



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Sistema de guiado de microrobots basado en el mapeo 2D de campos magnéticos



Máster Universitario en Sensores para Aplicaciones Industriales (MUSAI).

Trabajo Final de Máster

Autor:

Miguel Antonio Jumbo Sedamanos

Tutores:

Miguel Alcañiz Filloi

Rafael Masot Peris

Septiembre 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Sistema de guiado de microrobots basado en el mapeo 2D de campos magnéticos

Trabajo Final de Máster



Máster Universitario en Sensores para Aplicaciones Industriales (MUSAI).

Autor

Miguel Antonio Jumbo Sedamanos

Tutor/es

Miguel Alcañiz Fillol

Departamento de Ingeniería Electrónica (DIE)

Rafael Masot Peris

Departamento de Ingeniería Electrónica (DIE)

Valencia, España, Septiembre 2020

Resumen

Sistema de guiado de microrobots basado en el mapeo 2D de campos magnéticos.

Se ha desarrollado un sistema de guiado para microrobots o micro-partículas ferromagnéticas utilizando como fuente de movimiento el campo magnético. El trabajo se ha dividido en dos partes: el diseño de un sistema de mapeo en dos dimensiones de campo magnético y el desarrollo de un sistema de guiado magnético de micropartículas. El sistema de mapeo se ha implementado mediante una matriz de 4x4 sensores de campo magnético distribuidos en una superficie de 14mm x 14mm. La información de las componentes X, Y y Z del campo magnético recogida por los sensores es enviada a una aplicación en Matlab que muestra los datos en un mapa 2D (ejes X e Y). En la segunda parte del trabajo, y en base a los resultados de caracterización obtenidos utilizando la herramienta de mapeo 2D, se desarrolló un sistema de guiado magnético compuesto por 4 bobinas (con sus respectivos núcleos) dispuestas en configuración de cruz. La intensidad del campo magnético generado por cada bobina se controla desde un microcontrolador a través de un driver de potencia. El usuario, mediante el joystick conectado al microcontrolador, determina la dirección e intensidad del campo que se genera en la superficie de 14mm x 14mm que hay entre las 4 bobinas. El sistema desarrollado permite el guiado de microrobots para aplicaciones en los campos de la química y la biotecnología.

Palabras claves: Microrobots, sensor magnético, mapeo y guiado 2D, sistemas.

Abstract

Microrobots driving system based on magnetic field 2D mapping.

In this final master project, a 2D guidance system for ferromagnetic microparticles or microrobots has been developed using the magnetic field as the source of movement. The work has been divided into two parts: the design of a two-dimensional mapping system of the magnetic field and the development of a microparticle magnetic guidance system. The mapping system has been implemented using an array of 4x4 magnetic field sensors distributed over a 14mm x 14mm surface. The information of the X, Y and Z components of the magnetic field collected by the sensors is sent to a Matlab application that displays the data on a 2D map (X and Y axes). In the second part of the work, and based on the characterization results obtained using the 2D mapping tool, a magnetic guide system consisting of 4 coils (with their respective cores) arranged in a cross configuration was developed. The intensity of the magnetic field generated by each coil is controlled from a microcontroller through a power driver. The user, using the joystick connected to the microcontroller, determines the direction and intensity of the field that is generated on the 14 mm x 14mm surface between the 4 coils. The developed system allows the guidance of microrobots for applications in the fields of chemistry and biotechnology.

Keywords: Microrobots, magnetic sensor, 2D mapping and guidance, systems.

Resum

Sistema de guiat de microrobots basat en el mapatge 2D de camps magnètics.

S'ha desenrotllat un sistema de guiat per a microrobots o micropartícules ferromagnéticas utilitzant com a font de moviment el camp magnètic. El treball s'ha dividit en dos parts: el disseny d'un sistema de mapeo en dos dimensions de camp magnètic i el desenrotllament d'un sistema de guiat magnètic de micropartícules. El sistema de mapeo s'ha implementat per mitjà d'una matriu de 4x4 sensors de camp magnètic distribuïts en una superfície de 14mm x 14mm. La informació de les components X, I i Z del camp magnètic arreplega pels sensors és enviada a una aplicació Matlab que mostra les dades en un mapa 2D (eixos X e I). En la segona part del treball, i basant-se en els resultats de caracterització obtinguts utilitzant la ferramenta de mapeo 2D, es va desenrotllar un sistema de guiat magnètic compost per 4 bobines (amb els seus respectius nuclis) disposades en configuració de creu. La intensitat del camp magnètic generat per cada bobina es controla des d'un microcontrolador a través d'un driver de potència. L'usuari, per mitjà del joystick connectat al microcontrolador, determina la direcció i intensitat del camp que es genera en la superfície de 14mm x 14mm que hi ha entre les 4 bobines. El sistema desenrotllat permet el guiat de microrobots per a aplicacions en els camps de la química i la biotecnologia.

Paraules claus: Microrobots, sensor magnètic, mapeo i guiat 2D, sistemes.

Preámbulo

Las razones que han llevado a realizar este trabajo final de máster (TFM), son la necesidad de poder realizar un guiado de microrobots o micro-partículas con propiedades magnéticas, con la finalidad de ser utilizados para estudios en la química, biotecnología, entre otras aplicaciones. Este TFM presenta seis partes importantes, la primera parte es una breve introducción acerca del guiado de microrobots, posterior a esto, se realiza un análisis exhaustivo de los sistemas más relevantes para el guiado de microrobots que existen en la actualidad contemplado en un estado del arte muy resumido, después, una revisión de fundamentación teórica que no involucra a ninguna fórmula, seguido del alcance de este TFM plasmado en un objetivo general y en algunos objetivos específicos. Una segunda parte donde se detallan cuales son los requerimientos funcionales y técnicos, para el desarrollo del sistema planteado, tanto para la parte del mapeo como para la parte del guiado. Una tercera parte que contiene los materiales y métodos utilizados en el desarrollo e implementación del sistema final. La cuarta parte se enfoca a los resultados obtenidos del funcionamiento del sistema completo y una pequeña discusión de los mismos, es una de las partes más extensa de todo este trabajo final de máster. La quinta parte, las conclusiones que se han extraído del desarrollo e implementación del sistema de guiado de microrobots basados en el mapeo 2D de campos magnéticos. Finalmente la última parte la bibliografía que se ha utilizado para el desarrollo de este trabajo de igual manera anexos donde se plasma los esquemas de los prototipos desarrollados.

Agradecimientos¹

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de mis tutores, bajo cuya supervisiones escogí este tema y comencé el desarrollo de esta trabajo final de máster. De igual manera, agradezco a mis amigos, compañeros y profesores que han sido parte de mi formación tanto personal como profesional. Finalmente agradezco a toda mi familia, desde mi padre, mi madre y mis dos hermanos por su apoyo incondicional, su estímulo constante y el cariño que me han confiado a lo largo de mis años en la academia, también por el coraje y la convicción de mi padre y de mi madre, siempre me inspirarán. Agradezco a mi querida novia por el constante apoyo, por su cariño, por los ánimos brindados y por sus palabras de aliento durante todo este proceso de formación a nivel profesional.

Es a ellos, a quien dedico este trabajo.

¹A toda mi familia, mis amigos, colegas, y mi novia.

*Yo Miguel Antonio Jumbo Sedamanos dedico este
trabajo (Tesis Fin de Máster) a mis padres y a mis
dos hermanos.*

*La única manera de hacer
un trabajo genial
es
amar lo que haces.*

Steve Jobs.

