales, encontrando los modelos MS-1, MS-2 y MS-3. También había otra serie de escáneres, la MicroHawk, con modelos ID-20, ID-30 y ID-40, que cumplían con los requisitos, pero que además eran capaces también de leer códigos bidimensionales.

Al igual que en el caso de los escáneres de Honeywell, tras contactar con Atención al Cliente de Microscan de España, se encontró a un distribuidor, Sivart, que sí atiende pedidos pequeños. Sin embargo, al pedir presupuesto, los escáneres resultaron tener un coste elevado, por lo que económicamente no eran viables.

3.2.5 Rakinda Technologies

Esta empresa China tiene su origen en el año 2000, en Pekín, y actualmente cuenta con otras cuatro oficinas repartidas por el país (Guangzhou, Shenzhen, Xiamen, Suzhou). Consiste en una empresa de tamaño mediano especializada en la venta de lectores de códigos de barras: en módulos, de escritorio, de mano, inteligentes, etc.

Sus productos pueden ser comprados vía online en AliExpress o Alibaba, siendo la primera una opción más barata. Se han encontrado diversos modelos que inicialmente podrían ser utilizados para el fin en cuestión: LV12, LV1000, LV100R y LV1400. De estos, el modelo LV100R se descarta por tener un precio considerablemente mayor al resto, de 92.21€.

3.2.6 ZYXRZYL, Blueskysea Technology y Aibecy

Se han agrupado las tres marcas de escáneres, ZYXRZYL, Blueskysea y Aibecy porque de ninguna de ellas se tiene apenas información. Se trata de tres empresas asiáticas que venden diferentes productos a través de AliExpress, Amazon, Alibaba o Ebay.

Los precios de las tres son muy bajos, pero, a pesar de ello, debido a la falta de información y de garantías de los productos, no se ha considerado recomendable la compra del escáner de una de estas marcas.

3.2.7 Scan Home

Se trata de una microempresa estadounidense (de dos a diez empleados), con sede en Alaska, que se dedica fundamentalmente a la venta de muebles para viviendas.

Como puede verse, su ámbito de trabajo es muy distinto al que interesa en este proyecto, pero, a pesar de ello, se ha encontrado un escáner en AliExpress con las características técnicas necesarias. No obstante, debido a la falta de experiencia de la empresa en el mercado de los lectores de código de barras, se descarta esta opción.

3.2.8 Yumite

Yumite es un fabricante chino de escáneres, de la que tampoco ha sido posible recabar mucha información. En este caso, sí se ha encontrado al menos la página web de la empresa, pero en ella no se especifica información sobre la misma, como tamaño de la empresa, año de creación, ciudad en la que se encuentra su sede... Por tanto, de nuevo, se descarta la compra del lector de esta marca por falta de garantías.

3.2.9 Conclusiones

Tras una primera aproximación, el número de lectores de códigos de barras que pueden implementarse se ha reducido a cinco: DFR0314 de DFRobot, MCR12 de Champtek y LV12, LV1000 y LV1400 de Rakinda Technologies.

En la tabla 3.2 que se muestra a continuación, se recogen algunas características adicionales que permitan

realizar una comparación más detallada de estos lectores de código.

Tabla 3.2. Segunda clasificación de lectores de código de barras

Modelo	Velocidad de análisis (scans/segundo)	Corriente de funcionamiento (mA)	Corriente en reposo (mA)	Tensión alimentación (Voltios)	Temperatura de trabajo (°C)
DFR0314	100 ±10 %	150	50	5	[0, 50]
MCR12	100 ±10 %	100	20	5±5 %	[0, 50]
LV12	300	110	30	[3.3, 5]	[0, 50]
LV1000	200	150	45	3.3	[-20, 60]
LV1400	100	-	-	5	[0, 50]

A pesar de que los tres sensores de la marca Rakinda presentan propiedades adecuadas, se descartan debido a que el distribuidor por el que resulta económica su compra es AliExpress, y esta no es muy fiable en cuanto a plazos de entrega.

Finalmente, se decide adquirir el lector DFR0314 de DFRobot, pues este puede adquirirse a través de Mouser Electronics, distribuidor fiable y conocido. Además, presenta propiedades adecuadas. En el anexo I, se recoge la hoja de características de este lector.

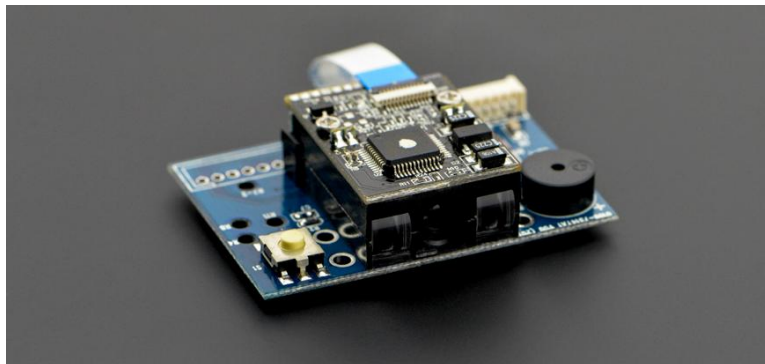


Figura 3.4. Módulo lector de código de barras modelo DFR0314. [35]

Es importante señalar que en el caso de una producción en serie del registrador portátil, sería posible seleccionar otros lectores de código de barras con las mismas o incluso mejores propiedades que el lector aquí seleccionado, pues podrían hacerse pedidos grandes, que abaratarían el coste.

Otro aspecto que conviene explicar, es el hecho de que el uso de los códigos bidimensionales cada vez se está extendiendo más en todos los ámbitos. Por consiguiente, aunque en el momento presente con un lector de código unidimensional se cubren las necesidades para este proyecto, cabe la posibilidad de que en un futuro hubiera que sustituirlo por un lector de código bidimensional.

En ese caso, la mejor opción sería buscar un lector bidimensional con la misma interfaz que el unidimensional aquí seleccionado, puesto que de esta forma podría sustituirse uno por otro sin ningún tipo de problema. Así, en la figura 3.5, se muestra un lector de código de barras bidimensional con la interfaz RS-232, que, en una primera aproximación, podría sustituir al lector DFR0314.



Figura 3.5. Módulo lector de código de barras bidimensional modelo RT206. [40]

Tabla 3.3. Características generales del lector de código de barras RT206

Nombre	Fabricante	Interfaz	Tamaño (mm)	Peso (g)	Tecnología	Tienda	Precio (€)
RT206	RTscan	RS-232	21.2X14X11.1	4	CMOS	RTscan	101.52

Como puede observarse en la tabla 3.3, las características más generales del lector RT206 cumplen con las condiciones requeridas. No obstante, habría que estudiar más en profundidad el resto de sus propiedades y, en el caso de que finalmente se fuera a utilizar un sensor bidimensional, sería recomendable realizar el mismo estudio que el aquí mostrado con los lectores unidimensionales, pero para los bidimensionales. De esta forma, se contará con varias opciones posibles, pues el modelo RT206 solo es un ejemplo, mostrado para poner de manifiesto que la sustitución del lector no llevaría consigo grandes cambios en el diseño global del registrador portátil.

4 SELECCIÓN DE LA PLACA DE CONTROL

La placa de desarrollo es fundamental para cualquier proyecto electrónico que se pretenda realizar. En ella se encuentra el microcontrolador, que será el elemento que, como su propio nombre indica, lleve a cabo el control de todas las operaciones del registrador portátil a diseñar.

4.1. El microcontrolador

4.1.1 Origen

Actualmente, las personas están rodeadas por aparatos que funcionan gracias a los microcontroladores. Se pueden encontrar tanto en procesos industriales, en los que la automatización juega un papel fundamental, hasta en aparatos de la vida cotidiana, como son: teléfonos, automóviles, semáforos, máquinas expendedoras, sistemas de vigilancia, electrodomésticos, etc.

El origen de esta tecnología se remonta a más de cuarenta años atrás, con la invención del primer microprocesador, que fue lanzado al mercado en 1971 por Intel, con el nombre de 4004. Se trataba de una pequeña unidad central de proceso de 4 bits con el que únicamente se podían implementar simples sistemas digitales programables, como calculadoras o juguetes electrónicos. Prácticamente al mismo tiempo, dos ingenieros de Texas Instruments, Gary Boone y Michael Cochran, crearon el primer microcontrolador, también de 4 bits, aunque no fue comercializado hasta 1974 con el nombre de TMS 1000. A partir de ese momento, variedad de compañías comenzaron a desarrollar diferentes microcontroladores, de forma que actualmente los hay de 4, 8, 16 y 32 bits, cada uno con mayores prestaciones computacionales y memoria que el anterior.

4.1.2 Definición y componentes

Se define microcontrolador como un circuito integrado que incorpora la mayor parte de los elementos que intervienen en el gobierno de uno o varios procesos. Aunque existe una gran variedad de microcontroladores, todos suelen contar con los siguientes componentes:

- La unidad central de procesamiento (UCP), coloquialmente conocida como “el cerebro” del microprocesador. A partir de la interpretación de las instrucciones de un programa informático, se encarga de coordinar y sincronizar el funcionamiento de todo el sistema.
- La memoria, cuya disposición depende de la arquitectura adoptada: Von Neumann o Harvard. En la primera se dispone de una única memoria, en la que se almacenan datos e instrucciones indistintamente. Mientras que la segunda, cuenta con dos memorias independientes: una que solo contiene datos y otra que solo contiene instrucciones. Normalmente se utiliza el segundo tipo de arquitectura, utilizando algún tipo de memoria SRAM para el almacenamiento de datos y memorias no volátiles (EPROM, EEPROM, Flash...) para el de instrucciones.
- Los periféricos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Los puertos de entrada y salida, que permiten comunicarse con el exterior.
 - Los temporizadores y contadores. Estos circuitos son utilizados en multitud de tareas, como por ejemplo, para la medición de frecuencia. Los puertos de entrada y salida, que permiten comunicarse con el exterior.
 - Conversor analógico digital, que permite transformar señales analógicas en digitales para que el microprocesador pueda trabajar con ellas.
- El circuito de reloj, que sincroniza el funcionamiento de todo el sistema.

4.1.3 Diferencias entre microcontrolador y microprocesador

El microprocesador es un circuito integrado formado únicamente por la UCP, con memoria y módulos de entrada y salida externos; mientras que el microcontrolador, como se ha visto anteriormente, tiene todos estos elementos integrados. La elección de uno u otro dependerá del fin perseguido.

Para trabajar en tiempo real se usan microcontroladores, mientras que los microprocesadores se utilizan cuando se requiere el manejo de una gran cantidad de datos y de una programación intensiva. Mediante una pequeña descripción de las principales características y distinciones que presentan ambos dispositivos, es fácil comprender por qué esta división de funciones.

Los microcontroladores son más compactos que los microprocesadores, por lo que ocupan menos espacio. Además, pueden realizarse sistemas a medida con muchos periféricos integrados y cuentan con un modo de bajo consumo en el que permanecen mientras no tengan que realizar ninguna operación, aumentando su ahorro energético. En oposición a esto, los microprocesadores presentan una elevada potencia de cálculo, son más versátiles y fácilmente ampliables.

En base a esto, se deduce que para el diseño del registrador portátil es más adecuada la utilización de un microcontrolador. Las tareas que tiene que realizar son la recogida y almacenamiento de datos (código de barras y medidas de campo magnético), por lo que no se requiere una gran potencia de cálculo, que es una de las principales ventajas del microprocesador. En cambio, el espacio es un factor fundamental, para facilitar el transporte del registrador, característica propia de los microcontroladores.

4.2. Selección de la placa de control

Se dispone de gran variedad de marcas de placas de control en el mercado, pero para este proyecto solo se analizará la posibilidad de implementar las placas de Arduino y Texas Instruments.

4.2.1 Propiedades comunes a ambas placas

Con respecto a la comunicación, tanto Arduino como Texas Instruments utilizan puertos serie, esto es, la información es enviada secuencialmente, bit a bit. Lo opuesto a la comunicación serie sería la paralelo, en la que se transmiten varios bits simultáneamente. La comunicación serie puede ser, a su vez: síncrona, en la que hay una señal de sincronismo común al emisor y al receptor; o asíncrona, en la que al no haber señal de sincronismo, no hay coordinación temporal entre los dispositivos, por lo que son necesarias señales de comienzo y de final. Las formas más habituales de mantener la comunicación son con el uso de una unidad UART, asíncrona y con otros dos protocolos de comunicación síncronos, I2C y SPI.

La unidad UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) es la encargada de controlar el puerto serie. Su función es la de convertir los datos que se quieran transmitir en una secuencia de bits, y enlazar los bits recibidos en bytes completos para poder ser utilizados. La UART utiliza los niveles de tensión TTL, que están comprendidos entre 0 V y V_{cc} (donde V_{cc} suele ser 3.3V o 5V).

El protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*, Inter-Circuitos Integrados) cuenta con dos líneas, una para transmitir los datos (SDA) y otra para el reloj (SCL), además de una tercera para la tierra (GND). La

comunicación es bidireccional *half duplex*, es decir, solo puede ir en uno u otro sentido al mismo tiempo; y solo puede haber un maestro a la vez, aunque este puede cambiar.

En el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) la comunicación es bidireccional *full duplex*, es decir, se pueden recibir y transmitir datos simultáneamente. Debido a esto, se requieren más líneas que en el I2C, una para el reloj generado por el maestro (SCK), otras dos para el envío de datos por parte del maestro (MOSI) y del esclavo (SOMI) y una última para la selección del esclavo con el que se quiere iniciar la comunicación (SS).

Si se comparan los dos últimos protocolos, se puede decir que el SPI es más rápido y el tamaño de los mensajes puede ser más grande. Por el contrario, funciona en distancias cortas, se necesitan más pines y el maestro suele ser único.

Otro aspecto a tratar es la memoria, donde se diferencian memorias volátiles, como la RAM; y no volátiles, como la EEPROM y Flash. Las primeras necesitan estar alimentadas para mantener la información, mientras que las segundas no.

La memoria RAM (*Random Access Memory*, Memoria de Acceso Aleatorio), se denomina de esta manera, de acceso aleatorio, porque la velocidad de lectura y escritura no depende de la posición en la que se encuentre la información requerida. Una variante de esta, es la memoria SRAM (*Static Random Access Memory*, Memoria Estática de Acceso Aleatorio), que a diferencia de la anterior, no necesita un circuito de refresco para mantener los datos mientras siga conectada. En estas zonas de memoria el programa crea y manipula las variables cuando se ejecuta.

La memoria Flash es una memoria no volátil, es decir, los datos almacenados no se pierden al interrumpirse la alimentación. Tiene una vida útil muy elevada, por lo que su contenido puede borrarse y escribirse prácticamente un número ilimitado de veces. En esta memoria se almacena el programa (*sketch*) y el gestor de arranque (*bootloader*).

La memoria EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*, Memoria de Sólo Lectura Programable y Borrable Eléctricamente) es una memoria no volátil, que puede leerse y escribirse, pero, a diferencia de la memoria Flash, el número de veces que puede escribirse y borrarse en ella es mucho más limitado, por lo que hay que tener cuidado. En ella se almacenan las constantes del programa, pero también puede utilizarse para otras aplicaciones, como para contadores de tiempo, de forma que cuando la placa de control deje de estar alimentada no se pierda la cuenta; o para la calibración de sensores, así solo será necesario calibrarlos una vez.

En los apartados siguientes, se describirán las placas pertenecientes a Arduino y Texas Instruments.

4.2.2 Arduino

En el portal de Internet de Arduino, se define el mismo como “una plataforma electrónica de código abierto basado en un hardware y un software de fácil uso”. Está basada en una placa, un microprocesador y un entorno de desarrollo que permite realizar proyectos con fines muy diferentes.

4.2.2.1 Historia

Los inicios y el desarrollo de Arduino están rodeados de bastante controversia. En 2003, Hernando Barragán realizó su tesis en *el Interaction Design Institute Ivrea (IDII)*, en Italia, dirigida por Massimo Banzi y Casey Reas. Con esta tesis se pretendió crear una plataforma de hardware y software libre que facilitara la programación y el uso de elementos electrónicos, pues hasta entonces esto estaba reservado a personas con perfiles más técnicos. En esta tesis se basó en 2005 el proyecto de Arduino, en cuyo equipo no estaba presente Hernando Barragán, sino que sus componentes eran: Massimo Banzi, David Cuartielles, David Mellis, Tom Igoe y Gianluca Martino. El objetivo de este proyecto era evitar el inminente cierre del instituto mediante la creación de un proyecto de Hardware abierto, como eran las placas basadas en el microcontrolador *Basic Stamp*, que costaban inicialmente unos 100\$. Este coste consiguió reducirse hasta los 30\$, llevándose a cabo la primera producción de placas, que fueron repartidas entre los estudiantes de la universidad de Ivrea, vendiéndolas a 1\$. Así se pretendía probar su correcto funcionamiento dentro de la propia universidad.

A partir de entonces, las placas Arduino se fueron popularizando, se abarató su coste y fueron apareciendo

nuevas extensiones y accesorios. En 2008, Gianluca Martino fundó *Smart Projects SL*, que se encargaba de la producción en serie de las placas; y en 2014, ante la enorme acogida de las placas Arduino, los cinco integrantes del grupo constituyeron la empresa *Arduino LLC*, con el objetivo de controlar todas las marcas registradas de Arduino. A modo de ejemplo, cabe mencionar la estimación realizada por Adafruit Industries de que vendieron unos 3 00 000 productos de Arduino hasta mediados de 2011. Con la creación de *Arduino LLC*, empezaron a surgir tensiones entre esta y *Smarts Projects*, lo que culminó en el cambio de nombre de esta última a *Arduino SRL* y la separación de los integrantes iniciales del grupo de Arduino, Gianluca Martino en *Arduino SRL* y el resto en *Arduino LLC*. Según los miembros de *Arduino SRL*, Gianluca Martino registró la marca Arduino, que inicialmente solo estaba presente en Estados Unidos, en el resto de Europa sin el consentimiento del resto de fundadores. Sea como fuere, el hecho es que las placas producidas por *Arduino LLC* solo recibían el nombre de Arduino en Estados Unidos, mientras que en el resto del mundo eran conocidas como Genuino. Por tanto, si se encontraban placas Arduino fuera de Estados Unidos, es porque estas pertenecían a *Arduino SRL*. Las placas de una y otra empresa tenían las mismas funcionalidades, pero con diferentes entornos de trabajo, microprocesadores, etc.

Finalmente, tras una larga disputa entre ambas compañías, en julio de 2017, todo terminó con la adquisición de *Arduino SRL* por parte de los cuatro cofundadores que permanecieron unidos, quedando como jefe Massimo Banzi. Actualmente, Arduino sigue desarrollando placas y accesorios para mejorar y ampliar las características de sus productos.

4.2.2.2 Modelos de placas de Arduino

Actualmente, hay 21 placas disponibles en la página web de Arduino, aunque este número puede variar fácilmente, puesto que los productos están siendo constantemente revisados.

A continuación, se muestra una lista con las diferentes placas.

- Placas adecuadas para principiantes:
 - Arduino Uno Rev3
 - Arduino Leonardo
 - Genuino 101
 - Arduino Splora
 - Arduino Micro
 - Arduino Nano
- Placas con funciones más avanzadas:
 - Arduino Mega 2560 Rev3
 - Genuino Zero
 - Arduino Due
 - Arduino Mo
 - Arduino Mo Pro
- Placas Internet de las cosas
 - Arduino Ethernet Rev3
 - Arduino Industrial 101
 - Arduino MKR Fox 1200
 - Arduino MKR Wan 1300
 - Arduino MKR GSM 1400
- Placas *Wearables*
 - Arduino Gemma
 - Lilypad Arduino USB

- Lilypad Arduino Main Board
- Lilypad Arduino Simple
- Lilypad Arduino Simple Snap

Aunque hay un considerable número de placas, muchas de ellas no son adecuadas para su utilización en el presente proyecto. En una primera aproximación, se descartan tanto las placas de “Internet de las cosas” como las *Wearables*. Con el término de “Internet de las cosas” se hace referencia a la interconexión digital de objetos cotidianos con Internet, y la palabra inglesa *wearable* puede traducirse como “ponible”; se trata de tecnología ponible o llevable, es decir, que se integra en nuestro cuerpo, en las prendas que utilizamos. Por tanto, como en el diseño no se ha considerado la opción de la comunicación a través de Internet y la placa no será integrada en ningún tipo de prenda, se descartan las placas de los dos grupos mencionados.

Con respecto a las placas pertenecientes al primer grupo, entre estas también es inmediato la eliminación de Genuino 101 y los Arduinos Splora, Micro y Nano. Las dos primeras de las mencionadas llevan implementados sensores que no se requieren, como es el caso del giroscopio en la Genuino 101 o del sensor de temperatura y acelerómetro en la Arduino Splora. Las dos últimas se caracterizan por su reducido tamaño, pues están pensadas para ser utilizadas en placas de pruebas. A pesar de esta propiedad las hace interesantes para el proyecto, esto se consigue a costa de reducir sus prestaciones, como por ejemplo el no contar con conector de alimentación externa.

Las placas del segundo grupo sí presentan propiedades adecuadas para este proyecto, aunque puede que sean más potentes de lo que se necesita. Excepto la Arduino Mega, el resto de estas placas tienen procesadores de 32 bits, en comparación con las del primer grupo, que cuentan con 8 bits. Esto, unido a un oscilador de mayor frecuencia, hace que sus procesadores sean mucho más potentes, con capacidad para realizar cálculos con mayor rapidez. Como en un primer momento no se considera necesario tanta potencia, puesto que no se llevarán a cabo operaciones complejas, el estudio de los microprocesadores se centrará en las placas Arduino Uno y Arduino Leonardo. Aun así, también se verán las características de la placa Arduino Mega para comparar una placa del segundo grupo con las dos anteriores.

4.2.2.1 Alimentación de las placas

Aunque cada placa presenta unas características propias que las diferencian de las demás, haciendo que cada una sea más adecuada para un determinado fin, todas ellas presentan las mismas formas para ser alimentadas y alimentar.

En cuanto a la manera de alimentarlas, existen diferentes métodos de hacerlo. En primer lugar, puede alimentarse a través de la conexión USB, lo que le proporciona a la placa una tensión de 5V. Esta es la forma más habitual de hacerlo si la placa permanece conectada a un ordenador. En segundo lugar, también puede suministrarse energía con una fuente de alimentación externa (distinta al ordenador) mediante un conector tipo jack. Por último, hay otra forma de alimentarla externamente a través de los pines Vin y GND, pero no es muy recomendable, puesto que de esta forma no actuaría el diodo de protección que evitaría que se quemara el circuito ante un exceso de corriente. Si se alimenta externamente, hay que tener en cuenta que, aunque es posible hacerlo con tensiones de entre 6 y 20 V, es recomendable emplear tensiones de entre 7 y 12 V.

En segundo lugar, para alimentar desde la placa, también se distinguen diversas formas. Se dispone de dos pines de 3.3 y 5 V, que, en combinación con el pin de tierra (GND), permiten alimentar dispositivos a dichas tensiones. En el caso de utilizar el conector jack para la alimentación de la placa, el pin Vin puede utilizarse para ofrecer el mismo voltaje que entre por dicho conector. Por ejemplo, si la placa se alimenta con una pila de 9 V, entonces en el pin Vin también se obtiene 9 V.