Índice general

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Estado del arte | 3 |
| 1.2 | Fundamentación teórica | 8 |
| 1.3 | Objetivo General | 9 |
| 1.3.1 | Objetivos específicos | 9 |
| 2 | Requisitos del sistema | 10 |
| 2.1 | Mapeo 2D | 10 |
| 2.1.1 | Técnicos | 10 |
| 2.1.2 | Funcionales | 10 |
| 2.2 | Guiado 2D | 11 |
| 2.2.1 | Técnicos | 11 |
| 2.2.2 | Funcionales | 11 |
| 3 | Materiales y métodos | 12 |
| 3.1 | Herramientas del diseño del sistema | 12 |
| 3.2 | Mapeo 2D | 13 |
| 3.2.1 | Diagramas de Bloques | 13 |
| 3.2.2 | Elección del sensor | 13 |
| 3.2.3 | Microcontrolador (<i>uC</i>) | 14 |
| 3.2.4 | Hardware | 16 |
| 3.2.4.1 | Diagrama de conexiones | 16 |
| 3.2.4.2 | Prototipo hardware I | 17 |
| 3.2.4.3 | Prototipo hardware II | 17 |
| 3.2.5 | Software | 18 |
| 3.2.5.1 | Software del <i>uC</i> | 20 |
| 3.2.5.2 | Software del PC | 24 |
| 3.3 | Guiado 2D | 29 |
| 3.3.1 | Diagrama de Bloques | 29 |
| 3.3.2 | Elección del Driver | 30 |
| 3.3.3 | Microcontrolador | 30 |
| 3.3.4 | Hardware | 30 |
| 3.3.5 | Diagrama de conexiones | 30 |
| 3.3.5.1 | Prototipo Hardware I | 31 |
| 3.3.5.2 | Prototipo Hardware II | 33 |
| 3.3.6 | Software | 33 |
| 3.3.6.1 | Software del <i>uC</i> | 33 |
| 3.4 | Piezas 3D | 34 |
| 3.4.1 | Mapeo 2D | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.2 | Guiado 2D | 34 |
| 4 | Resultados y discusión | 36 |
| 4.1 | Resultados y Discusión del Mapeo 2D | 36 |
| 4.1.1 | Configuración con un único núcleo | 37 |
| 4.1.1.1 | Mediciones del Eje Y | 37 |
| 4.1.1.2 | Mediciones del Eje X | 41 |
| 4.1.2 | Configuración con dos núcleos en perpendicular | 44 |
| 4.1.3 | Configuración con dos núcleos en línea | 48 |
| 4.2 | Resultados y Discusión del Guiado 2D | 51 |
| 5 | Conclusiones | 57 |
| | Bibliografía | 58 |
| 6 | Anexo I | 61 |

Índice de figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Microscopio donde se integrará el sistema planteado [18]. | 2 |
| 1.2 | Configuración electromagnética del sistema [19]. | 3 |
| 1.3 | Configuración electromagnética del sistema [20] | 4 |
| 1.4 | Configuración electromagnética del sistema [21]. | 5 |
| 1.5 | Configuración electromagnética del sistema [22]. | 6 |
| 1.6 | Configuración electromagnética del sistema [23]. | 7 |
| 1.7 | Proceso de magnetización de microrobots, sistema [23]. | 7 |
| | | |
| 3.1 | Diagrama de Bloques del Mapeo 2D | 13 |
| 3.2 | Sensor magnético 3D, con efecto de hall TLV493D-A1B6 [30]. | 14 |
| 3.3 | Placa de desarrollo, plataforma hardware Arduino Due [31], [26]. | 15 |
| 3.4 | Diagrama de conexión del sistema [31], [26]. | 16 |
| 3.5 | Prototipo hardware versión 1, PCB Board e implementación. | 17 |
| 3.6 | Prototipo hardware versión 2, PCB Board e implementación. | 17 |
| 3.7 | Diagrama de bloques para el mapeo 2D con campos magnéticos. | 18 |
| 3.8 | Sistema propuesto para el mapeo 2D con campos magnéticos. | 18 |
| 3.9 | Protocolo de comunicación UART. | 19 |
| 3.10 | Diagrama de flujo general del software implementado en el uC. | 20 |
| 3.11 | Diagrama de flujo general del void setup (). | 21 |
| 3.12 | Diagrama de flujo general del void ConfSensorMg () y void ConfSensorMg1 (). | 22 |
| 3.13 | Diagrama de flujo general del void loop(). | 23 |
| 3.14 | Diagrama de flujo general de la configuración del software en el PC(MatLab) | 24 |
| 3.15 | Diagrama de flujo de la interrupción del botón Inicio/Paro() | 25 |
| 3.16 | Diagrama de flujo de la interrupción del temporizador() | 26 |
| 3.17 | Diagrama de flujo de la interrupción de recepción () | 27 |
| 3.18 | Diagrama de flujo de la función obtener X() | 28 |
| 3.19 | Diagrama de flujo de la función obtener Y() | 28 |
| 3.20 | Diagrama de flujo de la función obtener Z() | 29 |
| 3.21 | Diagrama de bloques del Guiado 2D | 29 |
| 3.22 | Driver seleccionado para el guiado 2D. | 30 |
| 3.23 | Diagrama de conexión generico. | 31 |
| 3.24 | Diagrama de bloques del hardware para el guiado 2D. | 31 |
| 3.25 | Prototipo hardware I, para el guiado 2D para una salida. | 32 |
| 3.26 | Verificación del funcionamiento del Prototipo hardware I. | 32 |
| 3.27 | Prototipo hardware II para el guiado 2D. | 33 |
| 3.28 | Piezas 3D de la parte del mapeo 2D. | 34 |
| 3.29 | Piezas 3D de la parte del guiado 2D. | 34 |
| 3.30 | Piezas 3D de medida, diseño (Parte superior e inferior). | 35 |
| 3.31 | Piezas 3D de medida, diseño e implementación. | 35 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Prototipo I en funcionamiento, software y hardware. | 36 |
| 4.2 | Prototipo II en funcionamiento, software y hardware. | 36 |
| 4.3 | Pruebas de laboratorio de la parte de mapeo 2D. | 37 |
| 4.4 | Configuraciones propuestas del sistema desarrollado. | 37 |
| 4.5 | Configuración con único núcleo, $I=0A$ | 38 |
| 4.6 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=0.5A$ | 38 |
| 4.7 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=1.0A$ | 39 |
| 4.8 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=1.5A$ | 39 |
| 4.9 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=2.0A$ | 40 |
| 4.10 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=2.5A$ | 40 |
| 4.11 | Configuración con único núcleo(eje Y), $I=3.0A$ | 41 |
| 4.12 | Configuración con único núcleo (eje X) , $I=0.5A$ | 41 |
| 4.13 | Configuración con único núcleo(eje X) , $I=1.0A$ | 42 |
| 4.14 | Configuración con único núcleo(eje X) , $I=1.5A$ | 43 |
| 4.15 | Configuración con único núcleo(eje X) , $I=2.0A$ | 43 |
| 4.16 | Configuración con único núcleo(eje X) , $I=2.5A$ | 44 |
| 4.17 | Configuración con único núcleo(eje X) , $I=3A$ | 44 |
| 4.18 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=0.5A$ | 45 |
| 4.19 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=1.0A$ | 45 |
| 4.20 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=1.5A$ | 46 |
| 4.21 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=2.0A$ | 47 |
| 4.22 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=2.5A$ | 47 |
| 4.23 | Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=3.0A$ | 48 |
| 4.24 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=0.5A$ | 48 |
| 4.25 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=1.0A$ | 49 |
| 4.26 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=1.5A$ | 49 |
| 4.27 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=2.0A$ | 50 |
| 4.28 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=2.5A$ | 50 |
| 4.29 | Configuración con 2 núcleos en línea, $I=3.0A$ | 51 |
| 4.30 | Hardware para la lectura de las señales digitales PWM. | 52 |
| 4.31 | Señales Digitales PWM generada para dos bobinas. | 52 |
| 4.32 | Activación de la bobina Norte(adelante). | 53 |
| 4.33 | Activación de la bobina Sur(atrás). | 54 |
| 4.34 | Activación de la bobina Oeste(izquierda). | 54 |
| 4.35 | Activación de la bobina Este(derecha). | 55 |
| 4.36 | Activación de las bobinas Noreste(adelante-derecha). | 55 |
| 4.37 | Activación de las bobinas Noroeste(adelante-izquierda). | 56 |
| 4.38 | Activación de las bobinas Sureste(atrás-derecha). | 56 |
| 4.39 | Activación de las bobinas Suroeste(atrás-izquierda). | 56 |

Índice de tablas

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Características principales del sistema OctoMag [19]. | 3 |
| 1.2 | Características principales del sistema [20]. | 4 |
| 1.3 | Características principales del sistema [21]. | 5 |
| 1.4 | Características principales del sistema [22]. | 6 |
| 2.1 | Requisitos técnicos del sistema parte Mapeo 2D. | 10 |
| 2.2 | Requisitos funcionales del sistema parte Mapeo 2D. | 11 |
| 2.3 | Requisitos técnicos del sistema parte Guiado 2D. | 11 |
| 2.4 | Requisitos funcionales del sistema parte Guiado 2D. | 11 |
| 3.1 | Especificaciones técnicas de la placa hardware de desarrollo [31], [26]. | 15 |

1 Introducción

La manipulación controlada de microrobots o micro-partículas ha aumentado en los últimos años, esto se debe a su amplia gama de aplicaciones, aplicaciones en vivo enfocadas a campos como la medicina y biotecnología [1], [2]. Tal es el caso que en la actualidad existen un gran número de publicaciones científicas enfocadas a estas aplicaciones, entre ellas una aplicación que ha tenido gran acogida y que promete mucho es la del guiado controlado de biomateriales para cirugías con un grado mínimo de invasión.

De igual manera las aplicaciones en la biomedicina que utilizan sistemas de guiado de microrobots han crecido significativamente, en comparación a décadas pasadas donde solo se encontraban investigaciones que predecían avances en esta área, es así que los microrobots brindan enfoques alternativos a procedimientos clínicos, como terapias mínimamente invasivas [3]. Además, se utilizan en procedimientos oftálmicos, endoscopias mediante cápsulas inalámbricas y en aplicaciones como manipulación de células [4], [5].

Existe distintos tipos de guiado que varían dependiendo de que fuente de energía se utilice, entre las más destacadas se encuentran los sistemas de guiado de microrobots que utilizan campos magnéticos como fuente de energía principal y como métodos de actuación campos magnéticos giratorios y tracción de gradientes. Otro tipo de guiado es mediante campos acústicos que utiliza como método de actuación la fuerza de radiación y transmisión acústica. Otra forma de guiar un sistema de microrobots es mediante tomografía fotoacústica computarizada. Otra alternativa de tipo de guiado es mediante luz que básicamente es inducir la luz sobre el microrobots formando un gradiente térmico. Por último, otra forma de guiar es mediante energía química con métodos de actuación como propulsión de burbujas, formación de gradientes químicos locales alrededor de microrobots o mediante activación de receptores celulares [6], [7], [8], [9].

Al utilizar campos magnéticos, se obtiene una manipulación sin contacto y flexible para entornos confinados, a tal punto que, microrobots o micropartículas impulsados por imanes pueden navegar en entornos vivos [10], [11]. El estudio de efecto Hall en semiconductores y la caracterización de dispositivos superconductores con propiedades magnéticas sirven para conocer con precisión la intensidad y la distribución de campos magnéticos producidos por imanes. En algunas áreas de estudio se realizan trabajos e investigaciones utilizando nadadores microscópicos o llamados en inglés microswimmers, estos microswimmers se alimentan por campos magnéticos externos, su alto potencial los impulsa a aplicaciones médicas debido a su accionamiento inalámbrico y locomoción activa. Hasta la actualidad los nadadores microscópicos magnéticos, que se activan por una fuente de energía externa o un microorganismo integrado, han sido utilizados en muchas plataformas de entrega de carga dirigida, también en aplicaciones de manipulación de células o objetos e incluso en áreas de ingeniería de tejidos [12], [13].

El avance en microrobots o nanorobots en el ámbito de la biomedicina provee de muchas ventajas en aplicaciones como cirugía de precisión, desintoxicación, entrega dirigida de drogas, etc [6], [7].

Por lo general el guiado de microrobots se realizan en medios líquidos, sin embargo existe un alto requerimiento de micromanipulación en medios secos. En medios secos la micromanipulación presenta grandes desafíos, como por ejemplo la fuerte adhesión y fricción a escalas micrométricas. Para poder abordar este problema, se aplican técnicas de levitación para la micromanipulación como levitación diamagnética [14] o acústica [15]. Pero para imponerse a las fuerzas de fricción en una superficie seca, los métodos como el deslizamiento y los movimientos de giro o volteo requieren de campos magnéticos variables con el fin de inducir el torque en lugar del tirón de gradiente directo [16].

La precisión, la exactitud y la velocidad son parámetros muy importantes para aplicaciones de micromanipulación de superficies secas y líquidas, así como su orientación, su preciso posicionamiento y sin olvidarnos de la locomoción sin ataduras, todas estas tareas mencionadas hasta ahora no se han logrado obtener en la micromanipulación en superficies secas [17].

Este trabajo final de máster(TFM) se enfoca en la caracterización de una superficie de dimensiones pequeñas (superficie de 14mm x 14mm) para ser utilizada en medios líquidos para el guiado de microrobots utilizando como fuente principal de energía campos magnéticos, por lo tanto en este TFM se ha planteado el diseño de un sistema de guiado de microrobots basado en el mapeo 2D de campos magnéticos, que tendrá como aplicación principal la integración a un microscopio digital invertido (ver Figura 1.1) para posteriores investigaciones.



Figura 1.1: Microscopio donde se integrará el sistema planteado [18].

1.1 Estado del arte

Grupos de investigación de distintas partes han reportado sistemas de manipulación magnética en estos últimos años con diferentes características, que van desde configuración electromagnética, entorno de trabajo y distribución del campo magnético, etc. Algunos sistemas desarrollados se describen a continuación. En el año 2010, el sistema llamado “OctoMag: An Electromagnetic

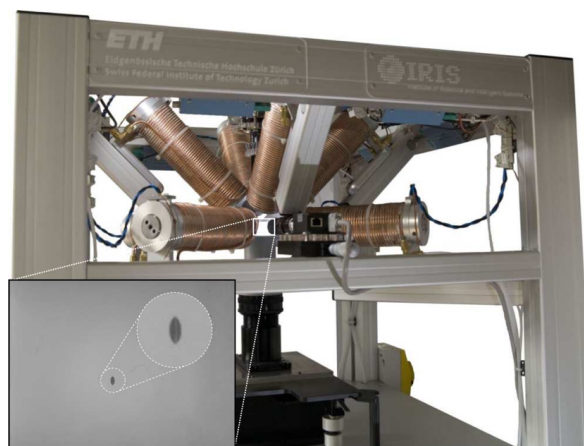


Figura 1.2: Configuración electromagnética del sistema [19].

System for 5-DOF Wireless Micromanipulation”, es un sistema que fue diseñado para controlar microrobots intraoculares para procedimientos delicados de retina, su entorno de trabajo es semiesférico de 130 mm de diámetro, además se puede utilizar como un sistema inalámbrico de micro-manipulación bajo un microscopio óptico [19].