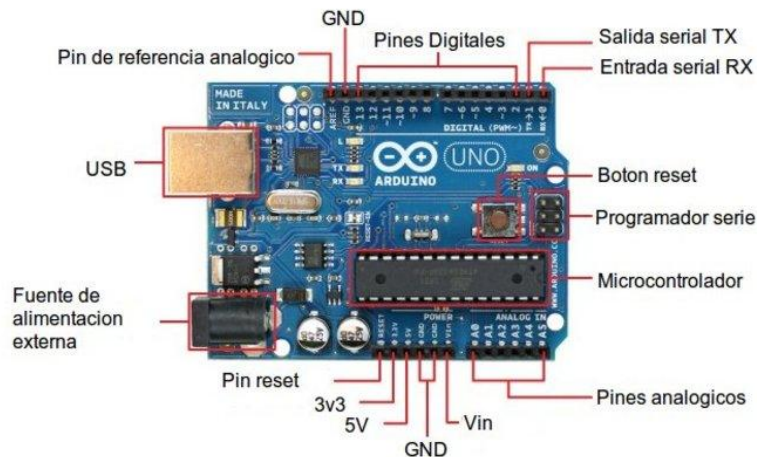


Figura 4.1. Características generales de la placa Arduino Uno

4.2.2.2 Arduino Uno Rev3

Se trata de la placa estándar, la más conocida y la más documentada. Está basada en el microprocesador ATmega328P de 8 bits y 16 MHz, que cuenta con 32 kB de memoria Flash, de los que 0.5 kB son utilizados por el gestor de arranque, 2 kB de SRAM y 1 kB de EEPROM. Como este microprocesador no tiene la comunicación USB integrada, se utiliza un microprocesador adicional, el ATmega16u2, para realizar la conversión de USB a puerto serie. Esto ocasiona que para la comunicación con el ordenador aparezca un puerto virtual COM.

Otra propiedad muy importante del microprocesador para el presente proyecto es la frecuencia de conversión ADC. Para que la placa sea capaz de tomar unas 40 muestras por medida a una frecuencia de 50 Hz, es necesario que su frecuencia de conversión sea como mínimo de 2 kHz. En la hoja de datos del ATmega328P se indica que el tiempo de conversión está comprendido entre 260 y 13 μ s, es decir, que la frecuencia toma valores entre 3.84 y 76.92 kHz, por lo que es válido.

Para las entradas y salidas, tiene un total de 20 pines, de los que 14 son pines E/S digitales (6 de ellos pueden ser utilizados como salidas PWM) operando a 5 V; y 6 son entradas analógicas, con una resolución de 10 bits y que miden por defecto entre 5 V y tierra, aunque puede ser modificado. La máxima corriente que proporcionan o pueden recibir los pines digitales es 40 mA, aunque no se recomienda superar los 20 mA y tienen una resistencia de *pull-up* de 20 a 50 k Ω .

En cuanto a los protocolos de comunicación, cuenta con: una unidad UART, que utiliza los pines 0 (RX) y 1 (TX); el protocolo I2C, que emplea los pines A4 (SDA) y A5 (SCL); y el protocolo SPI, para lo que se usan los pines 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) y 13 (SCK).

Además de todo lo anterior, la placa cuenta con un botón Reset y un led incorporado, que se maneja con el pin 13.

Las dimensiones de la tarjeta son 68.6 mm de largo por 53.4 mm de ancho, con un peso de 25 g.

Tabla 4.1. Propiedades Arduino Uno Rev3

Microcontrolador	ATmega328P
Tensión de trabajo	5 V
Tensión de alimentación (recom)	[7, 12] V
Tensión de alimentación (límite)	[6, 20] V
Pines digitales E/S	14 (6 pueden utilizarse como salidas PWM)
Pines de entrada analógicos	6
Memoria Flash	32 kB (0.5 kB son usados para el arranque)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Frecuencia	16 MHz
Temperatura de trabajo	[-40, 85] °C

4.2.2.3 Arduino Leonardo

Esta placa es similar a la Arduino Uno, con la principal diferencia de que se utiliza el microprocesador ATmega32u4, también de 8 bits y 16 MHz. Este sí posee comunicación USB integrada, por lo que al conectar la tarjeta al ordenador es reconocida como un teclado o ratón. La memoria disponible es similar a la del Arduino Uno: 32 kB de Flash, de los que 4 kB son para el gestor de arranque; 2.5 kB de SRAM y 1 kB de EEPROM.

La frecuencia de conversión del ATmega32u4 está comprendida entre 3.84 y 15.40 kHz, por lo que es adecuada.

Con respecto a los pines de E/S, tiene 20 digitales, de los que 7 pueden utilizarse como salidas PWM y 12 como pines analógicos, con las mismas propiedades que los de Arduino Uno.

Esta tarjeta también cuenta con una unidad UART y protocolo I2C, para lo que se utilizan los mismos pines que la Uno. No obstante, no cuenta con pines para el protocolo SPI, sino que este tiene que ser utilizado a través del conector ICSP, más un pin digital cualquiera para el SS, es decir, para la selección del esclavo.

Al igual que la placa Arduino Uno, la Leonardo también cuenta con el botón de reset y el led incorporado.

El tamaño de la placa es de 68.6 mm de largo por 53.3 mm de ancho, con un peso de 20 g.

Con respecto al conector ICSP anteriormente mencionado, se trata de una entrada con 6 pines que permite programar Arduino directamente, sin tener que utilizar el puerto USB. Desde este puede accederse a la memoria Flash, donde se encuentra programado el gestor de arranque, que es el código que nos permite programar desde el ordenador a través del puerto USB. Además de esta función, mediante el ICSP se puede utilizar el protocolo SPI para comunicarse con otros dispositivos, que es lo que nos interesa en el presente proyecto. En la figura 3.1, puede verse el conector ICSP con el nombre de “Programador serie”.

Tabla 4.2. Propiedades Arduino Leonardo

Microcontrolador	ATmega32u4
Tensión de trabajo	5 V
Tensión de alimentación (recom)	[7, 12] V
Tensión de alimentación (Límite)	[6, 20] V
Pines digitales E/S	20 (7 pueden utilizarse como salidas PWM)
Canales de entrada analógicos	12
Memoria Flash	32 kB (4 kB son para el arranque)
SRAM	2.5 kB
EEPROM	1 kB
Frecuencia	16 MHz
Temperatura de trabajo	[-40, 85] °C

4.2.2.4 Arduino Mega 2560 Rev3

Esta tarjeta está basada en el microcontrolador ATmega2560, de nuevo de 8 bits y 16 MHz, que posee el siguiente espacio para el almacenamiento de memoria: 256 kB de Flash, de los que 8 kB son para el gestor de arranque, 8 kB de SRAM y 4 kB de EEPROM.

La frecuencia de conversión del microprocesador está comprendida entre 3.84 y 76.92 kHz, al igual que en el Arduino Uno.

Posee un número elevado de pines de E/S, 54 pines digitales (15 pueden utilizarse como salidas PWM) y 16 analógicos, de nuevo con las mismas propiedades que las de Arduino Uno.

A diferencia de las placas anteriores, que solo contaban con una unidad UART, esta puede usar hasta cuatro unidades de este tipo; un protocolo I2C y dos protocolos SPI, uno a través del conector ICSP y otro con pines digitales.

De nuevo, esta placa posee un botón *reset* y un led incorporado.

Como consecuencia del mayor número de prestaciones, tanto el tamaño como el peso de la placa se ven incrementados, siendo estos de 101.52 mm de largo por 53.3 mm de ancho y 37 g.

Tabla 4.3. Propiedades Arduino Mega 2560 Rev3

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de trabajo	5 V
Tensión de alimentación (recom)	[7, 12] V
Tensión de alimentación (límite)	[6, 20] V
Pines E/S digitales	54 (15 pueden utilizarse como salidas PWM)
Pines de entrada analógicos	16
Memoria Flash	256 kB (0.5 kB son usados para el arranque)
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Frecuencia	16 MHz
Temperatura de trabajo	[-40, 85] °C

4.2.3 Texas Instruments

Texas Instruments es una compañía internacional, con sede en Dallas, que desarrolla y comercializa productos electrónicos, tanto analógicos como digitales: semiconductores, procesadores de señales digitales, etc.

4.2.3.1 Historia

Aunque esta empresa fue fundada como tal en 1951, su origen se remonta a dos décadas atrás. En 1930, apareció en el mercado una pequeña empresa llamada *Geophysical Service Inc* (GSI), la cual ofrecía servicios de exploración sísmica para la industria del petróleo. Posteriormente, en 1941, Eugene McDermott, J. Erik Jonsson, Cecil H. Green y H.B. Peacock compraron GSI y, durante la segunda guerra mundial, expandieron sus servicios a elementos electrónicos para la Armada estadounidense. En 1951, tras el crecimiento de la empresa en el terreno de la electrónica, pasó a llamarse Texas Instruments (TI), de modo que *Geophysical Service Inc.* se convirtió en una filial de la misma.

Desde ese momento, *Texas Instruments* ha sido la responsable de múltiples avances. En 1958, Jack Kilby inventó el circuito integrado, cuyo uso se popularizó rápidamente en los ordenadores; en 1967 desarrollaron la primera calculadora de bolsillo; en 1971 el microprocesador de un solo chip; y en 1973 obtuvo la primera patente de un microprocesador. Posteriormente, en 1980, TI produjo su primer procesador de señal de un solo chip, que lo llevó a la creación, cinco años más tarde, del procesamiento digital de luz, tecnología utilizada en proyectores y televisores de proyección (actualmente TI sigue siendo el único fabricante de esta tecnología). Estos son algunos hechos que muestran el crecimiento y el desarrollo de esta compañía a lo largo de las décadas.

Pero no todo han sido éxitos en la historia de la empresa. En 1979, con el auge de los ordenadores, TI entró a participar en este mercado con el TI-99/4, que fue el primero de varios modelos que lanzó. No obstante, sus características no eran las más adecuadas, lo que junto a la gran competencia de este mercado, hizo que finalmente TI vendiera su línea de productos a la compañía *Hacer* en 1997.

Con respecto a la filial *Geophysical Service Inc.*, con la que nació *Texas Instruments*, se vendió en 1988 a la compañía multinacional *Halliburton*.

En la década de los 90, lanzaron al mercado el MSP430™ MCU, el primero de una serie de microcontroladores de bajo coste y consumo, que son los productos que interesan para el presente proyecto. Otro mercado en el que consiguió hacerse un hueco y en el que continúa actualmente, fue en el de las calculadoras, con los modelos TI-81 y TI-83.

Avanzando en el tiempo, en 2011 TI adquirió *National Semiconductors*, empresa estadounidense dedicada

a la fabricación de semiconductores. Actualmente, esta empresa multinacional sigue desarrollando y mejorando su tecnología, con más de 30 000 empleados, casi 100 000 productos y más de 40 patentes a su nombre.

4.2.3.2 Modelo de los microcontroladores

A diferencia de Arduino, TI sí fabrica los microcontroladores. Estos pueden comprarse independientes o integrados en una placa y pueden clasificarse en cuatro grupos:

- Serie Simple Link. Esta serie engloba a un conjunto de microcontroladores inalámbricos y cableados con Ethernet, Bluetooth y Wi-fi. El objetivo de esta serie es crear una plataforma que confiera gran flexibilidad, para que se puedan desarrollar rápidamente nuevos productos, reutilizando lo hecho hasta el momento sin tener que empezar de cero. Para conseguir esto, todos están basados en una arquitectura de software que permite la portabilidad del código implementado y se dispone de gran variedad de módulos para integrar nuevas aplicaciones. Se diferencian 31 diferentes dentro de esta serie.
- Serie MSP40 de muy bajo consumo. Engloba a una familia de microcontroladores de 16 bits, con un número de pines comprendido entre 14 y 125, memoria RAM de 128 B a 18KB y memoria no volátil (EEPROM, Flash, Fram) de 0.5 kB a 256 kB. Poseen muchos periféricos integrados: analógicos (comparadores, amplificadores, ADC...), digitales (*timers*, *watchdog*...), de comunicaciones (USB, SPI, I2C, UART...), etc. Dentro de este grupo se diferencian 539 modelos diferentes.
- Serie C2000 de control en tiempo real. Consiste en una serie de microcontroladores de la familia C28x- de 32 bits, con gran capacidad de cálculo, de 100 MHz y con memoria Flash comprendida entre 16 kB y 1 MB. Está pensado para aplicaciones de control en bucle cerrado, como el control de motores, fuentes de alimentación digitales, inversores, etc. Esta serie está formada por 109 microcontroladores.
- Serie Hercules, cuya característica más relevante es que cumple con los requisitos de seguridad de los estándares IEC 61508 SIL 3 e ISO 26262 ASIL D. Han sido creados con el objetivo de emplearlos en sistemas críticos de seguridad, pues cumplen con los requisitos de las aplicaciones industriales, de transporte y médicas de seguridad crítica. Pertenecen a la familia ARM-Cortex-R de 32 bits, de 80 MHz a 330 MHz, memoria Flash de 128 kB a 4MB. A este grupo pertenecen 76 microcontroladores diferentes.
- Existen otros microcontroladores que no pueden clasificarse dentro de ninguno de los grupos anteriores. Se trata de microcontroladores ARM-Cortex-M4F, de 32 bits, capaces de comunicarse con muchos periféricos, y C28x + ARM Core, que pueden llevar a cabo el control de bucles cerrados y tareas de comunicación.

Tras la breve explicación sobre los diferentes grupos de microcontroladores de TI, resulta evidente que las series SimpleLink, C2000 y Hercules están dirigidas a aplicaciones muy diferentes de la presentada en este proyecto. Por consiguiente, tras una mayor investigación dentro de los otros dos grupos, se ha decidido analizar las placas MSP-EXP430G2 de la serie MSP430 y la EK-TM4C123GXL, perteneciente al grupo de microcontroladores nombrados en el último punto.

4.2.3.2.1 MSP-EXP430G2

Esta placa de desarrollo viene con dos microcontroladores: el MSP430G2553 y el MSP430G2452, pero el que se utilizaría principalmente sería el primero, de 16 MHz. Además, la placa incluye: un mini-USB para la comunicación y alimentación desde el ordenador, dos leds programables, un led de encendido, un botón de reset y un botón programable.

La subfamilia de MSP430G2x es la de más bajo coste dentro de su serie, y hace frente a la popularidad de otras placas como las de Arduino vistas anteriormente. El MSP430G2553, en formato PDIP, es el que presenta un mayor número de prestaciones dentro de esta subfamilia.

Se alimenta a un voltaje muy bajo, entre 1.8 y 3.6 V, a través de los pines Vss (tierra) y Vcc (alimentación) o a través del puerto USB. Presenta 5 modos de operación, de modo que cada uno consume menos que el anterior, a costa de disminuir el número de operaciones que se mantienen activas.

Con respecto a las entradas y salidas, consta de 20 pines, cada uno de los cuales con dos o más funciones posibles (excepto los pines Vss y Vcc anteriormente mencionados), pudiéndose utilizar 8 como entradas analógicas, con una resolución de 10 bits.

Para el almacenamiento de datos cuenta con 16 kB de Flash y 0.5 kB de RAM; y para la comunicación tiene una unidad UART, dos SPI y una I2C.

La frecuencia de conversión del MSP430G2553 está comprendida entre 0.28 y 0.48 MHz, por lo que es adecuado para el presente proyecto.

El tamaño de la placa es de 69.4x52.2 mm.

Tabla 4.4. Propiedades MSP-EXP430G2

Microcontrolador	MSP430G2553
Tensión de trabajo	[1.8, 3.6] V
Tensión de alimentación (recom)	[1.8, 3.6] V
Tensión entre Vss y Vcc (límite)	[-0.3, 4.1] V
Digital I/O Pins	20
Canales de entrada digitales	8
Memoria Flash	16 KB
RAM	0.5 KB
Frecuencia	16 MHz
Temperatura de trabajo	[-40, 85] °C

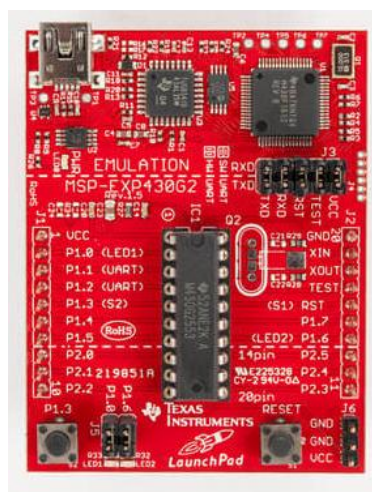


Figura 4.2. Placa MSP-EXP430G2. [48]

4.2.3.2 EK-TM4C123GXL

Esta placa, conocida como Launchpad Tiva, está basada en el microcontrolador TM4C123GH6PM, Arm-Cortex-MF4 de 32 bits y 80 MHz.

Para la memoria cuenta con 256 kB de Flash, 32 kB de SRAM y 2 kB de EEPROM; y para la comunicación tiene 8 unidades UART, 6 I2C y 4 SPI. Además, la placa tiene incorporada dos puertos micro USB 2.0, 2 CAN y también puede comunicarse por Ethernet.

Aparecen aquí dos formas de comunicación no vistas hasta ahora: CAN y Ethernet. CAN (*Controller Area Network*) es un protocolo de comunicaciones creado por la firma alemana Robert Bosch en 1985 para satisfacer la necesidad de conectar cada vez más dispositivos electrónicos en los coches. Una de las principales ventajas de este método es su elevada fiabilidad para la transmisión de datos en tiempo real, pero como contrapartida presenta una velocidad de transmisión baja. En cuanto a Ethernet, fue desarrollado en la década de 1970 por un estudiante de doctorado de la Universidad de Harvard, Robert Metcalfe. Este protocolo es considerablemente menos seguro que CAN, pero mucho más rápido y actualmente es muy utilizado.

En relación a las entradas y salidas, tiene 40 pines, de los que 12 son analógicos, con una resolución de 12 bits.

Pueden seleccionarse dos formas de alimentar la placa mediante un interruptor: a través del USB o del ICDI (*In-Circuit Debug Interface*) a una tensión de entre 4.75 V y 5.25 V.

La frecuencia de conversión del TM4C123GH6PM es de 1 MHz, mucho mayor de la mínima necesaria de 2 kHz.

Además de todo lo anterior, la placa cuenta con un botón de *Reset*, un interruptor para elegir la forma en que se va a alimentar la placa, un led RGB, un led de encendido y dos botones programables. Un led RGB es aquel en el que se combinan los colores rojo, verde y azul para crear diferentes tonos de luz.

Tabla 4.5 Propiedades EK-TM4C123GXL

Microcontrolador	TM4C123GH6PM
Tensión de trabajo	3.3/5 V
Tensión de alimentación (recom)	[4.75, 5.25] V
Digital I/O Pins	40
Canales de entrada digitales	12
Memoria Flash	256 kB
SRAM	32 kB
EEPROM	2 kB
Frecuencia	80 MHz
Temperatura de trabajo	[-40, 85] °C

4.2.3.3 Conclusiones

Tras esta descripción de las placas de Arduino y de Texas Instruments, se está en situación de hacer una primera selección.

Como se ha comentado en otras ocasiones, se pretende implementar en el diseño un número indeterminado de sensores N. Por cada sensor, es necesaria una entrada analógica en el microcontrolador. Recapitulando, en orden creciente, se tenía que: Arduino Uno contaba con 6; MSP-EXP430G2 con 8; Arduino Leonardo y Launchpad Tiva con 12; y Arduino Mega con 16. Estas entradas analógicas son transformadas en digitales por medio de un conversor analógico digital (ADC) interno, para que el microprocesador pueda trabajar con ellas.

No obstante, también hay conversores analógicos digitales externos, que se pueden utilizar para convertir

la salida del sensor a digital y después conectarla a una entrada digital del microprocesador. Para tratar de evitar esta última opción y no aumentar así el número de elementos del montaje, en un principio se intentará evitar la implementación de las placas Arduino Uno y MSP-EXP430G2, por ser las que tienen un menor número de entradas analógicas.

En relación a la programación de las placas de uno y otro tipo, ambas cuentan con un entorno de desarrollo (IDE, *Integrated Development Environment*, Entorno de Desarrollo Integrado) que facilita la tarea del desarrollo del *software* y evita tener que realizar la programación directamente en ensamblador. El primero en salir fue el IDE de Arduino, que puede ser utilizado para la programación de cualquiera de sus placas. En Texas Instruments, el entorno recibe el nombre de Energía y surgió después del IDE de Arduino para hacer frente a las facilidades existentes para programar las placas de Arduino. No obstante, Energía no puede emplearse para cualquier placa de Texas Instruments, aunque en este caso no afecta, puesto que las dos placas preseleccionadas aquí sí pueden programarse de esta forma.

Comparando las placas de Arduino y Texas Instruments, se ve que las segundas son un poco más baratas. Sin embargo, existe mucha más documentación sobre las placas Arduino, incluyendo libros de texto, foros, tutoriales, etc. Por esta razón, se decide la implementación de una placa Arduino, siempre que la diferencia de coste no resulte excesiva.

Con todo ello, se selecciona la placa Arduino Leonardo, pues es más sencilla que la Arduino Mega y su precio no es mucho mayor que la de la placa EK-TM4C123GXL. Se trata de una selección provisional, pues habrá que analizar si sus prestaciones son suficientes para integrar en el diseño el resto de elementos requeridos.



Figura 4.3. Placa Arduino Leonardo. [44]

5 DISEÑO DEL CONJUNTO

Una vez analizados los componentes principales del registrador portátil de campo magnético, hay que comprobar que es posible conectar unos con otros y, en el caso de que esto no fuera posible, habría que cambiar el dispositivo seleccionado por otro de los analizados en capítulos anteriores.

Será necesario analizar detalladamente las salidas y entradas del sensor de campo magnético elegido, a fin de determinar los circuitos que necesitan para su implementación. Uno de los aspectos más importantes es el acondicionamiento de la señal de salida de dicho sensor para que las medidas sean interpretadas correctamente por la placa de control.

Otro punto fundamental es la comunicación entre el lector de código de barras y la placa Arduino, para lo que será determinante el tipo de interfaz que tenga el lector.

Además, con el objetivo de facilitar la recogida de datos almacenados en la placa sobre las medidas de campo magnético, se considerará la posibilidad de integrar una tarjeta de memoria. De esta forma, los datos no ocuparán memoria en el Arduino y cuando se requiera verter la información en un ordenador, bastará con introducir la tarjeta de memoria, sin tener que conectar el Arduino al ordenador.

5.1. Pines del sensor HMC1001

Este sensor posee 8 pines, de los cuales 2 son de salida y 6 de entrada. A continuación, se muestra un esquema del mismo, proporcionado en su hoja de características.

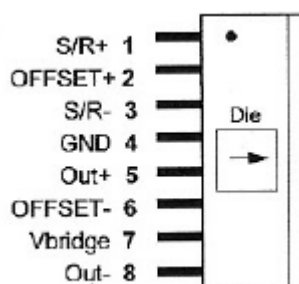


Figura 5.1. Pines del sensor HMC1001 [17].

5.1.1 Pines Vbridge y GND

A través de estas entradas se alimenta el sensor. Puede alimentarse como máximo a una tensión de 12 V, pero su tensión típica de alimentación es 5 V. Como las placas Arduino tienen un pin que es capaz de proporcionar 5 V, la alimentación de los sensores puede hacerse directamente desde la placa, conectando Vbridge con el pin 5 V y los pines de GND de ambos dispositivos.

5.1.2 Pines S/R+ y S/R-

Tanto esta pareja de pines como los de OFFSET+ y OFFSET- que se verán a continuación, son implementados por *Honeywell* con el objetivo de mejorar el funcionamiento de los sensores sin necesidad de utilizar bobinas externas alrededor de los sensores.

La función de estos pines en concreto es restablecer los dominios magnéticos, es decir, la alineación de las finas capas que constituyen el sensor, tras producirse un campo de valor muy elevado. Si el campo magnético detectado está dentro del rango de campo del sensor, los momentos magnéticos volverán a su posición inicial tras la desaparición del mismo. En el caso del sensor HMC1001, el intervalo lineal de campo es de ± 2 gauss, pero el fabricante asegura que la orientación del campo no se ve afectada al estar expuesto a campos menores de 10 gauss. Se requieren unos 40 gauss para que los dominios magnéticos sean totalmente realineados.