Tabla 1.1: Características principales del sistema OctoMag [19].

| SISTEMA [19] | |
|--|----------------------------------|
| Número de bobinas electromagnéticas | 8 |
| Material del núcleo | VACOFLUX 50 |
| Intensidad de corriente (A) | 15 |
| Espacio físico de trabajo | semiesférica: 130 mm de diámetro |
| Área central de trabajo | Semiesférica: 25 mm de diámetro |
| Máximo flujo de campo magnético en el centro | 15 mT |
| Máximo gradiente de campo magnético en el centro | Aproximadamente 200 mT/m |
| Material microagente | Ni/CoNi |
| Manipulación efectiva | Centro del espacio de trabajo |

En la Figura 1.2 se muestra la configuración electromagnética del sistema OctoMag, seguidamente de la Tabla 1.1 que recoge los datos y características más importantes del sistema, en este sistema se observa que el espacio físico de trabajo juega un papel importante al igual que la distancia entre el espacio de trabajo y las bobinas.

Dos años después, 2012, se publicó un artículo llamado “Wireless Magnetic Based Control of Paramagnetic Microparticles”, en esta publicación se aprecia un sistema que se ha enfocado al modelado y control de micropartículas en un fluido con el fin de utilizarse en el cuerpo humano y en aplicaciones en vivo [20]. En la Figura 1.3 se muestra la configuración electromagnética del

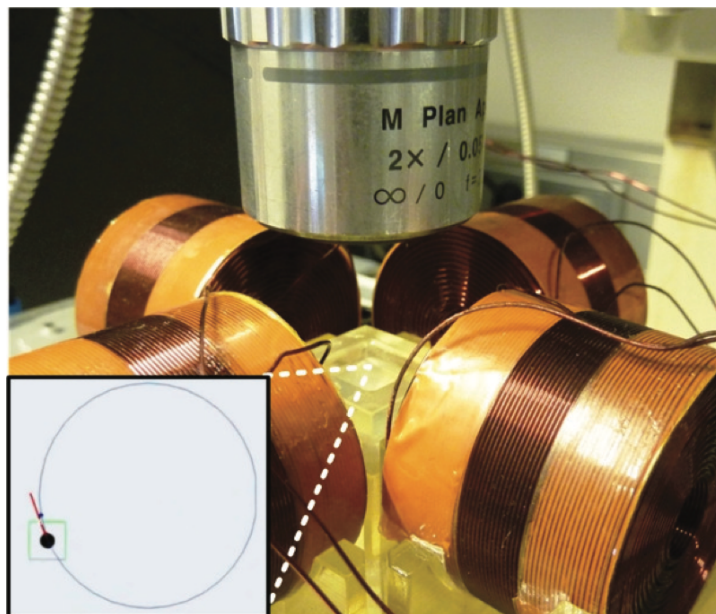


Figura 1.3: Configuración electromagnética del sistema [20].

sistema “Wireless Magnetic Based Control of Paramagnetic Microparticles”, seguidamente de la Tabla 1.2 que recoge los datos y características más importantes del sistema. Cabe mencionar que este sistema utiliza 4 bobinas para generar 15mT en el centro del espacio de trabajo, pero las dimensiones de su espacio de trabajo son inferiores a las del sistema OctoMag.

Tabla 1.2: Características principales del sistema [20].

| SISTEMA [20]. | |
|--|-------------------------------|
| Número de bobinas electromagnéticas | 4 |
| Material del núcleo | AIRE |
| Intensidad de corriente (A) | Desconocido |
| Espacio físico de trabajo | cuadrada: 39 mm x 39 mm |
| Área central de trabajo | rectangular: 2.4 mm x 1.8 mm |
| Máximo flujo de campo magnético en el centro | 15 mT |
| Máximo gradiente de campo magnético en el centro | Aproximadamente 60 mT/m |
| Material microagente | Paramagnético |
| Manipulación efectiva | Centro del espacio de trabajo |

Cuatro años más tarde, 2016, en un artículo científico se publica un sistema [21], este sistema fue diseñado para manipular microrobots inalámbricamente utilizando un método de actuación magnética diferente a los existentes con el propósito de obtener 6 grados de libertad, el artículo es “Six-degree-of-freedom magnetic actuation for wireless microrobotics”.

Tabla 1.3: Características principales del sistema [21].

| SISTEMA [21]. | |
|--|-------------------------------|
| Número de bobinas electromagnéticas | 8 |
| Material del núcleo | Hierro y aire |
| Intensidad de corriente (A) | 19 |
| Espacio físico de trabajo | cuadrada:120mmx120mmx120mm |
| Área central de trabajo | rectangular: 20mmx20mmx20mm |
| Máximo flujo de campo magnético en el centro | 15 mT |
| Máximo gradiente de campo magnético en el centro | Aproximadamente 100 mT/m |
| Material microagente | NdFeB/Hierro |
| Manipulación efectiva | Centro del espacio de trabajo |

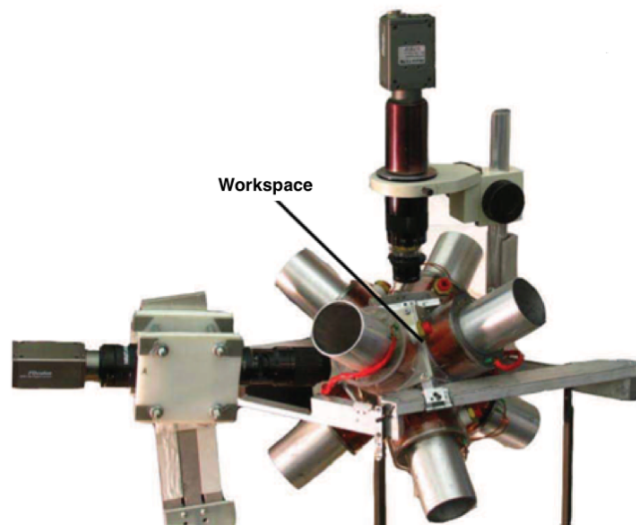


Figura 1.4: Configuración electromagnética del sistema [21].

En la Figura 1.4 se muestra la configuración electromagnética del sistema, seguidamente de la Tabla 1.3 que recoge los datos y característicos más importantes del sistema. Al igual que los sistemas citados anteriormente el máximo flujo de campo magnético obtenido en este sistema es de 15mT, esto se debe a que el material del núcleo en las bobinas, es hierro y aire (ver Figura 1.4), lo que implica que para generar un flujo de campo magnético mayor en el espacio físico de trabajo (ver Tabla 1.3) se requiere aumentar la intensidad de corriente, lo que implica un aumento de calor en las bobinas.

A finales del año 2017, un grupo de investigadores divulga el siguiente sistema “Development of an Enhanced Electromagnetic Actuation System With Enlarged Workspace” [22], enfocado a manipular micropartículas magnéticas para diversas terapias y diagnósticos mínimamente invasivo, este sistema a diferencia de los demás presenta un espacio de trabajo ampliado (ver Tabla 1.4). En la Figura 1.5 se muestra la configuración electromagnética del sistema y en la

Tabla 1.4: Características principales del sistema [22].

| SISTEMA [22]. | |
|--|-------------------------------|
| Número de bobinas electromagnéticas | 6 |
| Material del núcleo | DT4E |
| Intensidad de corriente (A) | 10 |
| Espacio físico de trabajo | Semiesférico, diámetro 110mm |
| Área central de trabajo | Semiesférico, diámetro 20mm |
| Máximo flujo de campo magnético en el centro | 40 mT |
| Máximo gradiente de campo magnético en el centro | Aproximadamente 250 mT/m |
| Material microagente | Paramagnético |
| Manipulación efectiva | Centro del espacio de trabajo |

Tabla 1.4 se recoge las características principales del sistema [22]. A diferencia de los anteriores sistemas, este sistema [22] presenta un mayor flujo de campo magnético en el centro del espacio físico de trabajo, el campo magnético generado es alrededor de 40mT, esto se debe al material del núcleo en las bobinas (ver Tabla 1.4) y la configuración de las bobinas.