Los dominios magnéticos también se ven modificados con el uso del sensor, pues las finas capas que los constituyen pueden causar un aumento del ruido debido a los cambios de la dirección del campo magnético. Aunque este ruido sea considerablemente pequeño, si se quieren medir órdenes de campo magnético muy pequeños, como es el caso, afectará considerablemente a la sensibilidad. Por ello, los pines S/R también se utilizan para optimizar los dominios magnéticos, consiguiendo aprovechar mejor la sensibilidad del sensor.

Tras lo mencionado anteriormente, se hace evidente la necesidad de incorporar la función de estos dos pines a los sensores. Para ello, en la propia hoja de características del sensor aparece un circuito recomendado para su implementación. El objetivo de este circuito es aplicar unos pulsos de corriente en la resistencia de *Set/Reset* para realinear los dominios.

Para la construcción del mismo habrá que tener en cuenta los siguientes valores, dados por el fabricante:

- La resistencia de *Set/Reset* toma valores comprendidos entre 1.5 y 1.8 Ω a una temperatura ambiente de 25 °C.
- Los picos de corriente necesarios para la realineación del campo están comprendidos entre 3 y 5 A. Estos límites de corriente son elegidos de forma que con la mínima corriente se asegure el mínimo valor de campo magnético necesario para la realineación y que con la máxima se evite que se fundan los cables que unen la resistencia y los pines.
- El coeficiente de temperatura de la resistencia *Set/Reset* tiene un valor de $\alpha = 0.37 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$.

Con este coeficiente de temperatura es posible analizar el circuito bajo las condiciones más extremas de temperatura. El máximo valor del voltaje aplicado viene limitado por el valor más pequeño que puede tomar la resistencia, esto es, a temperaturas más bajas, evitando así que se produzcan picos de corriente demasiado elevados. Por otro lado, el mínimo valor de voltaje aplicado se determina para el valor más elevado de la resistencia, es decir, a temperaturas más altas, para asegurar el mínimo pulso de corriente necesario para la realineación del campo.

A continuación, se muestran los cálculos de lo comentado para un intervalo de temperatura de funcionamiento de -15 a 50 °C.

- Cálculo del mínimo valor de voltaje

1. Resistencia a -15 °C \rightarrow

$$R(-15^{\circ}\text{C}) = R(25^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 1.8 \left[1 + \frac{0.37}{100} \cdot (-15 - 25) \right] \approx 1.53 \text{ } \Omega$$

2. Máxima corriente aplicable \rightarrow 5 A

3. Máximo voltaje $\rightarrow V_{\text{max}} = I_{\text{max}} \cdot R(50^{\circ}\text{C}) = 5 \cdot 1.53 = 7.65 \text{ V}$

- Cálculo del mínimo valor de voltaje

1. Resistencia a 50 °C \rightarrow

$$R(50^{\circ}\text{C}) = R(25^{\circ}\text{C}) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 1.8 \left[1 + \frac{0.37}{100} \cdot (50 - 25) \right] \approx 2 \text{ } \Omega$$

2. Mínima corriente necesaria $\rightarrow 3 \text{ A}$
3. Mínimo voltaje $\rightarrow V_{\min} = I_{\min} \cdot R(50^\circ\text{C}) = 3 \cdot 2 = 6 \text{ V}$

Por consiguiente, el voltaje aplicado debe estar comprendido en el intervalo $[6, 7.65] \text{ V}$. No obstante, hay que tener en cuenta las caídas de tensión en el circuito *Set/Reset*, por lo que el voltaje aplicado se incrementará un poco con respecto al límite superior anteriormente calculado, siendo al final igual a $V_{\text{dd}} = 8 \text{ V}$.

En la figura 5.2, se muestra el esquema del circuito *Set/Reset* que se ha simulado en el programa Simulink de Matlab para comprobar que funciona como se esperaba. El esquemático se ha realizado con el programa Micro-Cap, que cuenta con un editor de esquemas eléctricos y electrónicos.

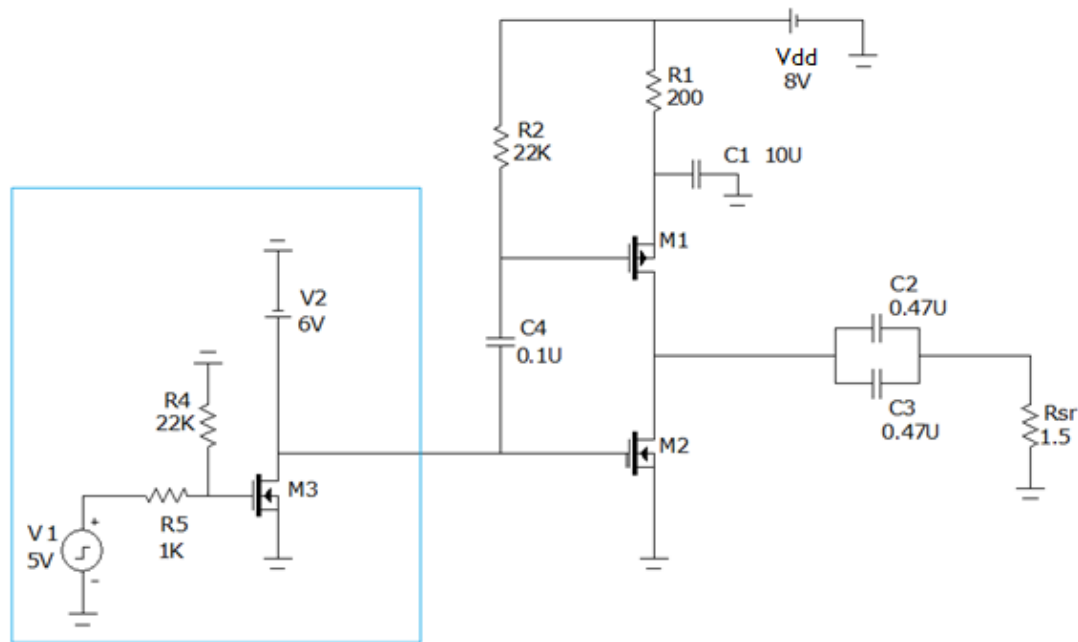


Figura 5.2. Montaje del circuito *Set/Reset*

La parte del circuito contenida dentro del recuadro azul de la figura 5.2 engloba los elementos que permiten dar el pulso de tensión necesario para que los mosfets M1 y M2 conmuten. La fuente de tensión de onda cuadrada representa al pulso de tensión proporcionado por la placa de Arduino. El transistor mosfet M3 hace la función de un interruptor digital de potencia. Se ha elegido un transistor mosfet de tipo “*logic level*”. Para poder justificar esta elección, es necesario realizar una breve explicación sobre los transistores mosfets.

De manera simplificada, un mosfet es capaz de conducir corriente eléctrica entre dos de sus patillas (drenador y surtidor), al aplicar una tensión superior a la denominada tensión umbral (V_T) en otra de sus patillas (puerta, *gate*).

Tiene tres modos de funcionamiento: corte, lineal y saturación.

- Región de corte. La tensión aplicada es menor que la umbral, por lo que no conduce corriente. Se comporta como un interruptor abierto. Las ecuaciones que lo definen son:

$$V_{GS} < V_T$$

$$I_D = 0$$

- Región lineal. El transistor se comporta como un elemento resistivo no lineal ($R_{DS(ON)}$) controlado por tensión. Verifica las siguientes ecuaciones:

$$V_{GS} > V_T \text{ y } V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

$$I_D = f(V_{GS}, V_T)$$

- Región de saturación. Cuando la tensión aplicada es mayor que la umbral, el mosfet mantiene la corriente en el drenador a un valor constante, independientemente del valor de la tensión. Por tanto, se comporta como una fuente de corriente.

$$V_{GS} > V_T \text{ y } V_{DS} > V_{GS} - V_T$$

$$I_D = Cte$$

Además, hay una cuarta región denominada de ruptura. Como su propio nombre indica, en esta región se rompe la unión semiconductor, perdiendo sus propiedades. Por esta razón, esta región no se utiliza casi nunca.

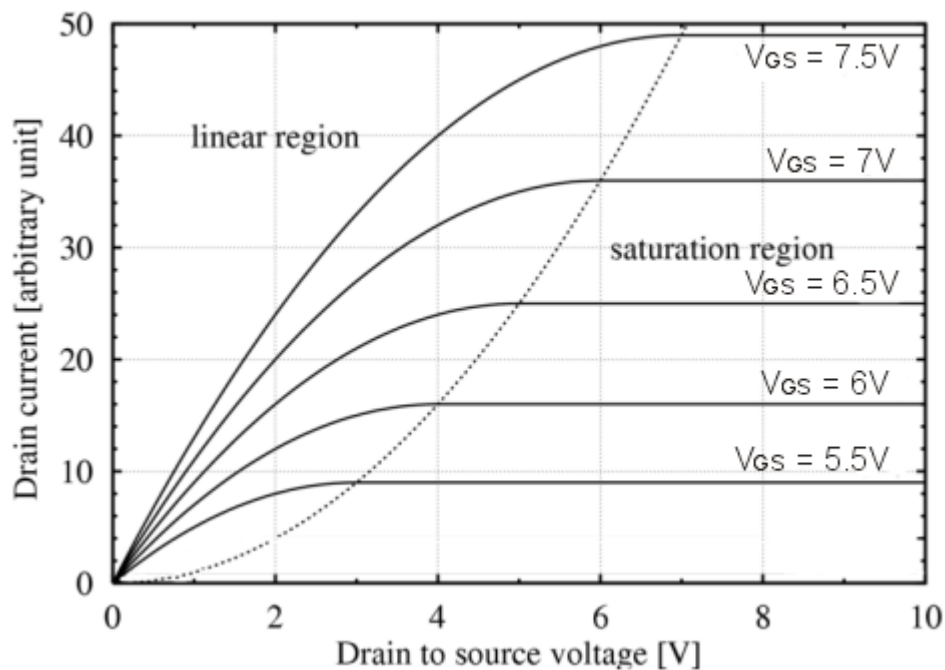


Figura 5.3. Curva Mosfet [51].

Tras esto, se deduce que lo más conveniente es que el transistor pase de la región de corte a la región de saturación en el menor tiempo posible, puesto que en la región lineal, al comportarse como un elemento resistivo, se producen muchas pérdidas. El problema se encuentra en que el microcontrolador de la placa Arduino Leonardo, al igual que sucede con la mayoría de microcontroladores, puede proporcionar una tensión máxima de 5 V. Por tanto, es difícil alcanzar la región de saturación del transistor, como se deduce de los valores de tensión que aparecen en la figura 5.3.

Por esta razón, se utiliza un transistor de tipo “logic level”, que se caracteriza por tener una tensión umbral mucho menor que los transistores típicos. En este caso, el transistor elegido tiene una tensión umbral comprendida entre 1 y 2 V. Por tanto, al ser mucho menor que los 5 V que proporciona el microprocesador, el transistor pasará rápidamente a la región de saturación.

Con respecto a las resistencias R4 y R5, se utilizan para mejorar las condiciones de funcionamiento del circuito. La resistencia R5= 1 k Ω sirve para limitar la corriente que el transistor absorbe inicialmente, en el pequeño periodo de tiempo en el que se encuentra en la región lineal. La resistencia R4= 22 k Ω conectada a masa sirve para definir un estado lógico claro, en situaciones en las que el microprocesador no lo hiciese, como en la inicialización del mismo.

Cuando el mosfet-N (M3) conmuta, pasando a la región de saturación, se genera la onda cuadrada de

tensión de 6 V de amplitud. En el esquema de la hoja de características del sensor, esta onda tenía una amplitud de 5 V, pero al simularlo con dicho valor, los pulsos de corriente no alcanzaban los 4 A y, aunque en general pueden tomar valores entre 3 y 5 A, cuando se quiere medir campos pequeños es recomendable que el pulso sea de unos 4 A. Por tanto, para que los pulsos de corriente tomaran valores mayores, ha sido necesario aumentar el valor alto de la onda de tensión a 6 V.

De forma resumida, el funcionamiento de este circuito es el siguiente:

1. Inicialmente la tensión está a su nivel alto, de modo que el Mosfet-N (M2) está conduciendo, conectando a tierra la resistencia *Set/Reset* y los condensadores C1 y C2. Mientras, el Mosfet-P (M1) está en corte.
2. Cuando la tensión pasa a su nivel bajo de 0 V, el Mosfet-N entra en corte y el Mosfet-P conduce. De esta forma, el circuito R-C es sometido repentinamente a la tensión Vdd. Como este cambio es muy rápido y los condensadores estaban inicialmente totalmente descargados, todo el voltaje llega a la resistencia *Set/Reset*, produciéndose el pulso de *Reset*.
3. Al volver la tensión a su nivel alto, los Mosfets de nuevo conmutan sus estados. Esto hace que los condensadores, que ya se habían cargado durante el pulso de *Reset*, se descarguen al estar conectados de nuevo a tierra, lo que ocasiona un voltaje negativo que recorre a la resistencia *Set/Reset*. Esto da lugar al pulso de corriente de *Set*.

Los valores de los condensadores C1 y C2 vienen determinados por la duración que debe tener el pulso. Este no puede ser excesivamente largo para reducir el calor liberado, pero tampoco puede ser muy corto para que se produzca totalmente la magnetización del *Set* o *Reset*. Por ello, la constante de tiempo del pulso tiene que estar comprendida entre 1 y 2 μs , lo que asegura que el pico de corriente se mantendrá al menos al 95 % de su máximo valor durante unos 50 ns. Calculando la constante de tiempo del circuito, queda que:

$$\tau = R \cdot C = (0.47 + 0.47) \cdot 1.5 = 1.41 \mu\text{s}.$$

Las resistencias R4 y R5 se incluyen para optimizar el funcionamiento del circuito. Al cambiar el nivel de tensión, el mosfet M3 absorbe una cierta corriente que carga el capacitor interno del terminal *Gate*. Con la resistencia R5 de 1 k Ω se limita esta corriente inicial.

Por otra parte, la resistencia R4 de 100 k Ω conectada a masa sirve para definir el estado del circuito en momentos en que su valor no esté especificado, como sucede en la fase de inicialización del microcontrolador.

Por último, se muestra a continuación la simulación del circuito anterior en Simulink:

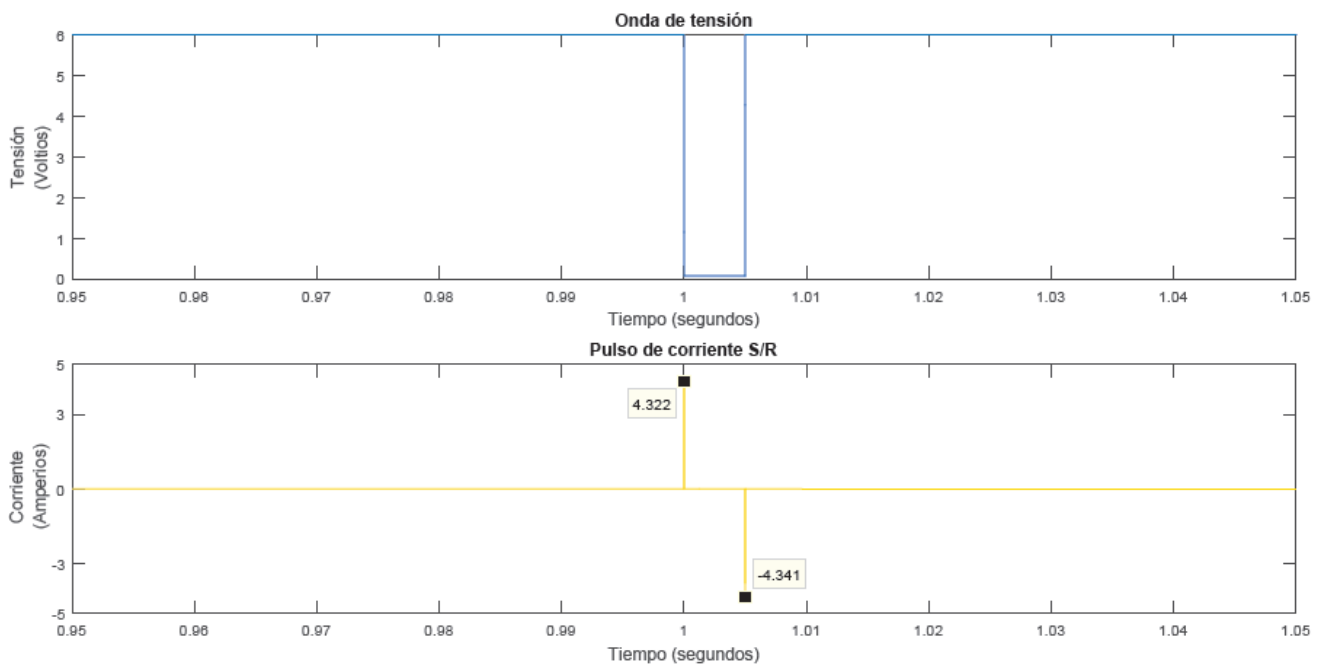


Figura 5.4. Simulación circuito *Set/Reset* obtenida en Simulink

5.1.3 Pines *OFFSET+* y *OFFSET-*

Estos pines pueden ser utilizados para eliminar el *offset* que presentan los sensores HMC1001.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, estos sensores están contruidos según la configuración del puente de *Wheatstone*, que consiste en cuatro resistencias variables dispuestas formando dos divisores de tensión. Debido a la imposibilidad de que las cuatro resistencias tengan exactamente el mismo valor, siempre se produce un *offset*, es decir, aparece una tensión de salida sin necesidad de que el sensor haya recibido un estímulo.

Este efecto aparece incluso aunque la diferencia entre los valores de las resistencias sea muy pequeña. Por ejemplo, el valor típico de las resistencias del sensor es de 850 Ω ; suponiendo que R1 y R4 tengan unos valores de 851 Ω , quedaría:

$$V_{\text{off}} = V_{o+} - V_{o-} = V_b \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = 5 \left(\frac{850}{851 + 850} - \frac{851}{850 + 851} \right) = -2.9 \text{ mV}$$

Si se está midiendo, por poner un caso, un campo de 10 μT = 0.1 G, la salida en tensión del sensor sería: 0.1G · 3.2 mV/V/G · 5 V = 1.6 mV. Por tanto, el *offset* representaría el 64 % de la tensión de salida del sensor, distorsionando completamente la medida realizada.

A la vista de lo anterior, resulta obvio que será necesario eliminar el *offset* de alguna forma, aunque para ello no serán utilizados estos pines. Este tema será analizado detenidamente en el apartado 3 de este capítulo.

5.1.4 Pines *Out+* y *Out-*

Estos son los pines de salida, cada uno de los cuales mide la caída de tensión en uno de los divisores de tensión. Idealmente, ante la ausencia de campo aplicado, sus valores tienen que ser iguales, es decir, *Out+* = *Out-*. A la salida de estos pines será necesario colocar una serie de elementos que acondicionen la señal, de forma que pueda ser recibida correctamente por la placa de control. Los elementos utilizados se explicarán en el apartado siguiente.

5.2. Acondicionamiento de señal

Los acondicionadores de señal son elementos que convierten un tipo de señal eléctrica de salida de un sensor en otra señal apta para ser registrada por otro elemento, para que este pueda extraer la información que se busca.

En este caso en concreto, el acondicionamiento de señal resulta imprescindible, puesto que la salida de los sensores HMC1001 se encuentra en el rango de valores de ± 32 mV, mientras que los pines analógicos de las placas de Arduino miden en el rango de 5 a 0 V. Por tanto, hay que convertir la salida del sensor al rango del Arduino, puesto que en caso contrario no se estaría aprovechando la máxima sensibilidad.

Al igual que para el *Set/Reset*, para el acondicionamiento de señal también hay en la hoja de características del sensor un circuito recomendado, que será el que se implementará.

En la figura 5.5, al igual que se hizo con el circuito del pulso *Set/Reset*, se recoge el circuito de acondicionamiento que se ha simulado en Simulink y cuyo esquema aquí mostrado se ha realizado con Micro-Cap. Como se puede ver en dicha figura, el circuito está formado por dos amplificadores operacionales, en concreto por un diferencial restador (arriba) y un seguidor de tensión (abajo).

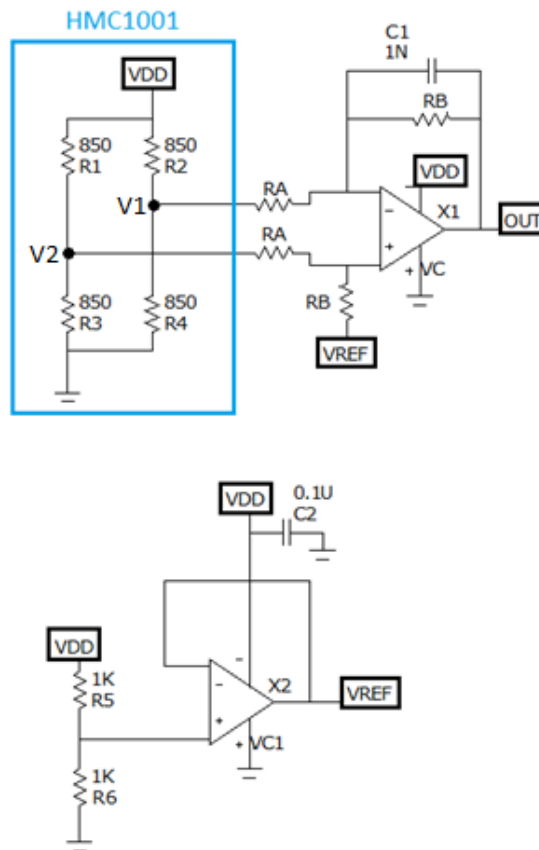


Figura 5.5. Acondicionamiento de señal

La parte del circuito comprendida dentro del recuadro azul se corresponde con el interior del sensor HMC1001, el ya mencionado puente de *Wheatstone*.

La tensión VDD es la de alimentación del sensor, es decir, 5 V.

La salida de este circuito responde a la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \frac{R_B}{R_A} (V1 - V2) + VREF$$

Los valores de R_A y R_B se determinan a partir de los valores de tensión de entrada y de salida:

- Tensión de la señal de entrada $\rightarrow 3.2 \text{ mV/V/gauss} \cdot 5\text{V} \cdot (\pm 2\text{gauss}) = \pm 32 \text{ mV}$
- Tensión de la señal de salida $\rightarrow [0, 5] \text{ V}$.

Se recomienda que el valor de la resistencia R_A sea entre 4 y 10 veces superior al de las resistencias del puente de *Wheatstone* del sensor, que tienen un valor de 850Ω . Por tanto R_A tiene que estar comprendida entre 3.4 y $8.5 \text{ k}\Omega$. Tomando un valor de $5 \text{ k}\Omega$, se calcula R_B :

$$5 = \frac{R_B}{5} \cdot 0.032 + 2.5 \rightarrow R_B = 390.6 \text{ k}\Omega$$

Normalizando los valores de las resistencias, queda: $R_A=5.1 \text{ k}\Omega$ y $R_B=390 \text{ k}\Omega$.

Además de amplificar la señal de salida del sensor, es necesario desplazar la onda de tensión. El valor medio de la señal inicial es de 0 V , mientras que el valor medio de la tensión de salida, que después es recibida por el Arduino, es de 2.5 V . Por esta razón, a la onda amplificada de tensión se le suma una tensión de continua de valor V_{REF} , que tiene que ser igual a 2.5 V .

Para generar esta tensión continua de 2.5 V se utiliza el divisor de tensión y el seguidor de tensión ya vistos en la figura 5.4. La ecuación por la que se rige el seguidor de tensión es la siguiente:

$$V_{REF} = \frac{R_5}{R_5 + R_6} V_{DD}$$

$$\text{Como } R_5 = R_6 \rightarrow V_{REF} = \frac{1}{2} V_{DD} = 2.5 \text{ V}$$

El seguidor de tensión es un circuito que proporciona a la salida la misma señal que a la entrada. Aunque en una primera instancia pueda parecer que su uso no cumple ninguna función, esto no es así. Los amplificadores operacionales son circuitos con una impedancia de entrada muy alta, idealmente infinita, por lo que la corriente que demandan es prácticamente nula.