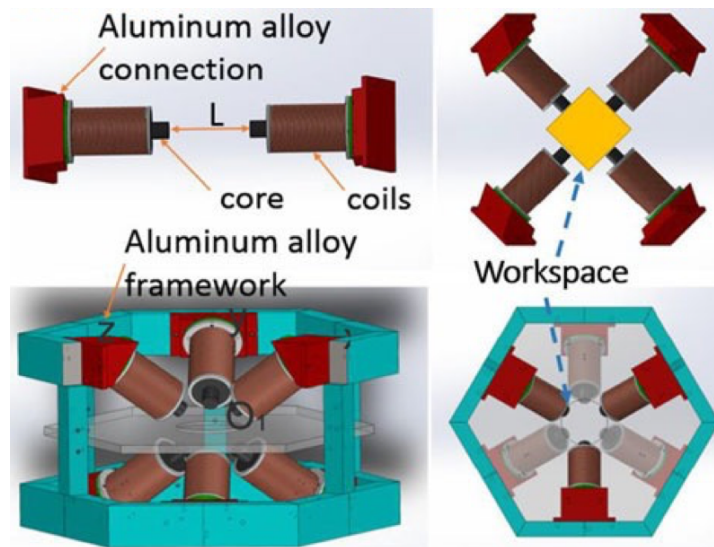


Figura 1.5: Configuración electromagnética del sistema [22].

A mediados del año 2019, el crecimiento de trabajos relacionados al guiado de microrobots utilizando campos magnéticos, ha mejorado rotundamente, un punto principal de esta mejora son los microrobots en sí, porque anteriormente los microrobots estaban limitados por su diseño, a tal punto, que en la actualidad un grupo de investigadores ha publicado un artículo científico en donde se han enfocado en la magnetización de microrobots flexibles con el fin de obtener una transformación 3D de estos microrobots logrando funciones y capacidades complejas de locomoción, las aplicaciones se enfocarían a desafíos como el suministro de drogas, la manipulación de objetos y los procedimientos mínimamente invasivo.

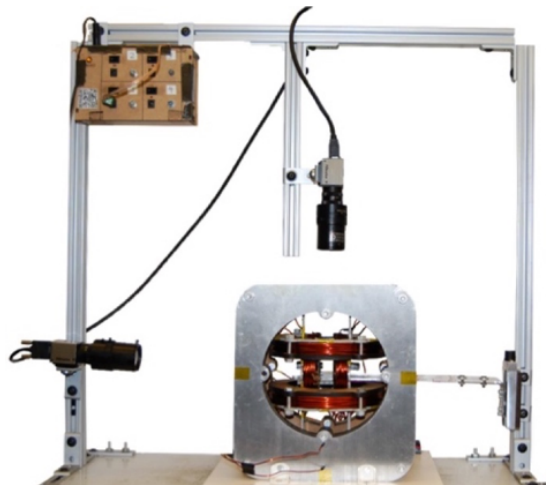


Figura 1.6: Configuración electromagnética del sistema [23].

Para poder modelar magnéticamente a las partículas de un microrobot (ver Figura 1.6 y ver Figura 1.6), se ha utilizado un método basado en litografía ultravioleta (UV) con el fin de re-orientar las partículas magnéticas de manera controladas solo en materiales flexibles [23].

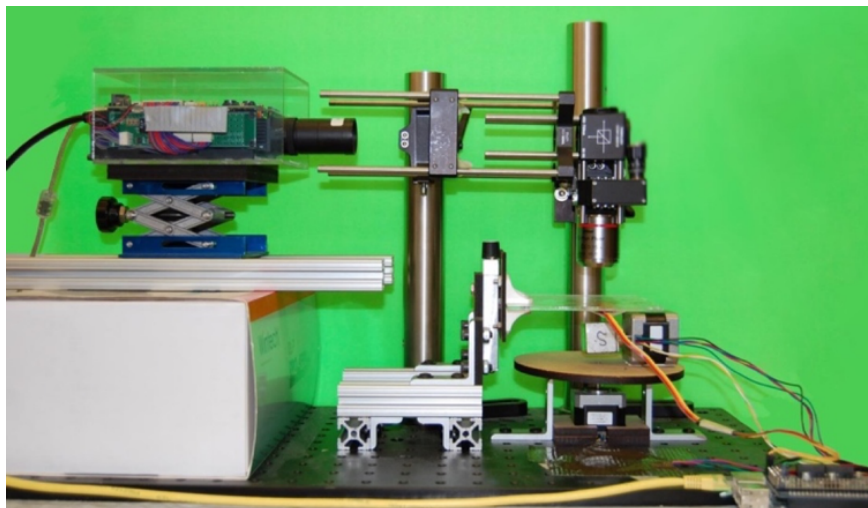


Figura 1.7: Proceso de magnetización de microrobots, sistema [23].

1.2 Fundamentación teórica

Una parte muy importante de este TFM son los sensores, entonces, a juzgar por la información existente en la bibliografía hay muchas definiciones de sensor, pero la mayoría considera la siguiente definición: un objeto con la capacidad de poder variar una propiedad propia ante una magnitud física o química, esta definición se conoce en la industria como sensor. Las magnitudes físicas o químicas se las conoce como variables de instrumentación, para transformar estas variables de instrumentación en variables eléctricas se requiere de un transductor. Algunos ejemplos de las variables de instrumentación pueden ser temperatura, fuerza, presión, humedad, pH, etc. Un sensor a diferencia de un transductor siempre se encuentra en contacto con la variable de instrumentación, pero, en la actualidad los dispositivos conocidos como sensores son inteligentes, lo que significa que integran en un solo dispositivo el elemento sensor con el elemento transductor obteniendo como salida o respuesta del dispositivo directamente una señal eléctrica.

Los sensores que se ha utilizado en este trabajo final de máster son de tipo magnético y están basados en el efecto de hall. El efecto Hall es la generación de una fuerza electromotriz transversa en una muestra que lleva corriente eléctrica y que es expuesta perpendicularmente a un campo magnético, siendo más explícito si a una lámina conductora o semiconductora se hace circular una corriente eléctrica en presencia de un campo magnético perpendicular, las cargas que se encuentran circulando experimentan una fuerza magnética, estas cargas son desplazadas a los bordes de la lámina debido a esta fuerza, lo que conlleva a que existan un exceso de cargas negativas en un borde de la lámina y un exceso de cargas positivas en el otro borde, como resultado se obtiene la aparición de un campo eléctrico, y a su vez una diferencia de potencial en los bordes de la lámina que puede ser medido con multímetro y es conocido como voltaje hall, a todo esto se lo considera como efecto de hall [24].

Los sensores magnéticos no miden campo magnético ni flujo magnético, miden densidad de flujo magnético, estos términos se encuentran muy ligados entre sí, pero se trata de magnitudes físicas muy distintas. El campo magnético (H) es un campo vectorial que describe la influencia magnética sobre una carga eléctrica de otras cargas en movimiento. La densidad de flujo magnético también conocida como inducción magnética (B) describe la densidad y el sentido de las líneas de campo magnético que atraviesan una área o superficie definida, si más densa son las líneas de campo magnético como resultado tendremos una mayor densidad de flujo magnético. El flujo magnético (ϕ) es la cantidad de densidad de flujo magnético que fluye a través de una resistencia magnética.

La palabra “microrobot” se acuña a robots en miniatura de tamaño centimétrico construidos por métodos convencionales y se asocia con la microelectrónica para su respectivo control, los microrobots son dispositivos submilimétricos con partes individuales de tamaño micrométrico construidas por la industria y tecnología micro-mecanizada, por lo general las partes de los microrobots incluyen enlaces de robots triangulares normalmente llena de huecos y fabricados con silicio policristalino, sin embargo, estos microrobots con estas características no operan en el agua, lo que significa que no son adecuados como micro-accionadores en aplicaciones de manipulación de células [25]. En este trabajo de fin de máster se utilizan microrobots con materiales que presentan propiedades ferromagnéticas.

1.3 Objetivo General

- Desarrollar e implementar un sistema genérico de guiado de microrobots o micropartículas basado en el mapeo 2D de campos magnéticos.

1.3.1 Objetivos específicos

- Dimensionar e identificar los sensores necesarios para realizar un mapeo 2D y los drivers de potencia que se requieren para desarrollar el sistema de guiado 2D.
 - Diseñar e implementar plataformas de hardware que integre toda la instrumentación para realizar el mapeo 2D de campos magnéticos y que integre toda la electrónica de potencia necesaria para el guiado 2D de microrobot.
 - Desarrollar software que permita la adquisición, visualización, análisis, procesamiento de la data de sensores y el control del sistema de guiado 2D de microrobots.
 - Mapear el campo magnético de una plataforma genérica mediante un arreglo de sensores magnéticos de los ejes (X,Y) e identificar el valor del campo magnético generado en el centro de la plataforma.
 - Generar campos magnéticos de al menos 10mT en el centro del espacio de trabajo de la plataforma.
-

2 Requisitos del sistema

A continuación se describen los requisitos necesarios del sistema, estos están proporcionados en dos partes, una parte del mapeo 2D y otra parte del guiado 2D, además en cada apartado se detallan los requisitos técnicos y requisitos funcionales necesarios para el funcionamiento correcto del sistema.

2.1 Mapeo 2D

2.1.1 Técnicos

Se detalla en la Tabla 2.1 los requisitos técnicos necesarios del sistema del mapeo 2D, los requisitos técnicos del sistema incluyen, información técnica de los dispositivos como por ejemplo la energía requerida del sistema, las dimensiones del mismo, así como que protocolos se va a utilizar el sistema, entre otras.

Tabla 2.1: Requisitos técnicos del sistema parte Mapeo 2D.

| | |
|--|-------------------|
| Alimentación del sistema (voltaje) | 5V/3.3V |
| Intensidad de corriente mínima (I) | 300mA hasta 800mA |
| Rango de trabajo de los sensores | -130 mT a +130 mT |
| Resolución de los sensores | 12 bits (98uT) |
| Resolución máxima de la placa de desarrollo | 12 bits |
| Tamaño de la placa de desarrollo | 101.52mm x 53.3mm |
| Tamaño Placa expansión de los sensores (versión 1) | 11cm x 10cm |
| Tamaño Placa expansión de los sensores (versión 2) | 12cm x 1.4cm |
| Área específica de trabajo | 1.4cm x 1.4cm |
| Mediciones de campos magnéticos en los ejes | X,Y,Z |
| Protocolo de comunicación Placa de desarrollo - Sensores | I2C |
| Protocolo de comunicación Placa de desarrollo - PC | UART |

2.1.2 Funcionales

A continuación en la Tabla 2.2 se detallan los requisitos funcionales necesarios del sistema de la parte del mapeo 2D. Los requisitos funcionales del sistema incluyen, información acerca de que número de sensores, tecnología que utilizan los sensores, plataformas software que se utilizan, entre otros más requisitos.

Tabla 2.2: Requisitos funcionales del sistema parte Mapeo 2D.

| | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Tipo del Sensor | SMD, Sensor magnético efecto de hall |
| Número de sensores | 16 sensores |
| Topología de los sensores | matriz de 4x4 |
| Microcontrolador | Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. |
| Plataformas de Software | Arduino, MatLab |
| Plataformas de diseño de PCB | Eagle |

2.2 Guiado 2D

2.2.1 Técnicos

De la misma forma en la Tabla 2.3 se detallan los requisitos técnicos necesarios del sistema de la parte del guiado 2D, estos requisitos técnicos proporcionan una idea clara de lo que es necesario para el desarrollo de esta parte del sistema.

Tabla 2.3: Requisitos técnicos del sistema parte Guiado 2D.

| | |
|---|-----------------------|
| Alimentación en la parte del guiado 2D(voltaje) | 0 - 3.3V |
| Intensidad de corriente (I) max por bobina | 3.5A |
| Tamaño de la placa de Potencia | 120mm x 120mm |
| Imax. por canal del Driver Amp | hasta 8A |
| Tipo de suministro del Driver Amp | Single y Dual |
| Comunicación entre Drivers y Uc | PWM(1 por driver Amp) |
| Suministro Dual del Driver Amp | +15V,-15V |
| Intensidad de corriente (I) del driver Amp | Adjustable |

2.2.2 Funcionales

Por ultimo en la Tabla 2.4 se muestran los requisitos funcionales necesarios del sistema de la parte del guiado 2D, estos requisitos funcionales describen información acerca de la parte de electrónica de potencia necesaria para el funcionamiento del sistema.

Tabla 2.4: Requisitos funcionales del sistema parte Guiado 2D.

| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Tipo del Driver Amp | Alto voltaje, alta corriente |
| Número de Drivers Amp | 4(1 por bobina) |
| Actuador para el guiado | Joystick (eje X, eje Y) |
| Microcontrolador | Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. |
| Plataformas de Software | Arduino |
| Plataformas de diseño de PCB | Altium Designer or Eagle |

3 Materiales y métodos

Este capítulo hace énfasis a las dos partes principales del TFM, que son el mapeo 2D y el guiado 2D, desde lo más básico hasta lo más específico, entonces, como materiales y métodos que se han utilizado en el desarrollo del sistema de guiado de microrobots tenemos desde la elección del sensor, la elección de la placa de desarrollo con sus debidas funcionalidades, el desarrollo de las plataformas hardware que integra la instrumentación y electrónica de potencia, el desarrollo del software, así como el diseño y las herramientas de diseño utilizadas para el desarrollo de las plataformas hardware, software y piezas 3D. Todos los métodos y materiales que se han utilizado están basados en los requisitos mínimos del sistema tanto para parte del mapeo 2D como el guiado 2D.

3.1 Herramientas del diseño del sistema

Las herramientas de diseño para el desarrollo del sistema planteado en este trabajo final de máster son plataformas software algunas de licencias abiertas y otras de propietarias. Una plataforma Open Source Arduino y tres plataformas propietarios como MatLab, Eagle y Inventor. La plataforma de software Arduino [26], [27], se ha utilizado para realizar la implementación del algoritmo que contempla la configuración, adquisición y envío de la data de los sensores.

Por otro lado la plataforma software MatLab es un software que presenta un amplio laboratorio matemático computacional utilizados para el procesamiento y análisis de datos, MatLab [28] se ha utilizado en la implementación del algoritmo para el análisis, procesamiento, recepción y visualización de la data enviada por la placa hardware de desarrollo. Eagle es un software de diseño electrónico que permite diseñar placas de circuito impreso o PCBs, y se ha utilizado para el diseño electrónico del los prototipos hardware [29]. La plataforma software Inventor, que se ha utilizado para el diseño de piezas 3D que se han utilizado como la estructura base que soporta todo el sistema desarrollado.

3.2 Mapeo 2D

3.2.1 Diagramas de Bloques

Para realizar la caracterización de la zona de interés, en el eje X y en el Y, se ha dividido en bloques, donde se presenta la metodología utilizada en el mapeo 2D, ver la figura 3.1. Como la elección del sensor, el microcontrolador que se utiliza, la parte hardware y la parte del software.