Esta impedancia tan elevada proporciona un efecto de aislamiento de la salida respecto de la señal de entrada, de forma que el divisor de tensión no se ve afectado por el resto del circuito.

$$V_{REF} = \frac{R_5}{R_5 + R_6 // R_{op}} V_{DD}$$

Suponiendo $R_{op} = 100 \text{ M}\Omega$ (aunque puede tomar valores mucho mayores), se tiene que:

$$R_{eq} = \frac{R_6 R_{op}}{R_6 + R_{op}} = 999.99 \Omega \approx 1 \text{ k}\Omega = R_6$$

Si no se utilizara, la resistencia R_6 estaría en paralelo con la impedancia equivalente del resto del circuito, modificando el valor de la tensión V_{REF} .

A continuación, se muestra la simulación en Simulink del circuito descrito para comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

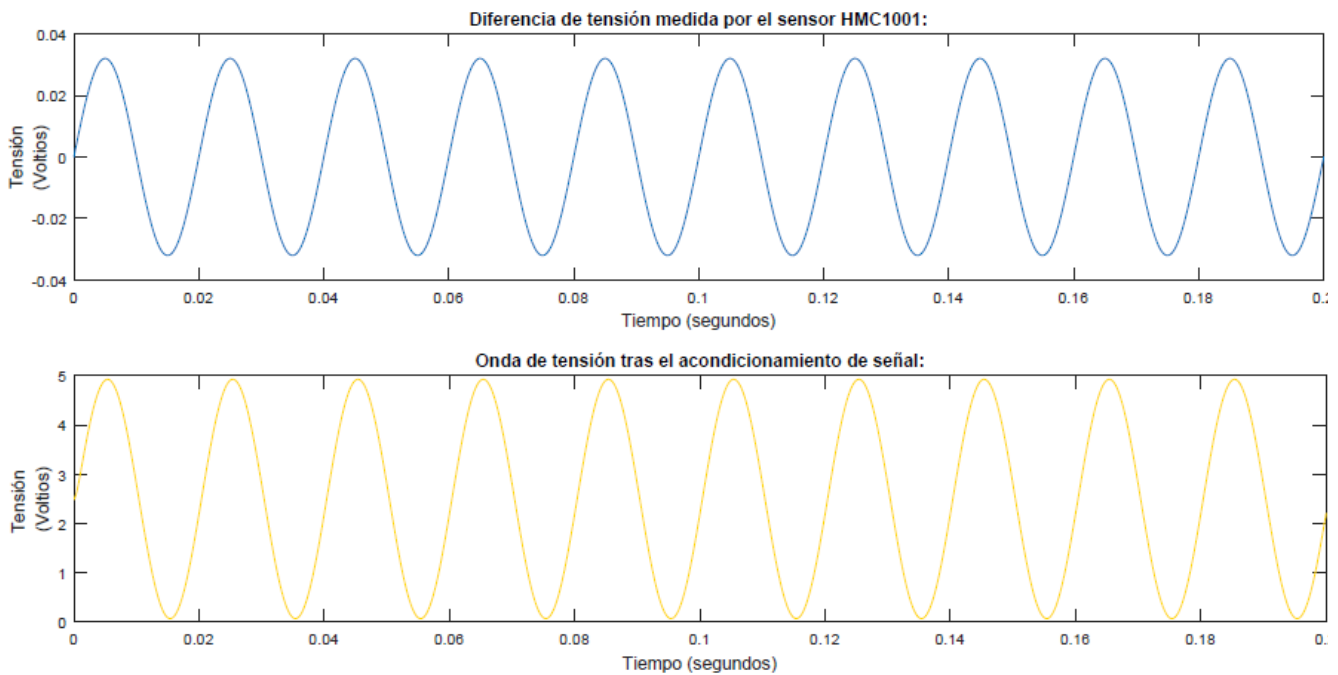


Figura 5.6. Simulación acondicionamiento de señal obtenida en Simulink

En las gráficas de la figura 5.6 puede observarse cómo la onda de tensión tras el acondicionamiento, cuando el sensor está expuesto al límite máximo de campo (2 gauss) se encuentra entre [0, 5] V, con un pequeño margen por ambos extremos. Con este margen se evita que se produzcan saturaciones.

5.3. Eliminación del *Offset*

Existen diferentes formas de eliminar el *offset*. A continuación, se describirán brevemente algunas de ellas:

- Método de resistencia en paralelo. Se trata de uno de los métodos más simples y consiste en, una vez identificadas las resistencias de mayor valor del puente de *Wheatstone*, colocar resistencias en paralelo con las mismas para que el valor de la resistencia equivalente sea igual al del resto. El inconveniente de este método es que es necesario contar con resistencias de muy diversos valores.
- Método de eliminación de *offset* mediante amplificadores. Este método consiste básicamente en realizar una modificación en el circuito de acondicionamiento de señal explicado en el apartado anterior. En el divisor de tensión que hay a la entrada del seguidor de tensión (Figura 5.4), se introduce una resistencia de valor variable, de manera que según sea el valor del *offset*, se aplica una tensión diferente V_{REF} . Por ejemplo, si el *offset* tiene un valor de 20 mV, entonces la tensión V_{REF} sería: $V_{REF} = 2.5 - 0.02 = 2.48$ V.
- Método de realimentación. El principio de este método se basa en modular la señal de salida del sensor a una frecuencia elevada, eliminar el *offset* y pasarlo de nuevo a una señal de continua. Esto se consigue a partir de los pines *Set/Reset*, para lo que es necesario usar una onda cuadrada de unos 200 Hz que alternativamente cree los pulsos de corriente de *Set/Reset*. De esta forma se producirá también una onda cuadrada de tensión, que permitirá la eliminación del *offset*. La ventaja de este método es que el valor del *offset* es actualizado continuamente, por lo que no solo se tendría en cuenta el valor distinto de las resistencias, que viene de fábrica, sino que también corregiría los cambios producidos por la temperatura y por el paso del tiempo. No obstante, presenta un inconveniente, este es que

habría que aplicar una onda cuadrada de corriente en los pines *Set/Reset* de manera continuada, lo que consumiría buena parte de la energía de la batería que tuviera el registrador portátil.

- Método de los pines *OFFSET+/OFFSET-*. Este método consiste en aplicar una corriente, cuyo valor depende del valor de la resistencia de los pines de *OFFSET* y del *offset* que tenga el sensor, a través de estos pines. El campo magnético producido puede sumarse con el existente y eliminar el *offset*.
- Método digital. Una vez conocido el *offset* que presenta el sensor, si la señal es recibida por un microprocesador, este mismo puede eliminarlo digitalmente. Aunque este método resulta fácil de implementar porque no necesita ningún elemento físico, no es conveniente utilizarlo cuando la resolución es un factor importante, como sucede en este caso.

Una vez explicadas brevemente las diferentes alternativas disponibles para eliminar el efecto del *offset*, se decide adoptar el segundo método, que consistía en utilizar una resistencia de valor variable. Así con un cambio mínimo en el circuito del acondicionador de señal se consigue también eliminar este efecto, y no se pierde resolución como sucedería si se aplicara el método digital.

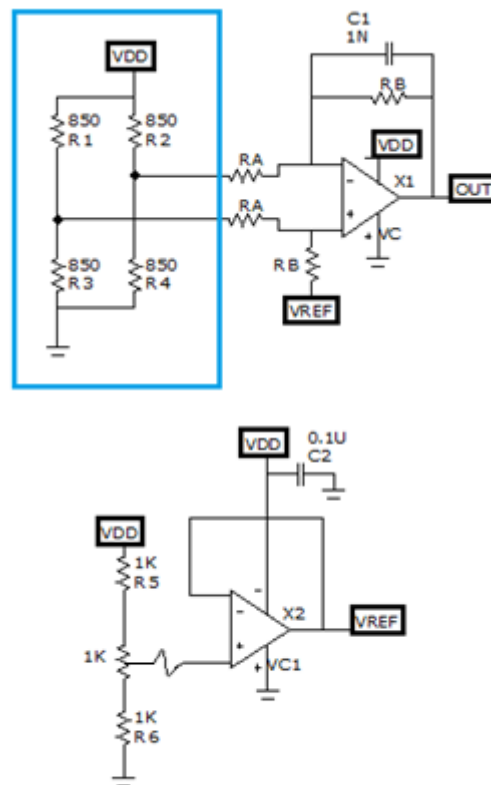


Figura 5.7. Modificación acondicionamiento de señal para eliminar el efecto *offset*

5.4. Implementación del lector de código de barras

Recordando lo visto en el capítulo 3 de selección del lector de código de barras, en un principio, se eligió el lector DFR0314 de DFRobot.

Este módulo tenía una interfaz RS-232, cuyo rango de tensiones está comprendido en el intervalo [-15, 15] V. Como la interfaz de Arduino es TTL - UART, cuyo rango de tensiones se encuentra en el intervalo [0, 5] V, se requiere adaptar la señal para poder llevarse a cabo la transmisión de datos del lector de código de barras al

microcontrolador. En concreto, se necesita un convertidor RS-232 a TTL con conector macho DB9, puesto que el cable del módulo lector es un DB9 hembra.

Este tipo de adaptadores pueden encontrarse fácilmente en tiendas de electrónica, ya sea en tiendas físicas o virtuales. En este caso, se ha adquirido un adaptador a través de la compañía de Amazon, por un precio de 10.07 €, de la marca NulSon. La empresa distribuidora es Sulsom TLD, dedicada a la venta al por mayor de productos electrónicos de Arduino, Raspberry Pi, etc. Todas las opiniones que hay en Amazon sobre esta empresa son positivas, por lo que se considera fiable la compra de este adaptador.

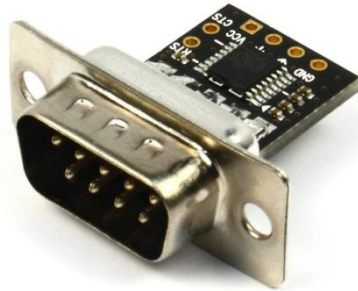


Figura 5.8. Convertidor macho a DB9

Las características más destacables de este adaptador son:

- Voltaje que soporta: 3.3 V a 5 V
- Consta de 4 pines en el borde exterior: dos para la transmisión de datos (TX y RX), situados en el medio; y dos para la alimentación (Vcc y GND), situados en los extremos.
- También tiene otros dos pines en el borde de uno de los laterales (RTS y CTS), que no se utilizarán. Estos sirven para controlar el flujo de los datos entre los dispositivos, optimizando la comunicación entre ambos. No obstante, al tratarse de un primer modelo no se tendrán en cuenta.

En un principio, este conector no solo serviría para la transmisión de datos, sino también para la alimentación del lector (por medio de los pines Vcc y GND). Pero no podría alimentarse desde Arduino Leonardo, puesto que en las especificaciones del lector se indica que la corriente consumida varía entre los 50 mA y los 170 mA; mientras que la placa podría proporcionar un máximo de 50 mA. Tampoco podría alimentarse desde las placas de Arduino Uno o Arduino Mega, pues la corriente que estas placas proporcionan es igual a la de Leonardo.

Por tanto, el lector se alimentará desde otra fuente de alimentación externa, al igual que sucede con la placa Arduino.

Tabla 5.1 Especificaciones de corriente del lector DFR0314

Interface	RS232	KB	USB
Supply Voltage		DC +5 V ± 5 %	
Output Voltage (Typ.)	± 9 V	+5 V ± 5 %	+5 V ± 5 %
Output low Voltage (Max.)		0.7 V	
Current Draw		± 10 %	
Power On (Typ.)	170 mA	170 mA	170 mA
Stand By (Typ.)	50 mA	50 mA	50 mA
Operation (Typ.)	150 mA	150 mA	150 mA

No obstante, para poder realizar una serie de pruebas y comprobaciones iniciales con el lector, se ha adquirido un cable conector de USB a jack macho. De esta forma, de manera temporal, el lector puede alimentarse desde el ordenador. Este conector se ha obtenido a través de la compañía de Amazon por un precio 1.62€. Este elemento se ha elegido tomando como prioridad el precio, pues como solo se va a utilizar para las pruebas, no estando presente en el diseño final, la calidad no es un factor fundamental. Aún así, las opiniones que hay tanto del producto como del proveedor en Amazon son favorables.



Figura 5.9 Conector USB a 5.5 mm/ 2.1 mm 5V conector CC

En la figura 5.10, se muestra un esquema de la conexión que hay que realizar para poner en funcionamiento el lector de código de barras.

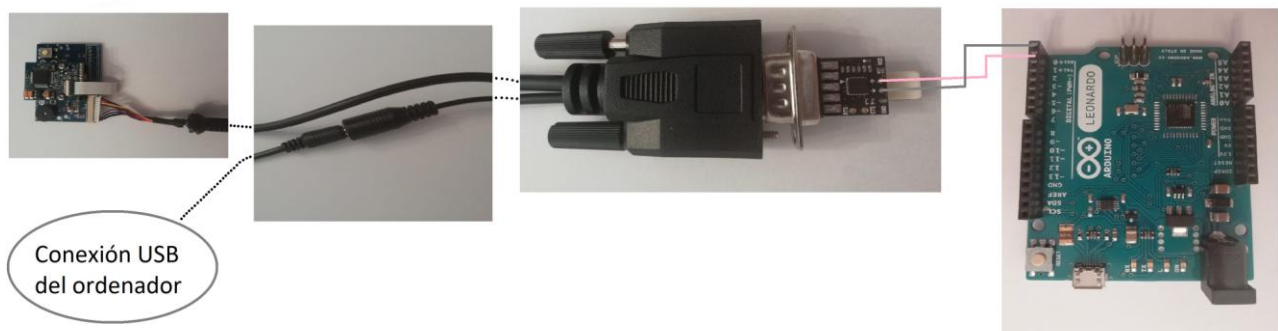


Figura 5.10 Conexión del módulo lector de código de barras

5.5. Implementación de la tarjeta de memoria

Como ya se mencionó al inicio de este capítulo, se ha decidido incorporar al registrador una tarjeta microSD, de manera que se facilitará la extracción de los datos recogidos por el registrador.

Lo primero que hay que comprobar es que se dispone de una forma sencilla de establecer la comunicación entre la tarjeta SD y el Arduino. Para ello, se ha encontrado un módulo de tarjeta microSD fabricado expresamente con este objetivo, que se vende por ebay a un precio de 1 €/unidad, con gastos de envío incluidos. También sería posible la fabricación por cuenta propia de un módulo de este tipo, pero debido al costo tan pequeño que presenta, resulta más rentable su compra.

Las características del módulo son:

- Voltaje de alimentación: 3.3 V o 5 V
- Interfaz: SPI

- Dimensiones: 24x42x12 mm

Se observa que el módulo presenta características apropiadas para conectarse con Arduino: se puede alimentar través de los pines de 3V3 o de 5V. Con respecto a la interfaz SPI, en el caso de Arduino Leonardo se hace a través del conector ICSP. Pero también sería posible hacerlo con cualquiera de las otras placas Arduino descritas en apartados anteriores, puesto que todas disponen de al menos una interfaz SPI.

En cuanto a la corriente consumida, no se especifica su valor. No obstante, el fabricante asegura que este adaptador puede ser alimentado desde una placa Arduino Uno, que es capaz de proporcionar la misma corriente que la placa Leonardo (50 mA). Al recibir el adaptador, se comprobó experimentalmente que, efectivamente, puede alimentarse desde la placa Arduino Leonardo.

El distribuidor del producto es la empresa Safety Price Electronics, localizada en Olula del Río, Almería, que se dedica a la venta de productos de Arduino, Raspberry Pi, de impresión 3D y de electrónica, en general. En ebay está categorizado como “vendedor excelente”, es decir, recibe valoraciones altas de sus compradores, envía los artículos con rapidez y tiene un muy buen servicio de historial. A la vista de la información recopilada del distribuidor, se considera fiable la compra.

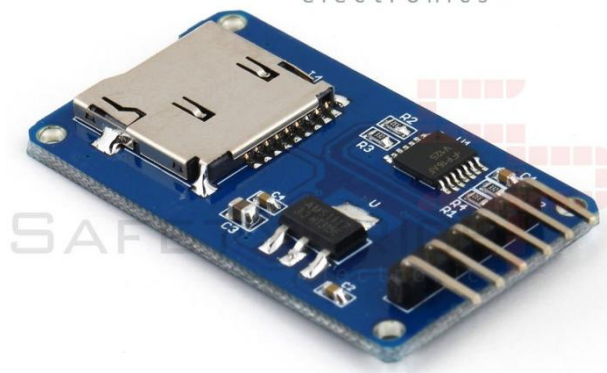


Figura 5.11. Módulo lector tarjeta Micro SD

Con respecto a la tarjeta microSD, esta puede ser comprada en cualquier tienda que venda productos de electrónica. En este caso, se disponía de una tarjeta de la marca Kingston de 8 GB, por lo que se ha ahorrado la compra de otra tarjeta.

En la figura 5.12, puede verse la conexión entre el módulo de la tarjeta microSD y la placa de control.

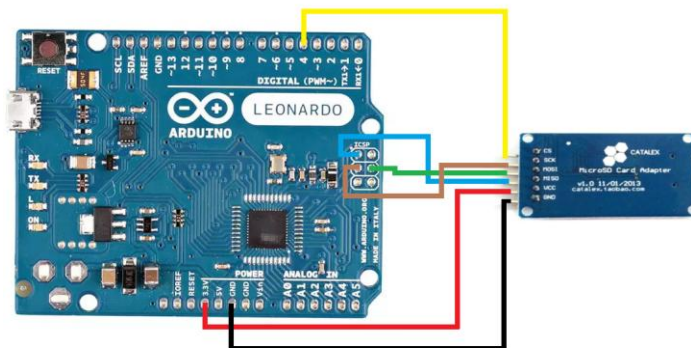


Figura 5.12. Conexión entre módulo de tarjeta microSD y placa de control

6 DISEÑO DE PCB

Una vez comprobado que todos los dispositivos pueden ser integrados para formar conjuntamente el registrador portátil, se diseña una placa de circuito impreso (PCB) para poder realizar todo el montaje y llevar a cabo una primera prueba en la que se pueda comprobar que todo funciona como se espera. El programa de diseño utilizado se denomina Proteus 7 Professional.

6.1. Características de las placas PCB

Como se trata de un primer diseño preliminar, se reducirá el número de dispositivos del montaje al mínimo, por lo que solo se incorporará un sensor de campo magnético del modelo seleccionado, HMC1001. De esta forma solo será necesario montar un circuito de acondicionamiento y un circuito *Set/Reset*.

Además, inicialmente se harán dos placas separadas: una que contenga al sensor HMC1001 y al circuito de acondicionamiento; y otra para el circuito *Set/Reset*. En el futuro, estas dos placas podrían unirse en una sola, reduciendo así el espacio ocupado, pero, para una primera aproximación, se ha decidido considerarlas por separado para que sea más fácil el análisis de cada una de ellas. A partir de ahora, la primera placa recibirá el nombre de “placa de acondicionamiento” y la segunda de “placa *Set/Reset*”.

6.1.1 Placa de acondicionamiento

La placa de acondicionamiento cuenta con cinco borneros, cada uno para diferentes entradas y salidas.

Las entradas de la placa son:

- La tensión de alimentación del sensor, que puede provenir del microcontrolador o de otro sistema de alimentación distinto.
- El pulso de corriente proveniente de la placa *Set/Reset*, que permite restablecer los dominios magnéticos del sensor HMC1001.

Las salidas de la placa son:

- La alimentación para la placa *Set/Reset*.
- La señal de salida del sensor HMC1001 antes del acondicionamiento de señal. Esta salida no cumple ninguna función, solo se ha incluido para disponer de más datos para el análisis del funcionamiento de todo el conjunto.
- La señal de salida del sensor HMC1001 después del acondicionamiento de señal, que será procesada por Arduino Leonardo.

6.1.2 Placa *Set/Reset*

La placa *Set/Reset* solo requiere 3 borneros, dos para entradas y uno para salida.

Las entradas son:

- La alimentación, proveniente de la placa de acondicionamiento.
- La señal de disparo del microcontrolador Arduino Leonardo, cuya frecuencia determinará el número de pulsos de corriente que se producirán.

La salida es el pulso de corriente, que se llevará como una entrada a la placa de acondicionamiento.

6.1.3 Consideraciones para el diseño

Al tratarse de un diseño de prueba, muy básico, no se incluyen elementos de protección, que sí serían necesarios incluir en las definitivas. Aunque lo ideal es que las placas sean los más compactas posibles para que ocupen el menor espacio disponible y se reduzcan al máximo los efectos parásitos y las pérdidas en las impedancias, en este caso esto tampoco se cumplirá, pues conviene tener espacio para poder realizar las pruebas y ensayos con mayor comodidad.

De esta manera, se hace un rutado a doble cara, para lo que se han tenido en cuenta una serie de consideraciones:

- Los borneros se sitúan en los bordes de las placas.
- Las resistencias variables se colocan de forma que haya espacio suficiente para manipularlas y poder modificar sus valores.
- Se mantiene un espacio mínimo entre pistas y se trata de realizarlas lo más directas y simples posibles, con cambios de dirección suaves, evitando formar ángulos de 90°.
- Se ponen dos planos de tierra, uno superior y otro inferior para asegurar que todas las tierras de los elementos se encuentran al mismo potencial, evitando la circulación de corrientes parásitas. También se colocan vías para conectar ambos planos de tierra y asegurar que todo está al mismo potencial.

6.1.4 Regulador LM317

Entre los dispositivos que componen ambas placas, se encuentran los reguladores LM317, que aparecen en ambas placas. Estos son necesarios para ajustar la tensión de alimentación. Para las pruebas y comprobaciones iniciales se utilizará una fuente que proporcionará una tensión constante de 12 V, que tendrá que ajustarse a las requeridas por las placas.

El dispositivo LM317 se trata de un regulador de voltaje ajustable entre 1.25 V y 32 V, capaz de proporcionar una corriente de 100 mA. Su montaje es muy simple, teniendo únicamente como elementos indispensables dos resistencias, una de ellas variable.



Figura 6.1. Pines del regulador de voltaje LM317

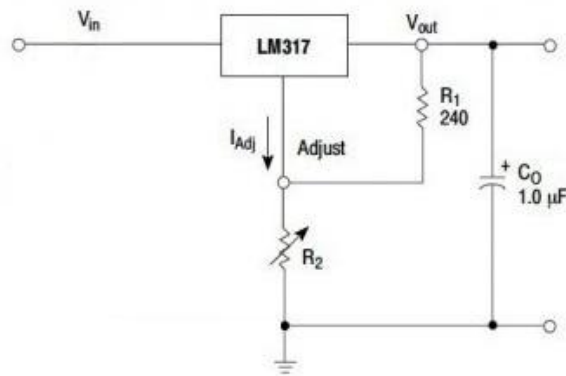


Figura 6.2. Montaje del regulador de voltaje LM317

En la figura 6.4, se observa que, además de las dos resistencias, se coloca un condensador a la salida con el objetivo de mejorar la respuesta transitoria.

La tensión de salida del regulador viene dada por la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = 1.25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2$$

Donde la corriente I_{ADJ} suele tomar valores en torno a $50 \mu\text{A}$, por lo que el segundo término de la ecuación se desprecia.

Por tanto, según la tensión requerida a la salida, se ajusta el valor de la resistencia variable R_2 .

6.1.5 Placas de prueba

Tanto de la placa de acondicionamiento como de la *Set/Reset*, se han realizado unos primeros modelos de las mismas en el laboratorio. En las figuras 6.3 y 6.4 se recogen los primeros prototipos.