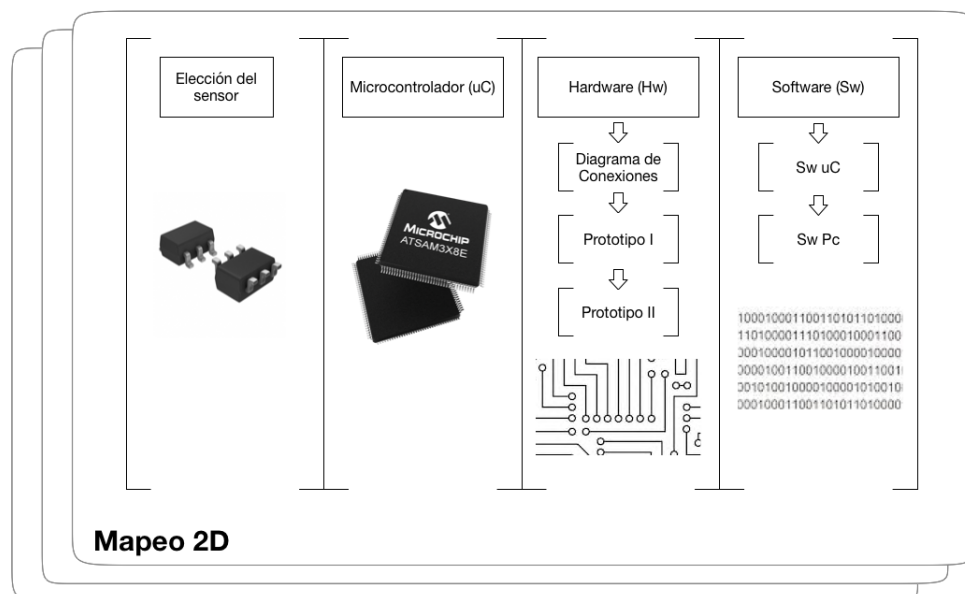


Figura 3.1: Diagrama de Bloques del Mapeo 2D .

3.2.2 Elección del sensor

El sensor magnético (ver Figura 3.2) que se utiliza es TLV493D-A1B6, es un sensor 3D magnético pequeño (SMD), presenta un rango de medición lineal de campo magnético en los ejes X,Y,Z hasta $\pm 130\text{mT}$. Además el sensor es de bajo consumo de corriente $10\mu\text{A}$, sus salidas digitales están basadas en la interfaz estándar I2C [30]. La resolución de la data del sensor es de 12 bit para cada medida en cada dirección, el rango de voltaje es de 2.8V hasta 3.5V.

La sensibilidad es de 10.2mT en cada eje (X,Y,Z) del campo magnético. No presenta una dirección de inicio pre-programada. La resolución del sensor es de 98 uT , su rango de temperatura va desde los 40°C hasta los 130°C . El sensor magnético 3D TLV493D-A1B6 detecta densidad de flujo magnético en las tres direcciones (X,Y,Z), la densidad de flujo magnético en la dirección-Z es detectada por una placa lateral-HALL paralela a la superficie del chip [30].

Las densidades de flujo magnético para la dirección-X y la dirección-Y son detectadas por placas vertical-HALL perpendiculares a la superficie del chip. Con las mediciones de las densidades de flujo magnético detectadas en las 3 direcciones se puede realizar un mapa de posiciones magnéticos en un espacio 3D.

La frecuencia de actualización del sensor en las 3 direcciones es de 3.3 KHz, es decir un tiempo estimado de 1 partido por la frecuencia de actualización ($1/33\text{KHz}$). Como se ha mencionado anteriormente la interfaz de comunicación del sensor es I2C con el microcontrolador, esta interfaz presenta dos funciones principales: configuración de los sensores (dirección del sensor y modo de trabajo) y la lectura de los datos del sensor [30].

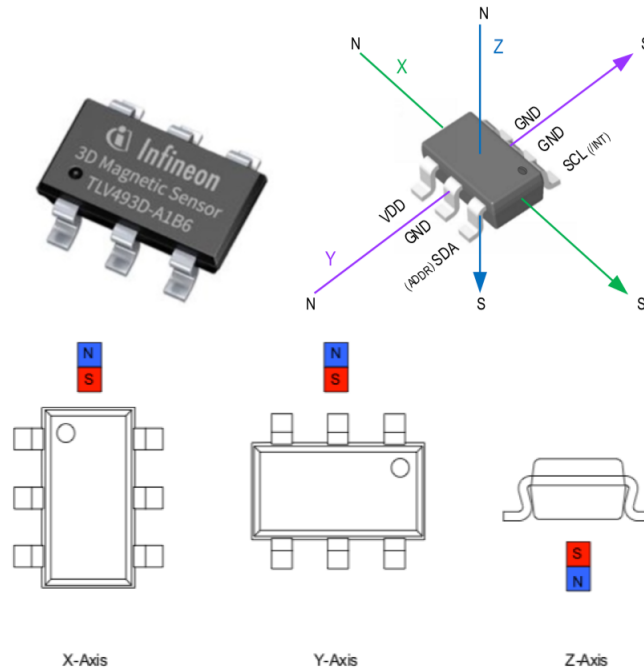


Figura 3.2: Sensor magnético 3D, con efecto de hall TLV493D-A1B6 [30].

3.2.3 Microcontrolador (μC)

Se ha utilizado un microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU, para la adquisición de los valores del campo magnético y la configuración de los sensores magnéticos. El microcontrolador se comunicará mediante el protocolo I2C con los sensores magnéticos, algo particular de este microcontrolador es que presenta dos puertos I2C de comunicación. Con el fin de reducir el tiempo de adquisición se conectarán 8 sensores a cada puerto. Habrá que tener en cuenta que el segundo puerto I2C no tiene resistencias pull-up, y por tanto se le deberán añadir para su correcto funcionamiento, en la placa de hardware de los sensores [31], [26].

Este microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU, se encuentra integrado en una placa de desarrollo conocida como Arduino Due, esta placa de desarrollo será la fuente de alimentación de los sensores. Los sensores magnéticos tienen un consumo medio de 3.7 mA y un rango de voltaje de 2.8V- 3.5V. La placa de desarrollo presenta un rango de voltajes en sus salidas/entradas digitales de 3.0V – 3.6V y a su vez puede ofrecer hasta 15 mA en los pines digitales del grupo 1 y el grupo 2 con un máximo de 130 mA de carga total.

El consumo de los 16 sensores es de unos 60 mA, por tanto, la placa de desarrollo que integra el microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU, (ver Figura 3.3) soporta las especificaciones mínimas requeridas para el correcto funcionamiento del sistema. En la Tabla 3.1 se detallan las especificaciones principales de la placa de desarrollo [31].

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas de la placa hardware de desarrollo [31], [26].

| | |
|---|--------------------|
| Microcontrolador | 8 |
| Voltaje de operación(V) | 3.3V |
| Pines digitales de Entrada/Salida | 54 (12 con PWM) |
| Entradas analógicas | 12 |
| Salidas analógicas | 2 (DAC) |
| Intensidad de corriente máxima de los pines digitales (E/S) | 130mA |
| Intensidad de corriente máxima | 800mA |
| Memoria SRAM | 96 KB (64 + 32 KB) |
| Memoria Flash | 512 KB |
| Frecuencia de funcionamiento | 84MHz |
| Interfaces I2C | 2 Puertos |
| Interfaces UART | 4 Puertos |