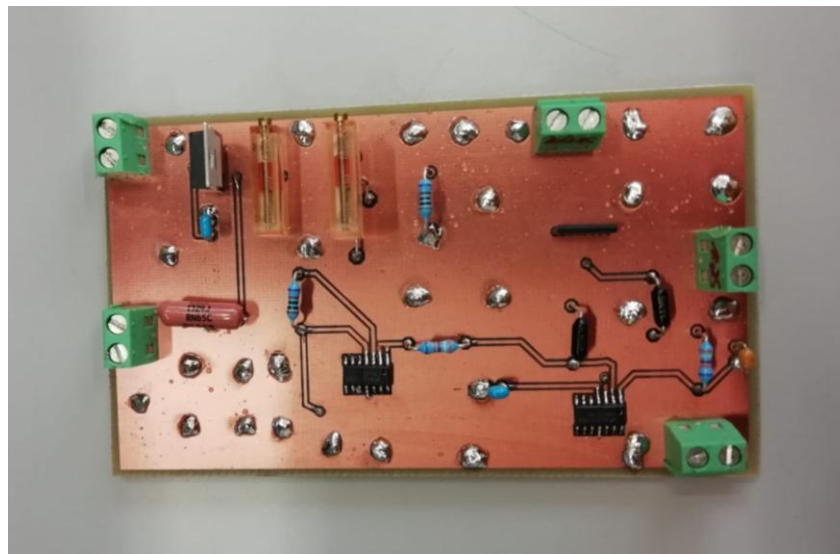


Figura 6.3. Placa de acondicionamiento

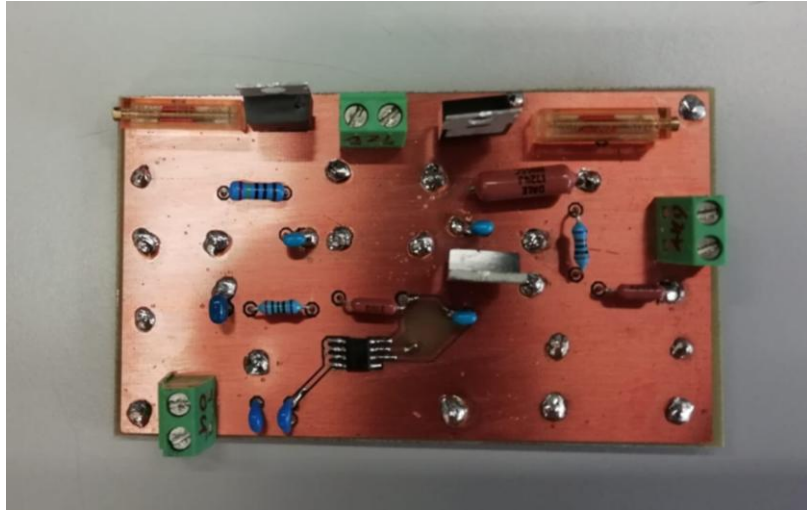


Figura 6.4. Placa *Set/Reset*

7 PROGRAMACIÓN DE LA PLACA DE CONTROL

Para que todas las partes del registrador portátil cumplan su función y sean capaces de actuar conjuntamente, la programación de la placa de control es fundamental. La placa de control es la responsable de coordinar al resto de dispositivos, razón por la cual en este capítulo se desarrollará el código a implementar en la placa.

7.1. Arduino IDE

Existen muchos entornos de desarrollo que pueden utilizarse para programar Arduino, pero en este caso se empleará el IDE propio de Arduino. Un entorno de desarrollo integrado es una herramienta que facilita al programador el desarrollo del software.

La razón por la que se ha elegido este IDE es porque, al ser el proporcionado por el propio fabricante de las placas Arduino, es el más utilizado por los usuarios, contando con una gran cantidad de documentación sobre su funcionamiento. Además, se basa en el lenguaje C++, ampliamente conocido y empleado en otros proyectos anteriores a este. Se ha utilizado la versión 1.8.5, descargada de manera gratuita desde la página oficial de Arduino (<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>), donde está disponible tanto para Windows, como para Mac y Linux.

7.2. Funcionamiento del dispositivo

En este subapartado, se explicará de forma resumida el funcionamiento que se quiere implementar en el registrador portátil a partir de la programación de la placa. Como se trata de una primera prueba, se tratará de hacerlo lo más simple posible para facilitar la depuración de posibles fallos o errores.

En primer lugar, cuando el microcontrolador se encienda se llevará a cabo un pulso *Set/Reset*, no volviendo a producirse otro hasta la siguiente vez en que se vuelva a encender. Esta acción se realiza con el objetivo de resetear el sensor y asegurar que las medidas que se tomen a continuación sean precisas. Tras esto, el aparato no llevará a cabo ninguna actividad hasta que no se lea un código de barras. Una vez que estemos colocados delante del código de barras que se quiera leer, se pulsa el botón del lector. Esta información será almacenada en la tarjeta SD.

En tercer lugar, nada más guardar el código, se tomarán durante 30 segundos las muestras registradas por el sensor de campo magnético, y se almacenarán también en la tarjeta SD.

Tras finalizar este proceso, el microcontrolador dejará de ejecutar instrucciones, hasta que de nuevo se lea un código de barras a través del lector.

7.3. Programación de la placa

7.3.1 Librerías

Las librerías (del inglés, *Library*) están compuestas por un conjunto de archivos comprimidos en un

archivo ZIP. Contienen código y datos que facilitan la interconexión de módulos electrónicos, sensores, pantallas... Hay librerías que ya vienen integradas en el propio IDE de Arduino, pero otras es necesario instalarlas.

Para el proyecto en cuestión, se han utilizado dos librerías, ambas integradas ya en el IDE. Por tanto, en las primeras líneas del código del programa, se muestra lo siguiente:

```
#include <SPI.h> //Librería para las comunicaciones SPI
#include <SD.h> //Librería para el manejo de la tarjeta SD
```

Ambas librerías son requeridas para el funcionamiento de la tarjeta SD.

7.3.2 Código implementado

Después de las librerías y de la declaración de las constantes y las variables que se emplearán en el código, siempre aparecen dos funciones: *setup* y *loop*.

La función *setup* solo se ejecuta una vez tras encenderse la placa o resetearse. En ella, se inicializan las variables, las comunicaciones, los modos de los pines... y se recoge cualquier otra acción que solo sea necesario realizar una vez.

La función *loop*, como su propio nombre indica (*loop* significa bucle en español), se ejecuta cíclicamente después del *setup*. Se corresponde con un bucle *While(1)* típico en lenguaje C. Por tanto, esta función contiene el código que se ejecuta continuamente.

7.3.2.1 Función Setup

Dentro del *setup*, se utilizan diferentes funciones para la inicialización de los puertos serie, la tarjeta SD y el pin utilizado para dar el pulso. Además, también se recoge aquí el código requerido para ejecutar el pulso *Set/Reset*, puesto que este solo se llevará a cabo una vez al encender el dispositivo.

Con respecto a los puertos serie, hay dos: el *Serial*, que permite la transmisión de datos de la placa al ordenador; y el *Serial1*, que se reserva para la transmisión de información a través de los pines 0 (RX) y 1 (TX). El *Serial1* en este caso se utiliza para la transmisión de datos desde el lector de código de barras a la placa de Arduino.

Para las comunicaciones con los puertos serie se requiere utilizar dos funciones, que son las siguientes:

`while (!Serial)`: Se espera a que se abra la comunicación serie (*serial monitor*) para que comience un *sketch* o programa. Sin ella, los datos que hubieran sido enviados antes de abrir el *Serial Monitor* no podrían verse. Esta función solo es necesaria en algunas placas, como la Leonardo, porque cuenta con la comunicación USB integrada. La mayoría de las placas, al no tener este tipo de comunicación, tienen otro microcontrolador que realiza la conversión de USB a Serial. Por consiguiente, esta función no es necesaria, puesto que al abrir el *Serial Monitor* se reinicia la ejecución del programa.

`Serial.begin(9600)`: Inicializa la comunicación por el puerto serie. El número entre paréntesis indica la velocidad de transmisión en baudios⁴.

Para la inicialización de la tarjeta SD, se emplea la función `SD.begin(chipSelect)`. Con ella se comprueba que la tarjeta de memoria está conectada y lista para usar. Si todo está correcto devuelve un 1 y si hay algún fallo devuelve un 0.

Aunque no es estrictamente necesario, con el fin de conocer si el proceso de inicialización se ha superado con éxito, se utiliza la función `Serial.println(val)`. Así, se imprime un mensaje de error en caso negativo y un mensaje de éxito en caso contrario.

Para dar el pulso que requiere la placa *Set/Reset*, se configura un pin como salida. Esto se hace mediante la función: `pinMode(pin, mode)`. Con la función `digitalWrite(pin, value)` ponemos la salida a nivel alto (*HIGH*), correspondiente a una tensión de 5V, o a nivel bajo (*LOW*), correspondiente a una salida

⁴ Unidad de medida de la velocidad de transmisión de señales que se expresa en símbolos por segundo.

de 0 V.

Una vez inicializado el pin, se muestra el código que hará que la salida se mantenga a la tensión de 5 V durante un tiempo determinado. El código implementado es el siguiente:

```
inicio=millis();
while(millis()<=inicio+tiempo_5v){
}
```

La función `millis()` devuelve el número de milisegundos que han pasado desde que el programa se ejecutó. Por consiguiente, con el bucle `while`, el pin se mantiene a valor alto durante el tiempo que se haya establecido en la variable “`tiempo_5v`”.

También podría utilizarse la función `delay(time)`, que pausa el programa durante la cantidad de tiempo (en milisegundos) especificada. Aunque es más simple de usar que la función `millis()`, se ha evitado emplearla porque puede entrar en conflicto en un futuro con otras funciones. Esto se debe a que durante el tiempo especificado en el `delay`, el microcontrolador se pausa y no es capaz de realizar ninguna otra tarea a la vez, por lo que no detecta posibles interrupciones que tuvieran lugar.

7.3.2.2 Función Loop

Todo el código presente en el *Loop* está contenido dentro de una función `if`, cuya condición es que se detecte la lectura de un código de barras a través del escáner.

En primer lugar, se lee el código leído por el escáner, para lo que se utiliza el siguiente código:

```
datacodigo="";
if(Serial1.available()>0) { // comprueba si hay algún carácter recibido
  while (Serial1.available()>0) {
    codigo = char (Serial1.read()); // leemos un byte
    datacodigo= datacodigo+codigo; // Guarda el código en variable datacodigo
    delay(10); // espera 10 ms antes de leer el siguiente carácter
  }
}
```

Primero, se resetea una variable de tipo *string*, previamente declarada en la función *setup*, denominada “`datacodigo`”, en la que se almacenará el código de barras leído por el escáner.

La función `Serial1.available()` devuelve el número de bytes disponibles para leer desde el puerto serie, siendo este igual a cero cuando no hay ninguno. Por consiguiente, lo que se pretende utilizando esta función es que el código contenido dentro de los bucles `if` y `while` se ejecute cíclicamente hasta que ya no quede ningún carácter del código por leer.

Con la función `Serial1.read()` se lee la información recibida, que al ser de tipo *char*, requiere crear una variable auxiliar de este tipo, que se ha denominado “código” para guardar la información. No puede guardarse directamente en la variable “`datacodigo`” porque, como se mencionó anteriormente, es de tipo *string*. Tras esto, se renueva la información contenida en la variable “`datacodigo`”. Antes de leer el siguiente byte, se esperan 10 ms para asegurar la estabilidad de las lecturas.

Una vez que se haya leído el código de barras completo, la función `Serial1.available()` devolverá un 0, por lo que saldrá de la función `if` y del bucle `while`.

Tanto el código de barras leído como las medidas que tomará el sensor, se almacenarán en un archivo de texto creado en la tarjeta SD. Estos archivos tendrán por nombre un número, empezando por el 1, que permitirán saber en qué orden se tomaron los datos guardados en la tarjeta.

A continuación, se muestra el código empleado para la creación de los archivos de texto:

```
int existe=LOW;

while (existe == LOW)
{
  sprintf(nombrefichero, "%d.txt",i); //genera el archivo 1.txt,2.txt...xxx.txt
  if (SD.exists(nombrefichero))
  {
```

```

    i = i+1;
  }
  else
  {
    exist = HIGH;
  }
}

```

myFile = `SD.open`(nombrefichero, `FILE_WRITE`); //Crea el archivo de texto en SD

Para no tener que guardar en la memoria Flash el número del último archivo creado, reservando así la memoria para futuras posibles ampliaciones, se ha implementado el código anterior.

La variable “i” de tipo entero se declara e inicializa con el valor 1 en la función *setup*; y será la que dé nombre a los archivos que se vayan creando.

Supongamos que el dispositivo se encendió una primera vez y se tomó la información de una máquina, con su correspondiente código de barras y lectura del campo magnético. Esta información quedó almacenada en un archivo con el nombre 1.txt en la tarjeta SD. Tras esto, el dispositivo se apagó.

De nuevo, se van a tomar las medidas de una nueva máquina, para lo que se enciende el dispositivo. Por tanto, la variable “i” vuelve a tener un 1 como valor. Para que los nuevos datos tomados no se sobrescriban en los anteriores, se comprueba si existe el archivo 1 y, en caso afirmativo, se incrementa el valor de la variable i en uno. Esto se repite hasta que el archivo creado ya no exista.

La función `sprintf(char, string)` convierte una cadena de caracteres (`string`) en una variable tipo `char`. Por tanto, tiene como parámetros una variable de entrada de tipo `string` y otra variable de salida de tipo `char`.

Para comprobar si el archivo generado existe, se utiliza la función `SD.exists(filename)`, que tiene como parámetro de entrada el nombre del fichero del que se quiere comprobar si existe. La función devuelve un 1 si el fichero ya existe, y un 0 en caso contrario.

La función `SD.open(filepath, mode)` abre el archivo en la tarjeta SD. Tiene como parámetros de entrada el nombre del fichero a abrir, y opcionalmente el modo en el que se abre. Hay dos modos: `FILE_READ`, que lo abre para leer, empezando por el principio; y `FILE_WRITE`, que lo abre para escribir. Como parámetro de salida, devuelve un 1 en caso de que se haya abierto correctamente, y un cero en caso contrario.

Con respecto a la variable de tipo entero “existe”, se trata de una variable auxiliar que se mantiene a valor bajo mientras que los archivos generados ya estén presentes en la tarjeta SD; y se pone a valor alto en caso contrario.

Por último, llegamos a la última parte del código:

```

if(fichero) //fichero abierto con éxito
{
  fichero.println(datacodigo); //Escribe en fichero el código de barras

  inicio_lectura=millis();
  while(millis()<=inicio_lectura+tiempo_lectura){//toma medidas durante 30s
    int ValorSensor = analogRead(Sensor); // guarda en variable la medida
    fichero.println(ValorSensor); // Escribe en fichero la medida
    delay(1); // delay in between reads for stability
  }

  fichero.close();
}
else{
  Serial.println("Error opening datalog.txt"); //Indica que ha habido error
}

```

```
}  
}
```

Con este código, primero se comprueba que el fichero se ha abierto correctamente, devolviendo en caso contrario un mensaje de error. Después, se guarda en el archivo creado anteriormente el código de barras almacenado en “datacodigo”. Tras esto, se van tomando durante 30 segundos las medidas del campo magnético, a la vez que se van guardando en el archivo de la tarjeta SD. Una vez pasados los 30 segundos, el archivo se cierra y se finaliza todo el proceso.

Con el primer `if` se comprueba que el fichero se haya abierto correctamente.

La función `file.println(data)` imprime los datos en el archivo, siempre que este haya sido abierto en modo escritura (`FILE_WRITE`). Los parámetros de entrada son: la variable `file`, que es la instancia devuelta por la función `SD.open()`; y la variable `data`, que se corresponde con los datos que se quieren imprimir.

De nuevo, vuelve a utilizarse la función `millis()`, en este caso para tomar las medidas durante 30 segundos.

Para la lectura de las medidas tomadas por los sensores, se emplea la función `analogRead(pin)`, a la que hay que especificarle el pin del que tiene que leer la información.

Por último, con la función `file.close()` se cierra el fichero.

En el Anexo II, se recoge el código completo implementado en la placa Arduino Leonardo.

8 PRUEBAS EN EL LABORATORIO

En este capítulo, se recogen las pruebas que se han llevado a cabo para comprobar que el código descrito en el capítulo anterior, y que ha sido implementado en la placa de control, funciona según lo previsto.

La forma más sencilla de depurar los fallos contenidos en un código de programación es mediante la división del mismo. De hecho, inicialmente se realizaron cuatro programas por separado:

- Lectura de las medidas tomadas por el sensor HCM1001 de campo magnético.
- Salida del pulso de tensión requerido para que se produzca el pulso *Set/Reset*.
- Lectura del código de barras a partir del módulo lector DF0314.
- Almacenamiento de datos en la tarjeta microSD.

Estos fueron probados de manera independiente en el laboratorio y, una vez que todos funcionaban adecuadamente, se unieron en uno solo, que se corresponde con el explicado en el apartado anterior.

A continuación, se mostrará el montaje realizado para verificar que las diferentes partes del código funcionan correctamente.

8.1. Lectura de medidas del sensor HMC1001

Este código requiere como entrada la lectura de una señal de tensión a través del pin analógico A0, que se correspondería con la señal de salida del sensor HMC1001 tras el acondicionamiento. Como los valores máximos que puede tomar esta onda de tensión de 50 Hz, es de 5 V de valor eficaz, para la comprobación de este código se ha utilizado una fuente de tensión que module una onda con las características anteriores. También se ha utilizado el osciloscopio para comprobar que la onda de tensión proporcionada por la fuente es la adecuada.

El montaje realizado en el laboratorio se muestra en la figura 8.1:

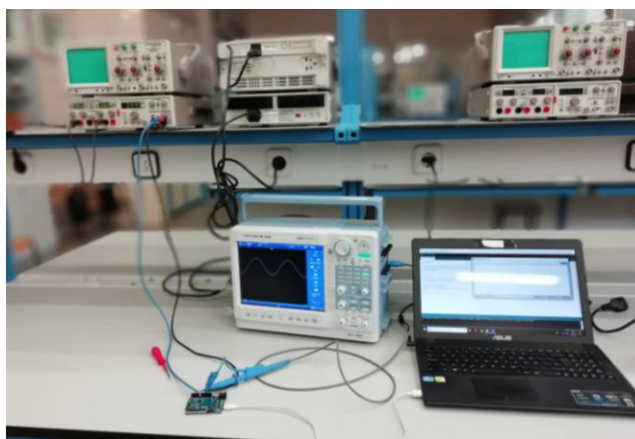


Figura 8.1. Montaje para prueba de lectura del sensor HMC1001

8.2. Salida del pulso de tensión para la placa *Set/Reset*

Para comprobar el correcto funcionamiento de este código, hay que visualizar el pulso de tensión producido por el Arduino. Para ello, se utiliza un osciloscopio. El montaje llevado a cabo se recoge en la figura 8.2:

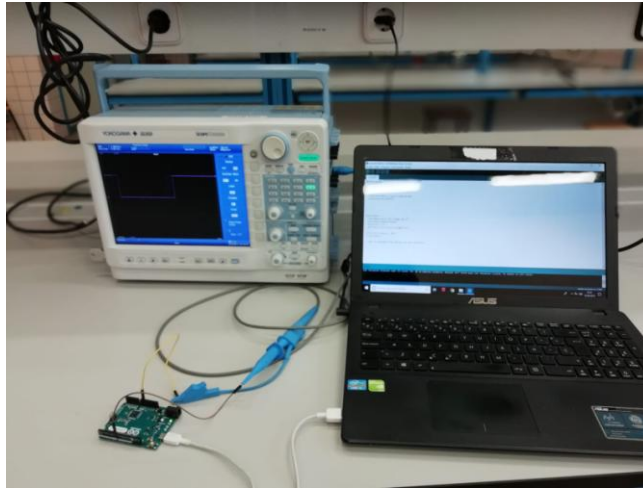


Figura 8.2. Montaje para prueba de pulso para placa *Set/Reset*

8.3. Lectura del código de barras a partir del modulo escáner DFR0314

Para la comprobación de este código no se requiere ningún equipo del laboratorio, solo hay que conectar el módulo escáner con la placa de control y verificar que el código obtenido por pantalla se corresponde con el leído por el módulo.

El montaje de este caso se muestra en la figura 8.3:

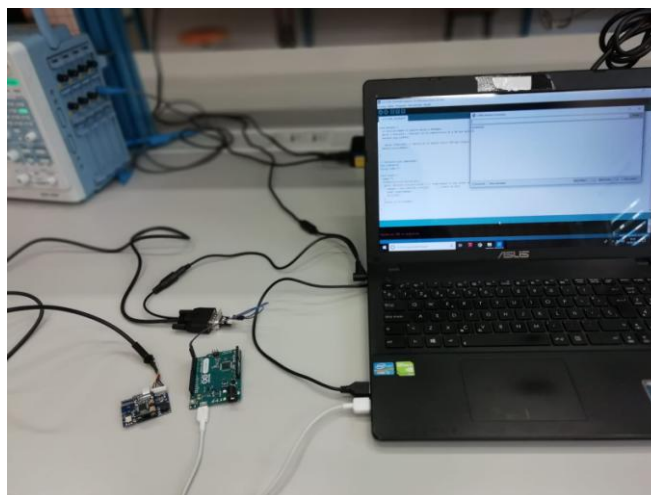


Figura 8.3. Montaje para prueba de lectura del código de barras

8.4. Almacenamiento de datos en tarjeta microSD

Para la comprobación de este código, tampoco se requiere ningún equipo del laboratorio. La verificación consiste en crear un archivo de texto y almacenar en él una cadena de caracteres correctamente.

El montaje se corresponde con el mostrado en la figura 8.4:

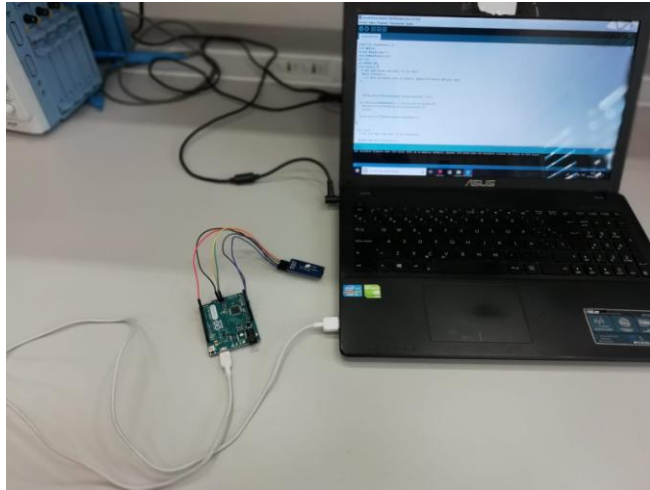


Figura 8.4. Montaje para prueba de almacenamiento de datos en microSD

9 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Es este último capítulo, se resumirán los objetivos alcanzados y se propondrán futuras líneas de investigación.

9.1. Conclusiones

El objetivo final de este proyecto era el de realizar el diseño de un registrador portátil matricial de campo magnético uniaxial. Para ello, se han llevado a cabo las siguientes actividades:

- Se ha realizado una investigación exhaustiva para seleccionar los modelos más adecuados de los diferentes componentes que conforman el registrador: sensores, módulo lector de código de barras y placa de control.
- Se ha implementado una tarjeta microSD para el almacenamiento de datos y se han realizado las placas PCB requeridas para que el sensor HMC1001 funcione correctamente.
- Se ha programado la placa de control, para coordinar el funcionamiento de todos los dispositivos que forman parte del registrador.
- Se han realizado pruebas para depurar fallos en el código implementado en la placa de control.

9.2. Futuras líneas de trabajo

En primer lugar, como trabajo futuro, se propone la realización de una serie de pruebas en el laboratorio:

- Pruebas y ensayos que permitan testear las placas de acondicionamiento y *Set/Reset* que se han diseñado y construido en el presente proyecto.
- Ensayos con el sensor de campo magnético HMC1001. A partir de los datos aquí proporcionados del sensor, se puede conseguir mejorar el funcionamiento del mismo, mediante su calibración en el laboratorio.
- Ajuste de cada cuánto tiempo y bajo qué condiciones se requiere dar un pulso *Set/Reset*. De esta forma, se evita tener que dar un pulso cada vez que el registrador portátil se inicialice, lo que supone un ahorro de energía.

En segundo lugar, una vez que el funcionamiento del sensor haya sido estudiado en profundidad, se requiere trabajar los datos de lectura de las medidas del campo magnético procesadas por la placa de control. Esto se debe a que, como la placa tiene 8 bits de resolución, los valores de tensión se guardan con valores comprendidos entre 0 y 524, por lo que habría que ver la relación entre estos y los valores de tensión.

El programa de la placa de control también podría mejorarse, pues el aquí presentado solo incluye las acciones principales de forma básica. Por ejemplo, podría estudiarse la posibilidad de que la placa funcionara

en alguno de los modos de bajo consumo, disminuyendo así la energía requerida. También podría ajustarse mejor el tiempo en el que se toman las medidas de los sensores de campo magnético, pues para una primera aproximación se han tomado unos 30 segundos, que empiezan nada más que la placa de control reciba el código de barras leído.

En todas estas actividades solo se estaría teniendo en cuenta la presencia de un sensor, pero como el propio nombre de este proyecto indica, el registrador es matricial, es decir, hay varios sensores. Por tanto, el siguiente paso consistiría en aumentar progresivamente el número de sensores presentes en el dispositivo. Habría que realizar una placa de acondicionamiento y otra de *Set/Reset* por cada nuevo sensor. Un aspecto que tendrá que tenerse muy en cuenta será las interferencias electromagnéticas que puedan producirse por la presencia de un número elevado de sensores de campo magnético.

Por último, habría que realizar un diseño más compacto del registrador portátil. Por ejemplo, las placas de acondicionamiento y *Set/Reset* se podrían unir en una única placa, mucho más compacta que las dos mostradas en este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Fernández Cabanas, Manés/ García Melero, Manuel/ Alonso Orcajo, Gonzalo/ Cano Rodríguez, José Manuel/ Solares Sariego, Juan, *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*, cap. 1 y cap. 7, España: Marcombo, 1998.
- [2] Anteliz Jaimes, Antonio A., "El flujo de dispersión magnético como herramienta de análisis para detección de fallas en motores de inducción mediante técnicas de análisis espectral", Gerencia Tecnológica Informática, ISSN 1657-8236, Vol. 8, Nº. 20, 2009, p. 47-54.
- [3] García Santamaría, Crsitina, *Análisis espectral de señales para la detección de fallos de motores de inducción*, universidad de Valladolid, escuela de ingenierías industriales; Valladolid, 2017.
- [4] Iglesias, Adolf M., *Montaje y mantenimiento de máquinas eléctricas rotativas*. Cano Pina SL: 2015.
- [5] Herrero-Albillos Julia, "Reconstruida la historia del campo magnético de un asteroide", División de la Materia Condensada: 2015.
- [6] Tumanski Slawbonir, *Handbook of magnetic measurements*, Boca Ratón: CRC Press, 2016.
- [7] Tumanski Slawbonir, "Induction coil sensors- A review".
- [8] RAE, Diccionario de la lengua española, disponible en del.rae.es.
- [9] Hauser, H./ Strangl, G./ Fallmann, W./ Chbicovsky, R/ Riedling, K., *Magnetoresistive sensors*. Institut für Industrielle Elektronik und Materialwissenschaften TU Wien, Vienna, Austria.
- [10] Caruso, Michael J./Bratland, Tamara, Honeywell/ Smith, Carl H/ Schneider, Robert, Nonvolatile Electronics, "A closer look at the way magnetic field sensors work and where they are used".
- [11] Reig, Candid/ Cubells-Beltran, María Dolores/ Ramírez Muñoz, Diego, "Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing", sensors, nº 9(10), p. 7919-7942, 2009.
- [12] Pérez García, Miguel Ángel, *Instrumentación electrónica*, Madrid: Ibergarceta Publicaciones, 2012.
- [13] Centro Español de Metrología, *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*, 3ª Edición en español 2012
- [14] Romero, Pedro L., *Transparencias Bloque I teoría incertidumbre medida*
- [15] Romero, Pedro L., *Transparencias Bloque III Sensores y amplificadores operacionales*
- [16] Multi Dimension Technology, <http://www.dowaytech.com/en/>.
- [17] Honeywell, <https://www.honeywell.com/>.

-
- [18] NVE Corporation, <https://www.nve.com/>.
- [19] Asahi Kasei Microdevices, <https://www.akm.com/>.
- [20] TDK-Micronas, <https://www.micronas.com/>.
- [21] Magnetic Sciences, <http://www.magneticsciences.com/>.
- [22] RS, <https://es.rs-online.com/web/>
- [23] Digi-Key, <https://www.digikey.es/>
- [24] Mouser Electronics, <https://www.mouser.es>
- [25] Arrow Electronics, <https://www.arrow.com/es-mx>
- [26] Farnell, <https://es.farnell.com>
- [27] Honeywell International "Inc, Total Error Band Specification for Honeywell Heavy Duty Pressure Transducers, PX2 Series and PX3 Series", 2018
- [28] Mathas, Carolyn, "Understanding and using error band in sensor selection": 2017
- [29] Norma UNE-EN 61298-2:2008
- [30] STMicroelectronics, http://www.st.com/content/st_com/en.html.
- [31] NXP Semiconductors, <https://www.nxp.com/>.
- [32] AnandTech, <https://www.anandtech.com/show/2832/2>
- [33] <http://www.bluescan.com.es/bluescan/www/index.html>
- [34] TAL Tech, <http://www.taltech.com/>
- [35] DFRobot, <https://www.dfrobot.com/>.
- [36] Champtek, <http://www.champtek.com/>.
- [37] OmronMicroscan, <http://www.microscan.com>.
- [38] Rakinda Technologies, <http://www.rakinda.com>.
- [39] Scan Home, <http://www.scanhome.com/>
- [40] RTscan, <https://www.rtscan.net/es/Code-Readers/oem-2d-imager-module-t206/>
- [41] Díaz Estrella, Antonio/ Arrebola Pérez, Fabián/ Bandera Rubio, Juan Pedro/ Cano García, José Manuel/ Del Toro Lasanta, José Carlos/ Vizcaíno Martín, Francisco Javier, *Teoría y diseño con microcontroladores de Freescale*, España: McGRAW-HILL, 2008.

- [42] Perales Esteve, Manuel, *Tema 10. Periféricos del MSP430G2553*, Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales.
- [43] Barragán, Herando, *The untold history of Arduino*, <http://arduinohistory.github.io/>
- [44] Arduino, <https://www.arduino.cc>.
- [45] Perales Esteve, Manuel, *Tema 7. Microcontroladores. Familia MSP430*, Sistemas eléctricos digitales, Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales
- [46] López Aldea, Eugenio, *Arduino. Guía práctica de fundamentos y simulación*, Madrid: RA-MA Editorial, 2016.
- [47] <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/>
- [48] Texas Instruments, <http://www.ti.com/>
- [49] Honeywell, Application Note AN213
- [50] Honeywell, Application Note AN212
- [51] <https://www.inventable.eu/como-conectar-un-mosfet-a-un-microcontrolador/>
- [52] García Ortega, Juan/ Pérez Ridao, Francisco/ Barrero García, Federico/ Toral Marín, Sergio, *Apuntes de la asignatura Electrónica General: 2013-2014*, Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales.

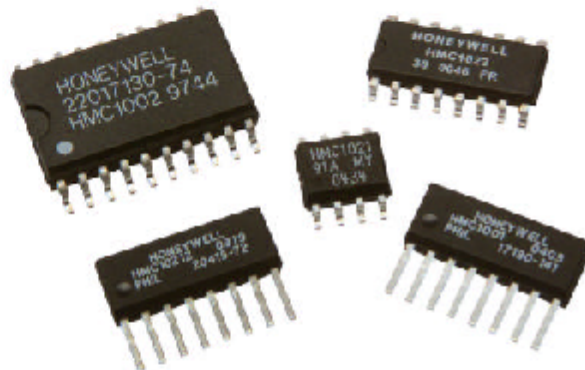
ÍNDICE DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

CA	Corriente Alterna
AMR	<i>Anisotropic Magnetoresistance</i>
GMR	<i>Giant Magnetoresistance</i>
TMR	<i>Tunnel Magnetoresistance</i>
FS	<i>Full Scale</i>
EMI	<i>Electro Magnetic Interference</i>
LGA	<i>Land Grid Array</i>
DFN	<i>Dual Flat No-Lead</i>
ODR	<i>Output Data Range</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CCD	<i>Charged Coupled Device</i>
PS/2	<i>Personal System 2</i>
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
RS-232	<i>Recommended Standard 232</i>
DTE	<i>Data Terminal Equipment</i>
DCE	<i>Data Communication Equipment</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UCP	Unidad Central de procesamiento
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
I2C	<i>Inter- Integrated Circuit</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
IDII	<i>Interaction Design Institute Ivrea</i>
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
GSI	<i>Geophysical Service Inc</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
ICDI	<i>In-Circuit Debug Interface</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>



1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002/1021/1022

The Honeywell HMC100x and HMC102x magnetic sensors are one and two-axis surface mount sensors designed for low field magnetic sensing. By adding supporting signal processing, cost effective magnetometers or compassing solutions are enabled. These small, low cost solutions are easy to assemble for high volume OEM designs. Applications for the HMC100x and HMC102x sensors include Compassing, Navigation Systems, Magnetometry, and Current Sensing.



The HMC100x and HMC102x sensors utilize Honeywell's Anisotropic Magnetoresistive (AMR) technology that provides advantages over coil based magnetic sensors. They are extremely sensitive, low field, solid-state magnetic sensors designed to measure direction and magnitude of Earth's magnetic fields, from tens of micro-gauss to 6 gauss. Honeywell's Magnetic Sensors are among the most sensitive and reliable low-field sensors in the industry.

Honeywell continues to maintain product excellence and performance by introducing innovative solid-state magnetic sensor solutions. These are highly reliable, top performance products that are delivered when promised. Honeywell's magnetic sensor solutions provide real solutions you can count on.

FEATURES

BENEFITS

- | | |
|--|--|
| ▶ Surface Mount 1 and 2-Axis Sensors | ▶ Easy to Assemble & Compatible with High Speed SMT Assembly |
| ▶ Low Cost | ▶ Designed for High Volume, Cost Effective OEM Designs |
| ▶ 4-Element Wheatstone Bridges | ▶ Low Noise Passive Element Design |
| ▶ Low Voltage Operations (2.0V) | ▶ Compatible for Battery Powered Applications |
| ▶ Available in Tape & Reel Packaging | ▶ High Volume OEM Assembly |
| ▶ Patented Offset and Set/Reset Straps | ▶ Stray Magnetic Field Compensation |
| ▶ Wide Field Range (up to +/-6 Oe) | ▶ Sensor Can Be Used in Strong Magnetic Field Environments |

HMC1001/1002/1021/1022**HMC1001/1002 SPECIFICATIONS**

Characteristics	Conditions*	Min	Typ	Max	Units
Bridge Elements					
Supply	Vbridge (Vb) referenced to GND	-	5.0	12	Volts
Resistance	Bridge current = 10mA per bridge	600	850	1200	ohms
Operating Temperature	Ambient	-55		150	°C
Storage Temperature	Ambient, unbiased	-55		175	°C
Field Range	Full scale (FS) – total applied field	-2		+2	gauss
Linearity Error	Best fit straight line ± 1 gauss ± 2 gauss		0.1 1.0	0.5 2.0	%FS
Hysteresis Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.05	0.10	%FS
Repeatability Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.05	0.10	%FS
S/R Repeatability	Output variation after alternate S/R pulses Vb = 5V, I _{BR} = 3A			100	µV
Bridge Offset	Offset = (OUT+) – (OUT-) Field = 0 gauss after Set pulse, Vb = 8V	-60	-15	+30	mV
Sensitivity	Set/Reset Current = 3A	2.5	3.2	4.0	mV/V/gauss
Noise Density	@ 1Hz, Vb=5V		29		nV/sqrt Hz
Resolution	10Hz Bandwidth, Vb=5V		27		µgauss
Bandwidth	Magnetic signal (lower limit = DC)		5		MHz
Disturbing Field	Sensitivity starts to degrade. Use S/R pulse to restore sensitivity.	5			gauss
Sensitivity Tempco	T _A = -40 to 125°C, Vb=8V T _A = -40 to 125°C, I _{bridge} =5mA	-0.32	-0.30 -0.06	-0.28	%/°C
Bridge Offset Tempco	T _A = -40 to 125°C, No Set/Reset T _A = -40 to 125°C, With Set/Reset		±0.03 ±0.001		%/°C
Bridge Ohmic Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.25		%/°C
Cross-Axis Effect	Cross field = 1 gauss, Happlied = ±1 gauss With set/reset		±3 ±0.5		%FS
Max. Exposed Field	No perming effect on zero reading			10000	gauss

Set/Reset Straps

Resistance	Measured from S/R+ to S/R-		1.5	1.8	ohms
Current	0.1% duty cycle, or less, 2µsec current pulse	2.0	3.0	5	Amp
Resistance Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.37		%/°C

Offset Straps

Resistance	Measured from OFF+ to OFF-		2.5	3.5	ohms
Offset Constant	DC Current Field applied in sensitive direction	46	51	56	mA/gauss
Resistance Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.39		%/°C

* Tested at 25°C except stated otherwise.

HMC1001/1002/1021/1022**HMC1021/1022 SPECIFICATIONS**

Characteristics	Conditions*	Min	Typ	Max	Units
Bridge Elements					
Supply	Vbridge (Vb) referenced to GND	2	5.0	25	Volts
Resistance	Bridge current = 10mA per bridge	800	1100	1300	ohms
Operating Temperature	Ambient	-55		150	°C
Storage Temperature	Ambient, unbiased	-55		175	°C
Field Range	Full scale (FS) – total applied field	-8		+8	gauss
Linearity Error	Best fit straight line ± 1 gauss ± 3 gauss ± 6 gauss		0.05 0.4 1.6		%FS
Hysteresis Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.08		%FS
Repeatability Error	3 sweeps across ±2 gauss		0.08		%FS
Bridge Offset	Offset = (OUT+) – (OUT-) Field = 0 gauss after Set pulse, Vb = 5V	-10	±2.5	+11.25	mV
Sensitivity	Set/Reset Current = 0.5A	0.8	1.0	1.25	mV/V/gauss
Noise Density	@ 1Hz, Vb=5V		48		nV/sqrt Hz
Resolution	10Hz Bandwidth, Vb=5V		85		µgauss
Bandwidth	Magnetic signal (lower limit = DC)		5		MHz
Disturbing Field	Sensitivity starts to degrade. Use S/R pulse to restore sensitivity.	20			gauss
Sensitivity Tempco	T _A = -40 to 125°C, Vb=5V T _A = -40 to 125°C, I _{bridge} =5mA	-0.32	-0.30 -0.06	-0.28	%/°C
Bridge Offset Tempco	T _A = -40 to 125°C, No Set/Reset T _A = -40 to 125°C, With Set/Reset		±0.05 ±0.001		%/°C
Bridge Ohmic Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.25		%/°C
Cross-Axis Effect	Cross field = 1 gauss, Happlied = ±1 gauss		+0.3		%FS
Max. Exposed Field	No perming effect on zero reading			10000	gauss

Set/Reset Straps

Resistance	Measured from S/R+ to S/R-	5.5	7.7	9	ohms
Current	0.1% duty cycle, or less, 2µsec current pulse	0.5	0.5	4.0	Amp
Resistance Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.37		%/°C

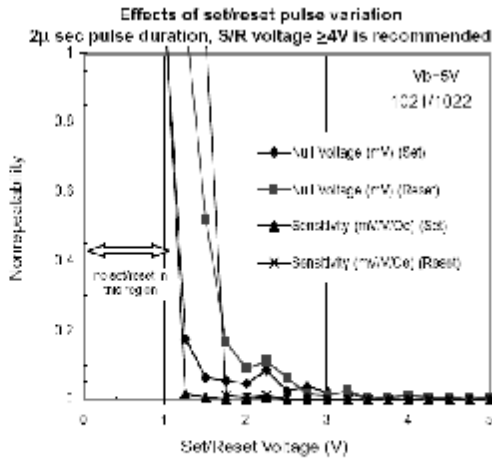
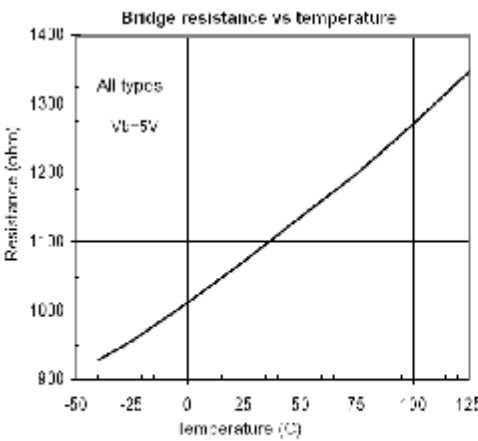
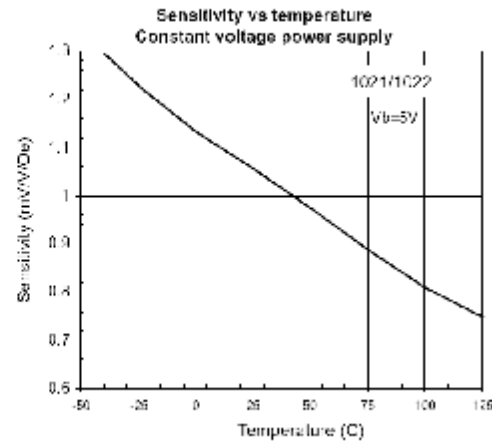
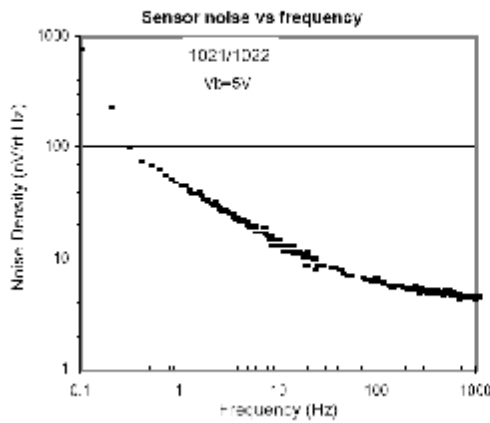
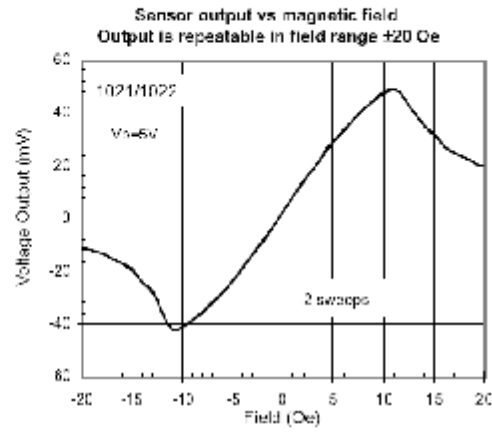
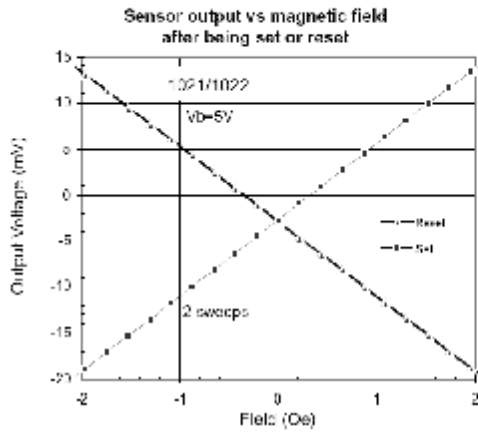
Offset Straps

Resistance	Measured from OFF+ to OFF-	38	50	60	ohms
Offset Constant	DC Current Field applied in sensitive direction	4.0	4.6	6.0	mA/gauss
Resistance Tempco	T _A = -40 to 125°C		0.39		%/°C

* Tested at 25°C except stated otherwise.

HMC1001/1002/1021/1022

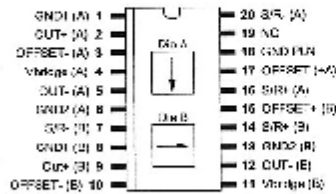
KEY PERFORMANCE DATA



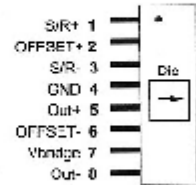
HMC1001/1002/1021/1022

PACKAGE / PINOUT SPECIFICATIONS

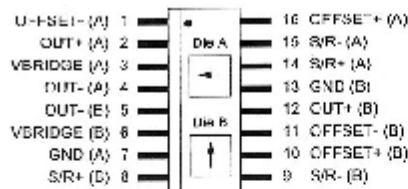
HMC1002—Two-Axis MR Microcircuit



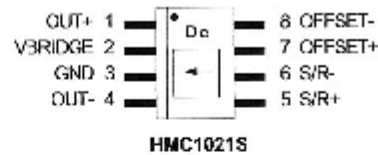
HMC1001—One Axis MR Microcircuit



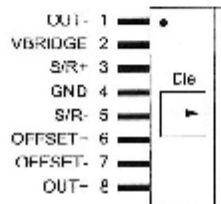
HMC1022—Two-Axis MR Circuit



HMC1021S—One-Axis MR Circuit



HMC1021Z—One-Axis MR Circuit



Arrow indicates direction of applied field that generates a positive output voltage after a SET pulse.

BASIC DEVICE OPERATION

The Honeywell HMC100x and HMC102x Anisotropic Magneto-Resistive (AMR) sensors are simple resistive Wheatstone bridges to measure magnetic fields and only require a supply voltage for the measurement. With power supply applied to the bridges, the sensors convert any incident magnetic field in the sensitive axis directions to a differential voltage outputs. In addition to the bridge circuits, each sensor has two on-chip magnetically coupled straps; the offset strap and the set/reset strap. These straps are Honeywell patented features for incident field adjustment and magnetic domain alignment; and eliminate the need for external coils positioned around the sensors.

The magnetoresistive sensors are made of a nickel-iron (Permalloy) thin-film deposited on a silicon wafer and patterned as a resistive strip element. In the presence of a magnetic field, a change in the bridge resistive elements causes a corresponding change in voltage across the bridge outputs.

HMC1001/1002/1021/1022

These resistive elements are aligned together to have a common sensitive axis (indicated by arrows on the pinouts) that will provide positive voltage change with magnetic fields increasing in the sensitive direction. Because the output only is in proportion to the one-dimensional axis (the principle of anisotropy) and its magnitude, additional sensor bridges placed at orthogonal directions permit accurate measurement of arbitrary field direction. The combination of sensor bridges in two and three orthogonal axis permit applications such as compassing and magnetometry. See Figure 1 for a representation of the magneto-resistive elements.

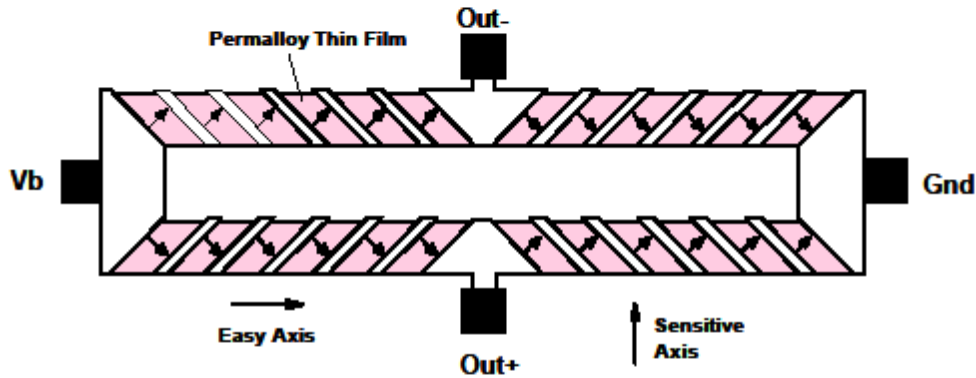


Figure 1 – Magneto-Resistive Wheatstone Bridge Elements

The offset strap allows for several modes of operation when a direct current is driven through it. These modes are: 1) Subtraction (bucking) of an unwanted external magnetic field, 2) null-ing of the bridge offset voltage, 3) Closed loop field cancellation, and 4) Auto-calibration of bridge gain.

The set/reset strap can be pulsed with high currents for the following benefits: 1) Enable the sensor to perform high sensitivity measurements, 2) Flip the polarity of the bridge output voltage, and 3) Periodically used to improve linearity, lower cross-axis effects, and temperature effects.

Offset Straps

The offset strap is a spiral of metallization that couples to the sensor element's sensitive axis. The offset strap has some modest resistance and requires a moderate current flow for each gauss of induced field. The straps will easily handle currents to buck or boost fields through the linear measurement range, but designers should note the extreme thermal heating on the die when doing so.

With most applications, the offset strap is not utilized and can be ignored. Designers can leave one or both strap connections (Off- and Off+) open circuited.

Set/Reset Straps

The set/reset strap is another spiral of metallization that couples to the sensor element's easy axis (perpendicular to the sensitive axis on the sensor die). Each set/reset strap has a low resistance with a short but high required peak current for reset or set pulses. With rare exception, the set/reset strap must be used to periodically condition the magnetic domains of the magneto-resistive elements for best and reliable performance. A set pulse is defined as a positive pulse current entering the S/R+ strap connection. The successful result would be the sensor aligned in a forward easy-axis direction so that the sensor bridge's polarity is a positive slope with positive fields on the sensitive axis result in positive voltages across the bridge output connections.

A reset pulse is defined as a negative pulse current entering the S/R+ strap connection. The successful result would be the sensor aligned in a reverse easy-axis direction so that sensor bridge's polarity is a negative slope with positive fields on the sensitive axis result in negative voltages across the bridge output connections.

Typically a reset pulse is sent first, followed by a set pulse a few milliseconds later. By shoving the magnetic domains in completely opposite directions, any prior magnetic disturbances are likely to be completely erased by the duet of pulses.

HMC1001/1002/1021/1022

For simpler circuits with less critical requirements for noise and accuracy, a single polarity pulse circuit may be employed periodically (all sets or all resets). With these uni-polar pulses, several uni-polar pulses become close in performance to a single bipolar set/reset pulse circuit.

NOISE CHARACTERISTICS

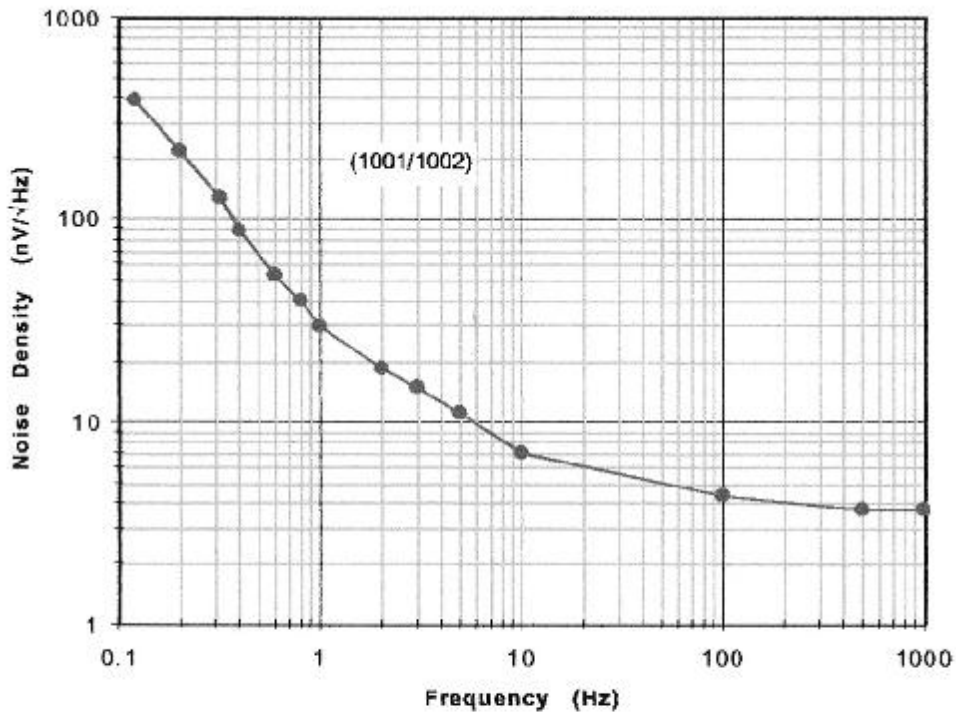
The noise density curve for a typical AMR sensor is shown in the figure below. The 1/f slope has a nominal corner frequency near 10Hz and flattens out to a 3.8 nV/sqrtHz slope. This is approximately equivalent to the Johnson noise (or white noise) for an 850 ohm resistor, the typical bridge resistance. To relate the noise density voltage to the magnetic fields, use the following expressions:

For $V_{bridge} = 5V$ and $Sensitivity = 3.2mV/V/gauss$, the bridge output (V_{output}) is $16mV/gauss$

The noise density at 1Hz is about $30nV/sqrtHz$ or 1.8 micro-gauss/sqrtHz

$1/f$ noise (0.1 to 10Hz) = $30 * \sqrt{(\ln10/0.1)}$ nV = $64nV$ (rms) = 4 micro-gauss (rms) = 27 micro-gauss (pk-pk)

White noise (BW = 1kHz) = $3.8 * \sqrt{BW}$ nV = $120nV$ (rms) = 50 micro-gauss (pk-pk)



HMC1001/1002/1021/1022

SET/RESET STRAP OPERATION

The reasons to perform a set or reset on an AMR sensor are: 1) To recover from a strong external magnetic field that likely has re-magnetized the sensor, 2) to optimize the magnetic domains for most sensitive performance, and 3) to flip the domains for extraction of bridge offset under changing temperature conditions.

Strong external magnetic fields that exceed a 10 to 20 gauss "disturbing field" limit, can come from a variety of sources. The most common types of strong field sources come from permanent magnets such as speaker magnets, nearby high-current conductors such as welding cables and power feeder cables, and by magnetic coils in electronic equipment such as CRT monitors and power transformers. Magnets exhibit pole face strengths in hundreds to thousands of gauss. These high intensity magnetic field sources do not permanently damage the sensor elements, but the elements will be disturbed to the exposed fields rather than the required easy axis directions. The result of this re-magnetization of the sensor elements, the sensor will lack sensitivity or indicate a "stuck" sensor output. Using the set and reset pulses will magnetically "restore" the sensor.

AMR sensors are also ferromagnetic devices with a crystalline structure. This same thin film structure that makes the sensor sensitive to external magnetic fields also has the downside that changing magnetic field directions and thermal energy over time will increase the self-noise of the sensor elements. This noise, while very small, does impair the accurate measurement of sub-milligauss field strengths or changes in field strength in microgauss increments. By employing frequent set and reset fields on the sensor, the self-noise will be to its lowest possible level.

As the sensor element temperature changes, either due to selfheating or external environments, each element's resistance will change in proportion to the temperature. One way to eliminate the bridge offset voltage is to make stable magnetic field measurements of the bridge output voltage in between each set and reset field application. Since the external field components of the bridge output voltage will flip polarity, the set and reset bridge output voltages can be subtracted and the result divided by two to calculate the bridge offset. See application note AN212 for the details on bridge offset voltage computation and correction.

SET/RESET DRIVE CIRCUITS

The above description explained that providing pulses of electrical current creates the needed magnetic fields to realign the magnetic domains of the sensor resistive elements. Also the rationale for performing these set and reset pulses has been justified. The following paragraphs shall show when and how to apply these pulsed currents, and circuits to implement them. Figure 2 shows a simplistic schematic of a set/reset circuit.

These set and reset pulses are shown in Figure 2 as dampened exponential pulse waveforms because the most popular method of generating these relatively high current, short duration pulses is via a capacitive "charge and dump" type of circuit. Most electronics, especially in consumer battery powered devices, do not have the capability to supply these high current pulses from their existing power supply sources. Thus "Vsr" is actually a charged up capacitor that is suddenly switched across the set/reset strap. The value of this capacitor is usually a couple hundred nano-Farads (nF) to a few micro-Farads (µF) depending on the strap resistance to be driven. The decay of the exponential waveform will mostly be governed by a time constant (τ or Tau) that is the capacitance in farads multiplied by the resistance, and is measured in seconds.

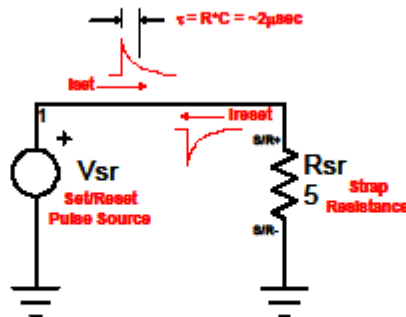


Figure 2 – A Simple Set/Reset Circuit

HMC1001/1002/1021/1022

The next circuit implementation is the classic set/reset design in which a push-pull output stage (totem pole stage) drives one end of the HMC1001 set/reset strap, with the other end grounded. Figure 3 shows this circuit.

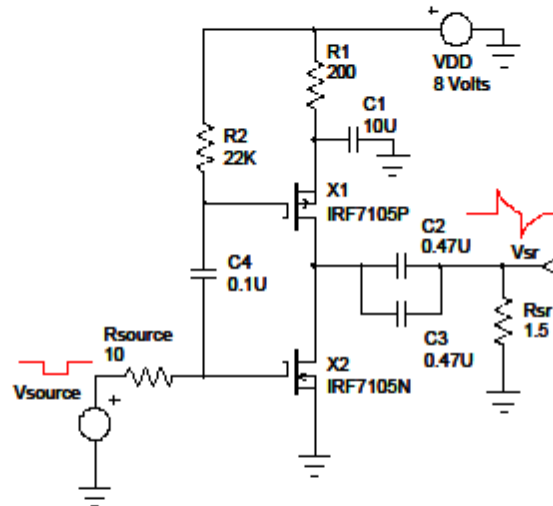


Figure 3 – Totem Pole Set/Reset Circuit for HMC1001

The totem pole moniker comes from the stacked semiconductors between the positive supply voltage (VDD) and the negative connection (Ground). In the above example circuit, the semiconductors depicted are two complementary power MOSFETs, with the P-channel device on top and the N-channel device on the bottom. The International Rectifier IRF7105 part is chosen in this circuit as it contains both P-channel and N-channel MOSFET die in a very small package, and has the electrical characteristics needed for this circuit. Other manufacturers can be used as well with the requirements that they can be fully turned on/off with a 5-volt logic stimulus, handle the peak set/reset strap load currents, and present an "on" resistance at those peak currents that is fairly small in comparison to the connected strap load resistance.

HIGHER VOLTAGE TOTEM POLE CIRCUITS

While the previous example uses the convenience of standard 5-volt logic drive and modest supplies, many sensor designs require higher applied voltages to the set/reset straps to achieve greater currents or because the straps are series connected to assure even current distribution across all the straps pulsed. By creating series chains of straps, variances in strap resistance are less likely to fall out of the minimum or maximum range for peak pulse currents. If the straps are parallel connected, wide set/reset strap ohmic tolerances may be prone to "current hogging" and the straps will provide dissimilar magnetic fields at each sensor, potentially creating non-uniform accuracies at each sensor axis.

The circuit in Figure 3 relies on MOSFETs that could predictably be turned off and on completely using logic level inputs. At higher voltages, the P-channel device needs its gate drive voltage to approach the source voltage, which is higher than usual logic levels. To perform this level shifting from logic levels to higher pulse source voltage supply levels, a BJT level shifter sub-circuit is employed to perform this task. Figure 4 shows this higher voltage operating circuit.

From Figure 4, Rsr1, Rsr2, and Rsr3 are three strap resistances that are modeled from the HMC1001 or HMC1002 products. Three of these strap resistances are chosen since many users desire 3-axis magnetic field sensing that comes from a pairing of a HMC1001 and a HMC1002. Also this combination of three series straps is also used on the HMC2003 hybrid sensor module and in the HMR2300 Smart Digital Magnetometer.

HMC1001/1002/1021/1022

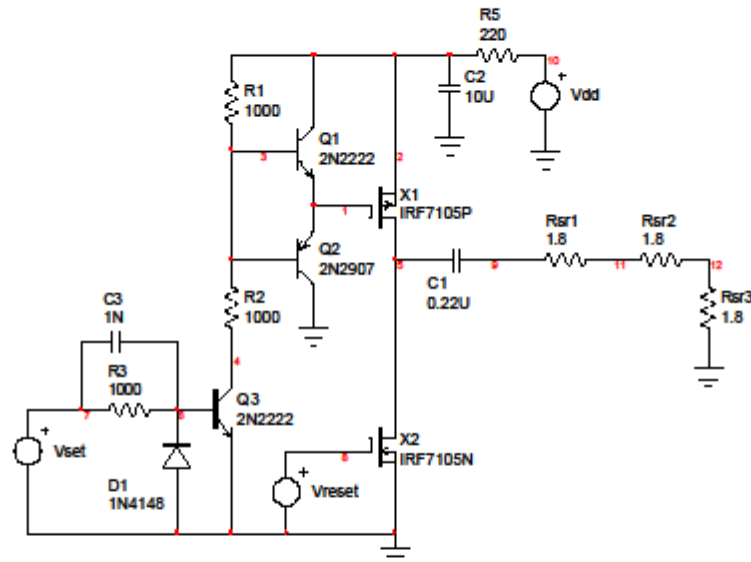


Figure 4 – Higher Voltage Set/Reset Circuit for HMC1001 & HMC1002

The three strap resistances are chosen at 1.8 ohms, or the worst-case high resistance points. Since they require a minimum of 3 amperes peak, the series combination requires at least 16.2 volts, so a circuit Vdd of about 18 volts would be about the right level to drive the strap load and allocate for losses in the C1 capacitor ESR and the MOSFET switches X1 and X2. C1's value is also chosen at 0.22 micro-farad so the circuit time constant is at least around 1 micro-second.

Supply reservoir capacitor C2 is chosen to many times the value of C1 and is also picked for small size, working voltage, and low ESR relative to the strap load resistance. C2 typically will be in the 1 to 10 micro-farad range and best to error on the high capacitance side since C2 now supplies additional X1 gate drive circuitry. Resistor R5 is then chosen after C2 to set the recharge time constant and to limit peak supply current. These capacitors should be chosen to have a low ESR characteristic of around 0.2 ohms per capacitor.

Working backwards from the strap load resistance, MOSFETs X1 and X2 are chosen as IRF7105 due to the total packaged size (both X1 and X2 in one SOIC-8), and meeting the requirements for operating voltages, peak currents, and low on resistances. X2 is directly driven from digital logic denoted as "Vset", and "Vreset" drives the level shifting sub-circuit to X1. Note that Vreset turns off X2 first prior to X1 being driven on by Vset, and also X1 is turned off before X2 is turned on. While one logic line could control the operation of Vset and Vreset, the additional inverter stages and pulse delay components may be too space and cost consuming compared to two logic ports in a microcontroller. See Figure 4 in Application Note 201 for the discrete Vset and Vreset pulse forming circuit.

Transistors Q1 and Q2 in Figure 4 are chosen to be generic BJTs to force MOSFET X1's gate charge quickly into on and off states. Resistors R1 and R2 are selected as nominal 1000 ohm values that can pump or dump X1's gate charge by supplying Q1 and Q2 with enough base drive currents to flip their on and off states. Transistor Q3 is also chosen as a generic, but reasonably fast switch transistor to perform the level shift function with resistors R1 and R2. Components R3, C3 and D1 are chosen to properly drive Q3 from a logic level source, with C3 and D1 denoted as a "speed-up" network to quickly switch Q3 within a few nanoseconds of logic transitions.

HMC1001/1002/1021/1022

APPLICATION CIRCUITS

The following are typical application circuits using the HMC100x and HMC102x sensors.

TWO AXIS COMPASS OR MAGNETOMETER

Figure 5 shows the typical schematic diagram.

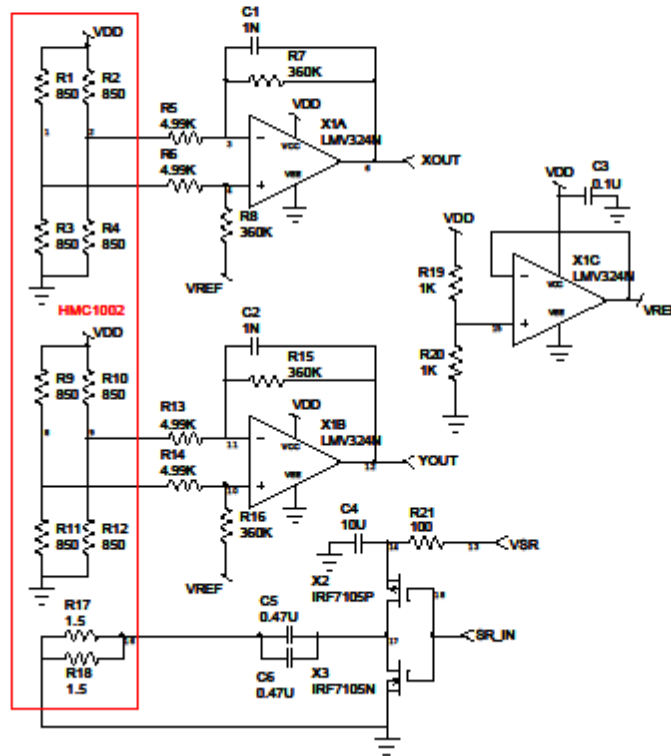


Figure 5 – 2-Axis Compass or Magnetometer

From Figure 5, the typical power supplied for VDD is nominally 5 volts, with about 8 volts for the set/reset strap supply (VSR). A pair of complementary power MOSFETs provides the electronic switch functions, driving the set/reset minus pins with the set/reset plus pins returned to the MOSFET ground. The MOSFETs are driven by typical 5 volt logic with normally high levels expected when not pulsing. Each logic transition creates a very high current pulse, as high-to-low transitions turn-on the P-channel FET while turning-off the Nchannel FET. This transfers some of the energy from the 10uf reservoir capacitor to the pair of 0.47uf capacitors while providing a positive pulse. A negative pulse is performed on the low-to-high logic transition as the P-channel FET is turned off and the Nchannel FET is turned on. Then the energy from the pair of 0.47uf capacitors is discharged through the set/reset straps and the Nchannel MOSFET. Ceramic capacitors with a low-ESR characteristic are required for best pulse performance.

Since the sensor output difference voltage is amplified by low cost operational amplifiers with a low supply voltage feature (LMV324N), the amplifier requires a half supply voltage reference (VREF). This reference voltage is formed via a buffered rail-splitter circuit, using a spare op-amp and resistors. The 1 nano-farad capacitors are used to bandwidth limit the sensor, and to suppress interference. The resistors around the op-amp are chosen for earth's magnetic field strength (about 0.6 gauss) levels and to match with the sensor impedance. The 4.99k-ohm resistors are a bridging impedance that is normally chosen to be 4 to 10 times larger than the sensor bridge resistance elements (HMC1002) at 850 ohms. The

HMC1001/1002/1021/1022

360k-ohm feedback and reference resistors are chosen to provide a nominal 230mV/V/gauss gain characteristic or 1.15V/gauss gain with VDD at 5 volts. Other values than 360k-ohms may be chosen; with smaller resistances for larger fields and larger resistances for lower field strengths. Be aware that sensor bridge offsets factor into the signal gain selection as the offsets may be as large as the signal to be measured. See application note AN212 on methods to handle bridge offset voltages.

As a magnetometer, the circuit outputs (Xout and Yout) should be measured against VREF and scaled for 1.15 volts per gauss using a 5 volt sensor/amplifier power supply (VDD). Since the sensor's bandwidth is 5 MHz, the sampling rate of the outputs can be very fast, to the point where the filtering and speed of the amplifiers begins to effect the measurements. Resolution will be mostly to the size of the Analog-to-Digital Converter (ADC), where a 10-bit ADC would spread its 1024 counts across the power supply or tighter.

As a compass, the two outputs constrain the earth's magnetic field measurement to horizontal orientations with the Xout and Yout feeding the heading equation of $\arctan(Yout/Xout)$ in degrees. The Xout direction of the HMC1002 should be mounted to the forward direction of the product for proper orientation. If a tilt-compensated compass is desired, a third axis could be made from the spare LMV324N amplifier and a HMC1001 sensor. Refer to the technical papers on compassing from the website for more detail on compass implementation.

Field Detector or Current Sensor

A simple sensor implementation is shown in Figure 6 for a single axis sensor and signal conditioning circuitry for detecting a magnetic disturbance, or as a current sensor when placed near a current carrying conductor. For more details on current sensing, see application note AN209 on the website.

From Figure 6, the HMC1021 sensors are different from the HMC100x parts in that the bridge resistances increase to 1100 ohms and the set/reset strap resistance increases to 4.5 ohms. Because the minimum set/reset peak current is down to 0.5 amperes, the set/reset drive circuit can now be run at common supply rails of 5 or 3 volts (VDD). Due to the increased resistance of the set/reset strap, capacitor C3 can be reduced to about 0.22uF to maintain the desired 1 to 2 microsecond time constant. Capacitor C2 is typically chosen to be about ten times the series capacitor value, or 2.2uF. The same pulse transition scheme in Figure 5 applies to Figure 6.

The sensor/amplifier circuit is likewise similar but the 1mV/V/gauss sensitivity requires a gain boost by increasing feedback/reference resistors for sensing low fields like earth's magnetic field. If a 2 or 3-axis compass is to be designed with the HMC102x series sensor, parts like the HMC1022 plus the HMC1021Z can be used, with replication of the difference amplifier stages for each axis. By choosing the 1 Meg-ohm and 4.99k-ohm resistors, the gain with a 5 volt supply produces about a 1V/gauss transfer characteristic and centered at half supply (2.5 volts).

An instrumentation amplifier could be substituted for the operational amplifier to minimize external discrete components, but the very low cost of op-amps like the LMV741/LMV358/LMV324 family is hard to beat if price is more important than printed circuit board footprint. The signal output of the amplifier can be directly placed on the input of an ADC and further processed in digital form. If the ADC range spans the power supply range, then a 10-bit ADC can have count 512 of 1024 used as the zero gauss point when the output rests at half-supply. If 3 volt operation is required, the designer can substitute the IRF7507 part for the IRF7105 for 2.7 volt logic drive of the complementary MOSFET gates.

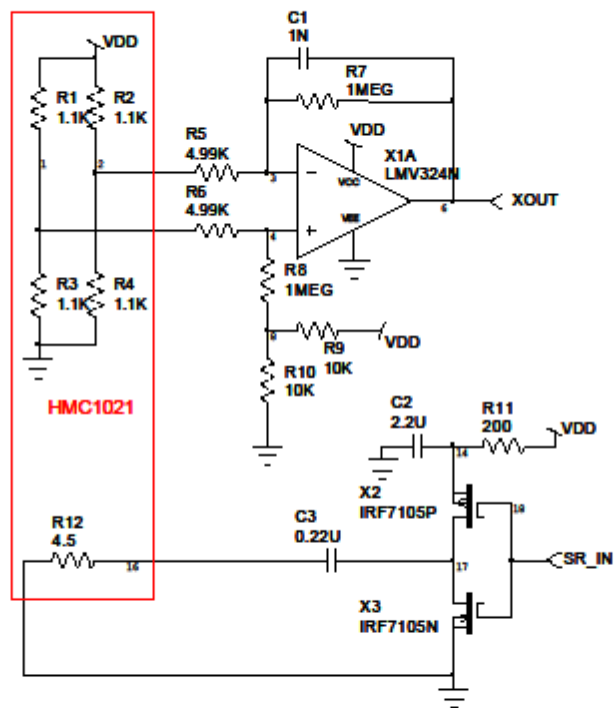
HMC1001/1002/1021/1022

Figure 6 – Field Detector or Current Sensor

MOUNTING CONSIDERATIONS**Stencil Design and Solder Paste**

A 4 mil stencil and 100% paste coverage is recommended for the electrical contact pads.

Pick and Place

Placement is machine dependant and no restrictions are recommended.

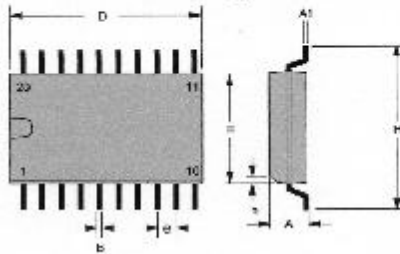
Reflow and Rework

No special profile is required for the HMC10xx parts. The product is compatible with lead and no-lead eutectic solder paste reflow profiles. Honeywell recommends the adherence to solder paste manufacturer's guidelines. The sensors may be reworked with soldering irons, but extreme care must be taken not to overheat the part's circuit board pads. Irons with a tip temperature no greater than 315°C should be used. Excessive rework risks the copper pads pulling away into the molten solder.

HMC1001/1002/1021/1022

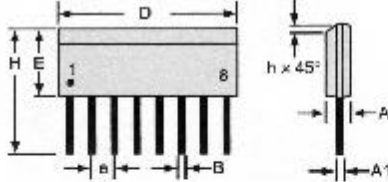
PACKAGE OUTLINES

HMC1002—Package Outline



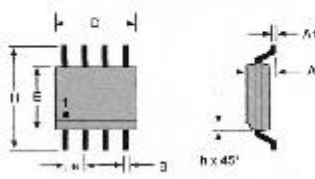
Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	2.468	2.642	.098	.104
A1	0.127	0.275	.005	.011
B	0.457	0.483	.014	.019
D	12.675	12.929	.498	.508
E	7.264	7.417	.286	.292
h	1.270 ref		.050 ref	
H	1.270	16.265	.050	.648
h	0.561	ref	.022	.030

**HMC1001—8-Pin SIP and
HMC1021Z—8-Pin SIP**



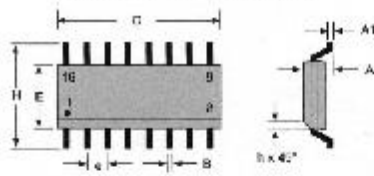
Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	1.371	1.728	.054	.068
A1	0.101	0.249	.004	.010
B	0.355	0.483	.014	.019
D	9.829	11.253	.387	.443
E	3.810	3.988	.150	.157
e	1.270 ref		.050 ref	
H	6.850	7.300	.270	0.287
h	0.381	0.762	.015	.030

HMC1021S—8-Pin SOIC



Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	1.371	1.728	.054	.068
A1	0.101	0.249	.004	.010
B	0.355	0.483	.014	.019
D	4.900	4.979	.188	.196
F	3.810	3.988	.150	.157
e	1.270 ref		.050 ref	
H	5.816	6.148	.229	.241
h	0.381	0.762	.015	.030

HMC1022—16-Pin SOIC

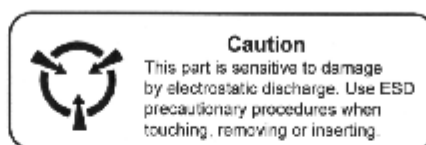


Symbol	Millimeters		Inches	
	Min	Max	Min	Max
A	1.371	1.728	.054	.068
A1	0.101	0.249	.004	.010
B	0.355	0.483	.014	.019
D	9.829	11.253	.387	.443
E	3.810	3.988	.150	.157
e	1.270 ref		.050 ref	
H	5.816	6.158	.229	.244
h	0.381	0.762	.015	.030

HMC1001/1002/1021/1022**ORDERING INFORMATION**

Ordering Number	Product	Packaging
HMC1001	One Axis Magnetic Sensor, 8-pin SIP	ESD Tubes
HMC1002 HMC1002-TR	Two Axis Magnetic Sensor, 20-pin SOIC	ESD Tubes 1,000 Tape & Reel
HMC1021S HMC1021S-TR	One Axis Magnetic Sensor, 8-pin SOIC	ESD Tubes 1,000 Tape & Reel
HMC1021Z	One Axis Magnetic Sensor, 8-pin SIP	ESD Tubes
HMC1022 HMC1022-TR	Two Axis Magnetic Sensor, 16-pin SOIC	Cut Tape 2,500 Tape & Reel

* When ordering the –RC in the product part number represents RoHS compliant. This labeling is temporary during the transition period from leaded to non-leaded parts.



CAUTION: ESDS CAT. 1B

FIND OUT MORE

For more information on Honeywell's Magnetic Sensors visit us online at www.magneticsensors.com or contact us at 800-323-8295 (763-954-2474 internationally).

The application circuits herein constitute typical usage and interface of Honeywell product. Honeywell does not warranty or assume liability of customer-designed circuits derived from this description or depiction.

Honeywell reserves the right to make changes to improve reliability, function or design. Honeywell does not assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit described herein; neither does it convey any license under its patent rights nor the rights of others.

U.S. Patents 4,441,072, 4,533,872, 4,569,742, 4,681,812, 4,847,584, 6,529,114 and 7,095,226 apply to the technology described

Honeywell
12001 Highway 55
Plymouth, MN 55441
Tel: 800-323-8295
www.honeywell.com/magneticsensors

Honeywell

Form #900248 Rev C
August 2008
©2008 Honeywell International Inc.

SPECIFICATION

Customer : _____

Customer's Model No. : _____

Model No. : U114 _____

Date : _____

Sample Serial No. : _____

Spec. Version & Revision Date: V01 2012.06.26

Received/Approved by

U114

V01

TABLE OF CONTENTS

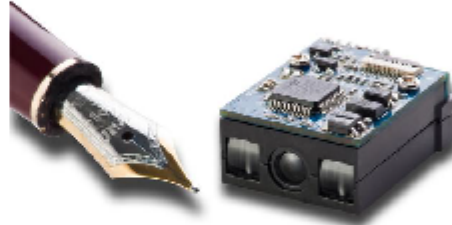
A. General Description	1
B. Physical Characteristics	2
C. Test Board Overview	3
D. Electrical Characteristics	3
E. Performance	4
F. Environmental	4
G. Readable Symbologies	5
H. Decoder Data Output Connector	6
I. Scan Map	7
J. Reliability	7

U114

V01

A. General Description

The Series brings the benefits of bar code scanning to a variety of OEM devices.



The Series Scan Module is a perfect choice for your OEM design. The Series brings the benefits of bar code scanning to all types of OEM devices. Now kiosks, medical instruments, diagnostic equipment, lottery terminals, vending machines and countless other appliances can all be equipped with the leading-edge scanning technology and reliability.

The Series has been designed to provide the highest scanning performance in the smallest package possible. For added versatility, allowing for fast, cost-effective interchangeability when upgrading or modifying your OEM device for specialized applications.

U114 is a compact long-range CCD bar code scanning module with high sensitive liner image sensor. As remote-operation ability 10,000 LUX ambient light resistance, 500 scan-rate per second and aiding in various major bar codes, hand-on software-programming function, this U114 is your best choice of CCD type bar code scanning module to be suitable for application where needs a high performance, small foot-print and the reliable operation.

U114 is a CCD bar code decoding capabilities. U114 decode board is powered by a fast processor and to decode a wide array of 1D bar codes. The decode board is compatible with Utility, a PC-based software for easy Configuration.

The U114 is designed with the industrial standard size, mounting options and output to facilitate integration into existing applications. The Scanner module's miniature size makes ideal for integration into data terminals and other small devices. is supplied as an assembled module with a mounting bracket or as separate components for custom mounting. The scanner module's unique open system architecture allows to accept third party and custom plug-ins, giving the virtually unlimited application flexibility.

Pb-Free (RoHS Compliant).

U114

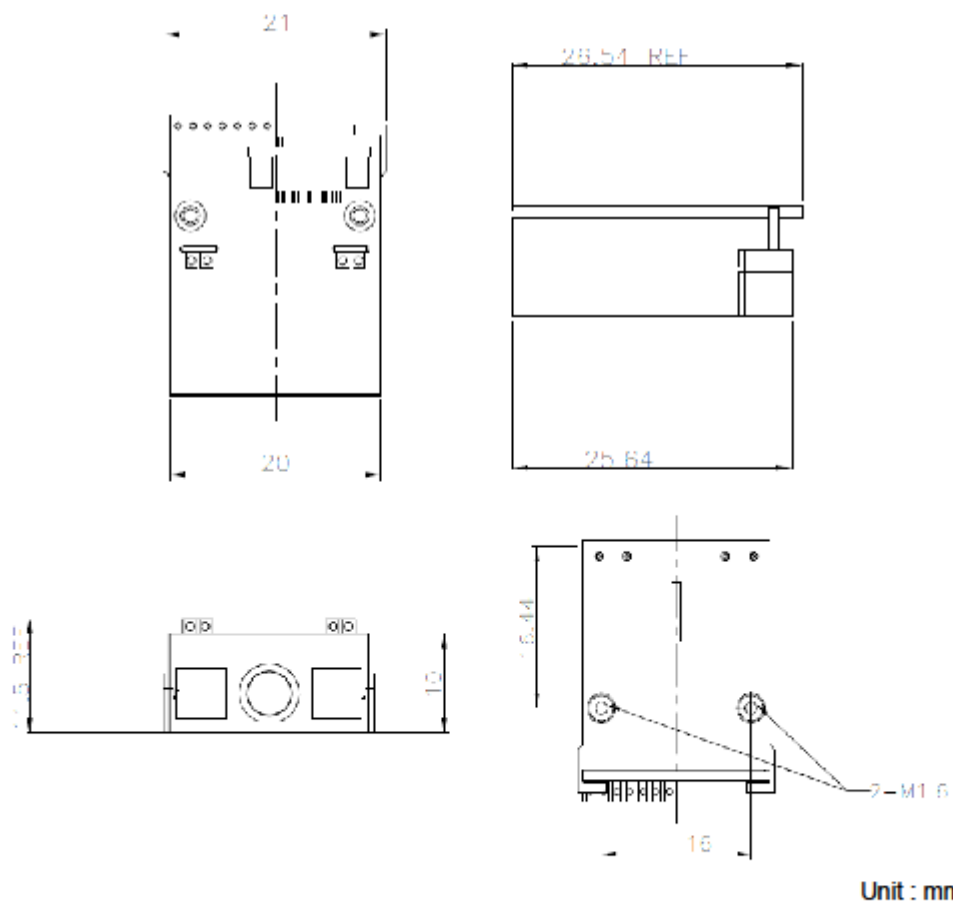
V01

B. Physical Characteristics

Weight	
Body weight	Approx. 0.56 oz (17 g)
Material	
Material	Polycarbonate
Connector	
Connector	FPC 12pin Pitch 0.5
Dimension	
Dimension	11.5mm H x 20mm W x 25mm D (REF)

Mechanical drawing

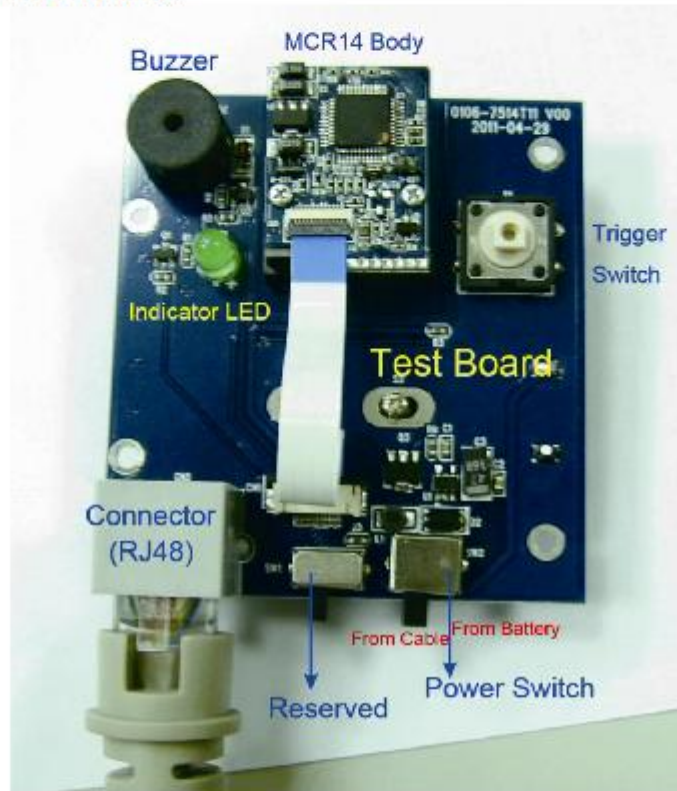
Unit : mm



U114

V01

C. Test Board Overview



D. Electrical Characteristics

Interface	RS232	KB	USB
Supply Voltage		DC +5V \pm 5%	
Output Voltage (Typ.)	\pm 9V	+5V \pm 5%	+5V \pm 5%
Output low Voltage (Max.)		0.7V	
Current Draw		\pm 10%	
Power On (Typ.)	170mA	170mA	170mA
Stand by (Typ.)	50mA	50mA	50mA
Operation (Typ.)	150mA	150mA	150mA

U114

V01

E. Performance

Light Source	Visible Red light 632nm LED
Sensor	Linear CCD Sensor
Processor Type	ARM Cortex™-M3, 32-bit
Operating Freq.	8 MHz (Internal)
Scan Rate	Smart detect up to 500 scans/second
Reading Distance	500mm@20mil/0.5mm, PCS90%
Print Contrast Ratio	PCS45%@4mil/0.1mm
Resolution	4mil/0.1mm@PCS90%
Reading Angle	<i>Test Conditions : Code 39, 10mil/0.25mm,PCS90%</i>
Pitch Angle	5°~60° (±5°)
Skew Tolerance	5°~60° (±5°)
Ambient Light	10,000 Lux Max.

F. Environmental

Operating Temperature	0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F)
Storage Temperature	-20 °C to 70 °C (-4 °F to 158 °F)
Relative Humidity	20% to 95% (Non-condensing)

U114

V01

G. Readable Symbolologies

	Readable	Default Enable
All UPC/EAN/JAN	V	V
EAN128 Code	V	
Code 39	V	V
Code 39 Full ASCII	V	
Code32 / Italian Pharmacy	V	
Code 128	V	V
CODABAR/NW7	V	V
Interleave 25	V	V
Industrial 25	V	
Matrix 25	V	
MSI/PLESSEY	V	
Telepen	V	
Code 93	V	
Code 11	V	
China Postage	V	
Code 26	V	
LCD25	V	
GS1 DataBar	V	
GS1 DataBar Stacked	V	

U114

V01

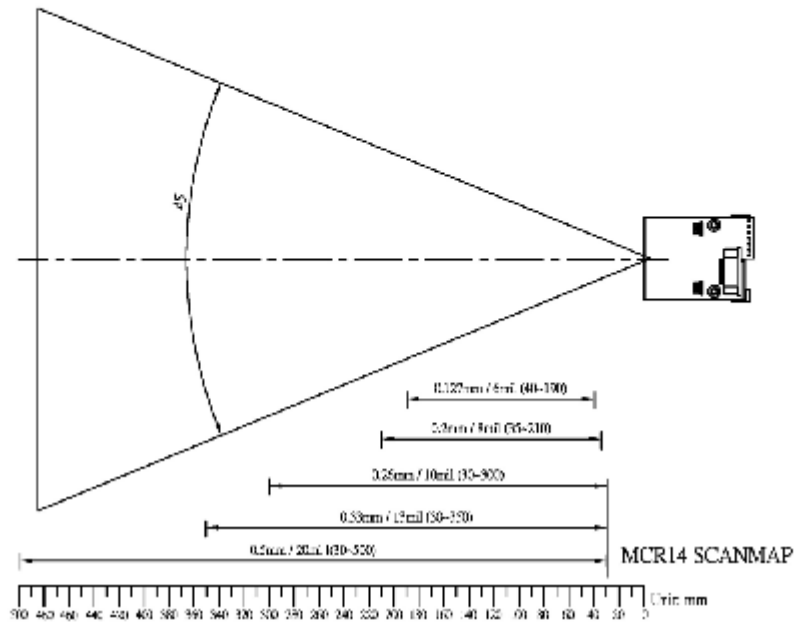
H. Decoder Data Output Connector

Type	FPC 12pin Pitch 0.5
Pin No.	Function
1	TG
2	AIM WAKEUP(Reserved)
3	GREEN LED
4	BZ
5	POWER DOWN(Reserved)
6	RTS
7	CTS
8	TXD
9	RXD
10	GND
11	VCC
12	Reserved

U114

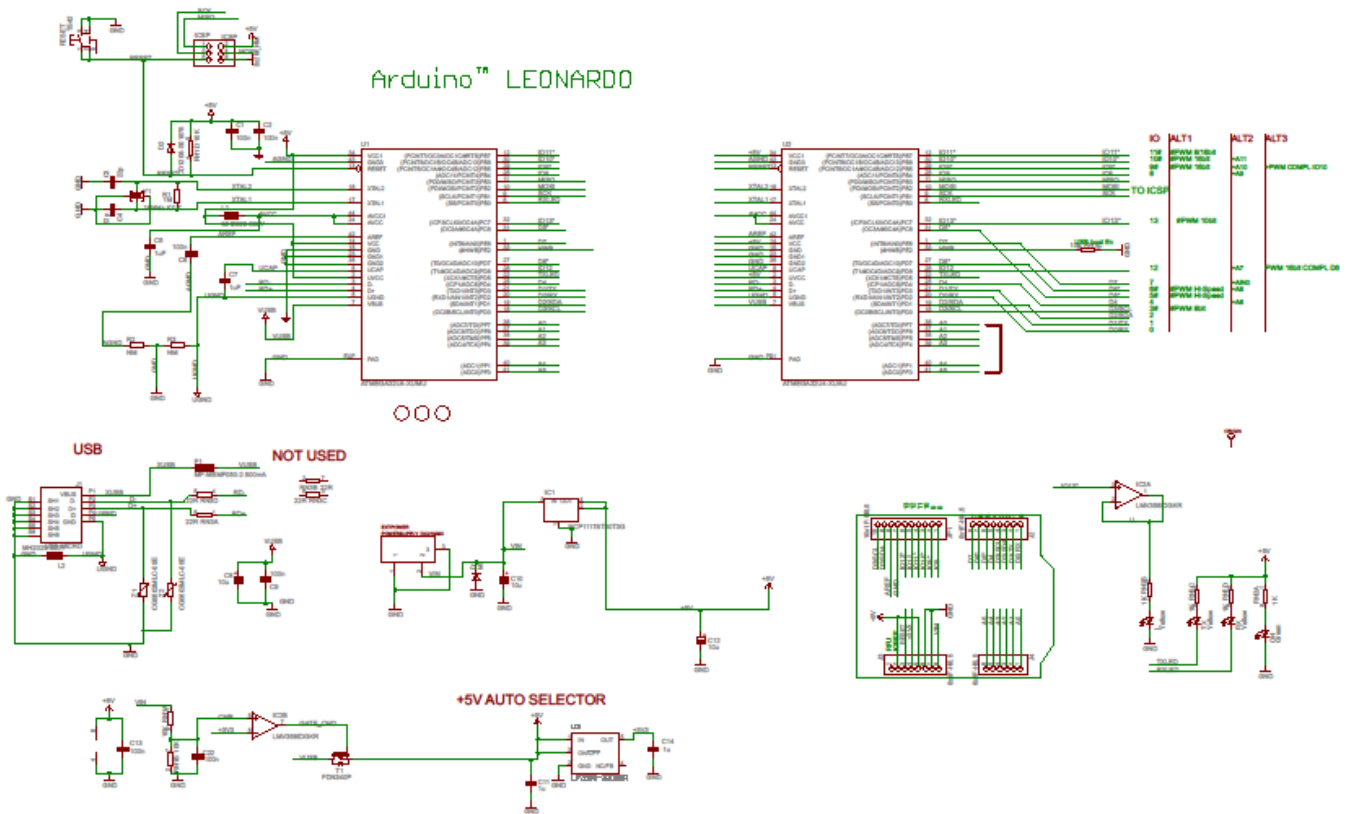
V01

I. Scan Map



J. Reliability

Life Time	
Light Source	40,000 hours
MTBF(Calculated)	80,000 hours
Thermal Shock	
High Temp.	60 °C (140 °F)
Low Temp.	-20 °C (-4 °F)
Cycle time	30 minutes for high temp. , 30 minutes for low temp.
Cycles	24 cycles
Mechanical Shock	2000G, 0.7ms, 3 axes



ANEXO II

```
#include <SPI.h> //Librería para las comunicaciones SPI
#include <SD.h> //Librería para el manejo de la tarjeta SD
#define pulso 3
#define Sensor A0

const int chipSelect = 4;
File fichero;
int i=1;
char nombrefichero[200];
String dataString="";
char codigo;
String datacodigo;
int tiempo_5v= 1000; //ms
int tiempo_lectura= 1000; //ms
unsigned long inicio=0;
unsigned long inicio_lectura=0;

void setup() { //Este código solo se ejecuta una vez

  pinMode(pulso, OUTPUT); //Inicializamos el pulso como salida

  while (!Serial1); //Serial1 es la comunicación TX y RX por medio de pines 0
  y 1
  Serial1.begin(9600); // inicializamos el puerto serie a 9600bps

  while (!Serial); // Serial es el puerto serie USB que comunica la placa con
  el ordenador
  Serial.begin(9600);

  Serial.println("Inicializando tarjeta MicroSD...");
  if (!SD.begin(chipSelect)) { //inicializa la tarjeta SD
    Serial.println("error en la inicializacion!");
    return;
  }
  Serial.println("inicialización terminada.");

  //Da un pulso S/R cada vez que se inicialice con una duración de tiempo_5v
  digitalWrite(pulso, HIGH);
  inicio=millis();
  while(millis()<=inicio+tiempo_5v){
  }
  digitalWrite(pulso, LOW);
  delay(1000); //intentar quitar esto
}

void loop() { //código que se repite cíclicamente

  datacodigo="";
  if(Serial1.available()>0) {
    while (Serial1.available()>0) { // comprobamos si hay algún caracter
  recibido
      codigo = char (Serial1.read()); // leemos un byte
      datacodigo= datacodigo+codigo; // Guardamos el código en la variable
  datacodigo
    }
  }
}
```

```

    delay(10); //intentar cambiar esto
  }

  int existe=LOW;

  while (existe == LOW)
  {
    sprintf(nombrefichero, "%d.txt",i); //genera el archivo 1.txt, 2.txt .....
    xxxxxxxx.txt
    if (SD.exists(nombrefichero))
    {
      i = i+1;
    }
    else
    {
      existe = HIGH;
    }
  }

  fichero = SD.open(nombrefichero, FILE_WRITE); //Crea el archivo de texto en
  la SD

  if(fichero) //fichero abierto con éxito
  {
    fichero.println(datacodigo); //Escribe en fichero el código de barras

    inicio_lectura=millis();
    while(millis()<=inicio_lectura+tiempo_lectura){ //toma medidas durante 30
s
    int ValorSensor = analogRead(Sensor); // guarda en ValorSensor la
medida
    fichero.println(ValorSensor); // Escribe en fihero la medida
    delay(1); // delay in between reads for stability
  }

  fichero.close();

  }
  else{
    Serial.println("Error opening datalog.txt"); //Indica que se ha producido
un error

  }
}
}
}

```