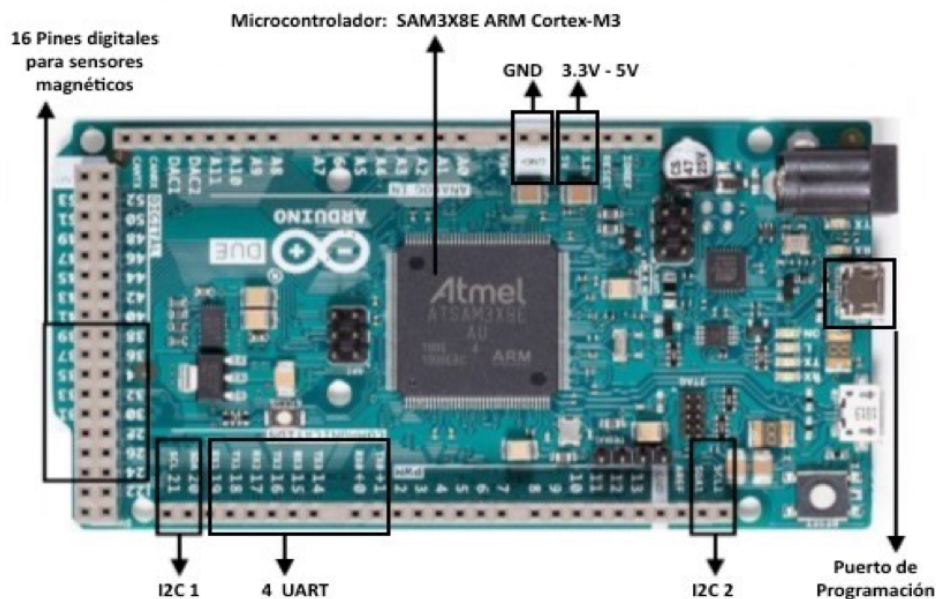


Figura 3.3: Placa de desarrollo, plataforma hardware Arduino Due [31], [26].

3.2.4 Hardware

3.2.4.1 Diagrama de conexiones

El diagrama de conexión se detalla en la Figura 3.4, mostrando la conexión entre la placa de desarrollo y los 16 sensores magnéticos, así como la conexión entre la placa de desarrollo y el computador, mediante el cable usb-UART.

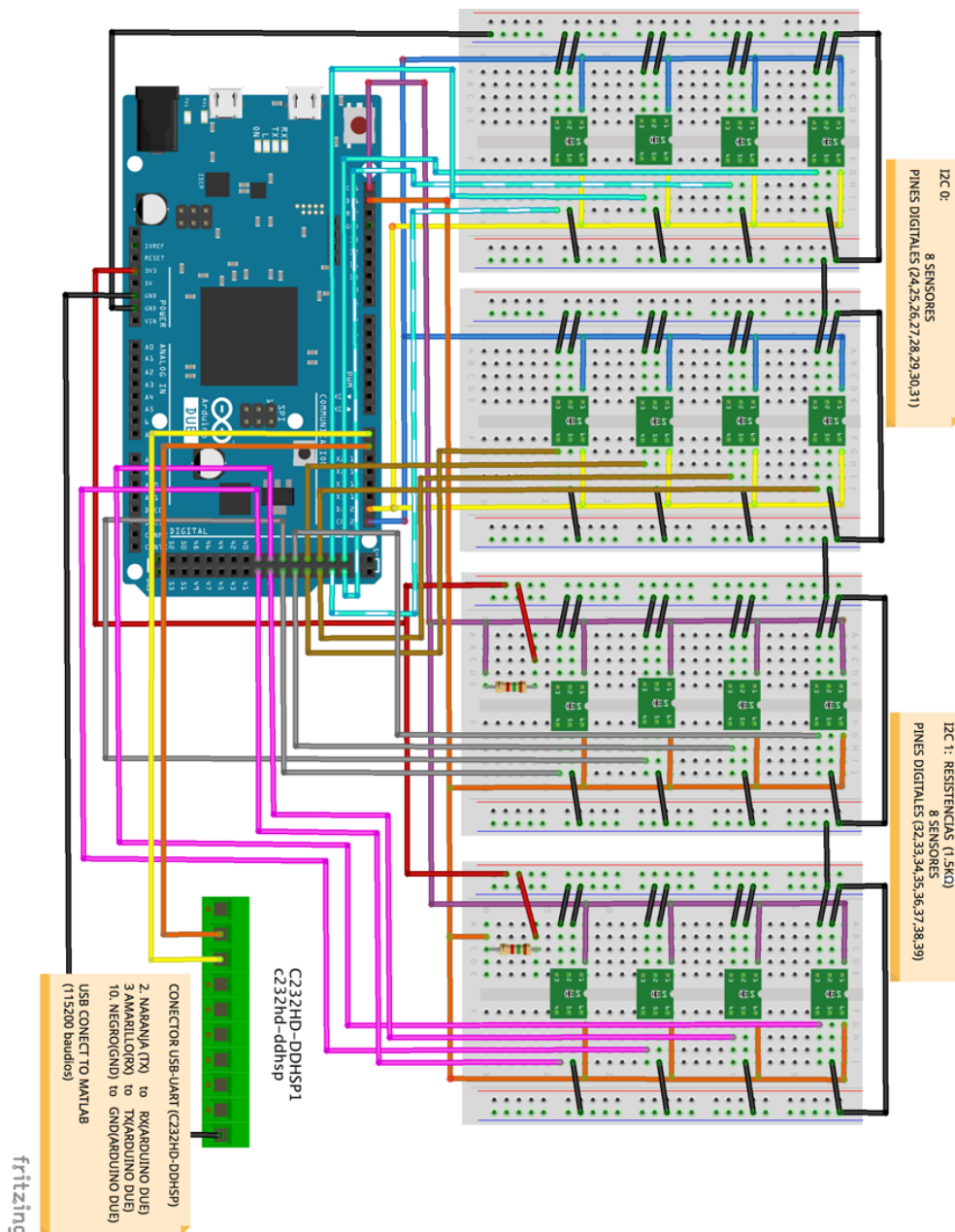


Figura 3.4: Diagrama de conexión del sistema [31], [26].

3.2.4.2 Prototipo hardware I

Inicialmente, se ha diseñado, desarrollado e implementado un prototipo hardware versión 1, en donde se incluye la conexión entre los 16 sensores magnéticos y la placa de desarrollo, contemplando dimensiones proporcionales entre los sensores, a continuación se muestra la PCB diseñada e implementada (par ver el esquemático, ir al Anexo I).

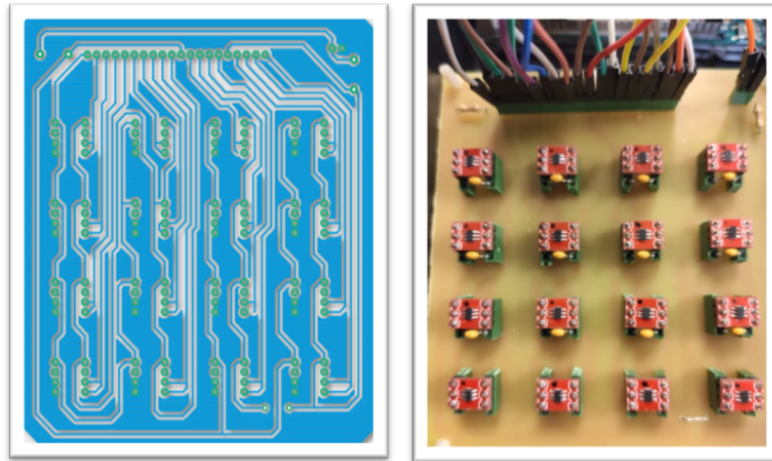


Figura 3.5: Prototipo hardware versión 1, PCB Board e implementación.

3.2.4.3 Prototipo hardware II

Una vez que el prototipo de hardware versión 1, ha sido implementado y puesto en funcionamiento, se procede a realizar el prototipo de hardware versión 2, adaptando a requerimientos más específicos, como por ejemplo teniendo en cuenta las dimensiones de trabajo (14 mm x 14mm) para el guiado de microrobots con campos magnéticos, así como su estructura de soporte, por lo que el prototipo de hardware II se ha basado en estos requerimientos; de igual forma se muestra el diseño e implementación del PCB (para ver el esquemático del este PCB ir al Anexo I).

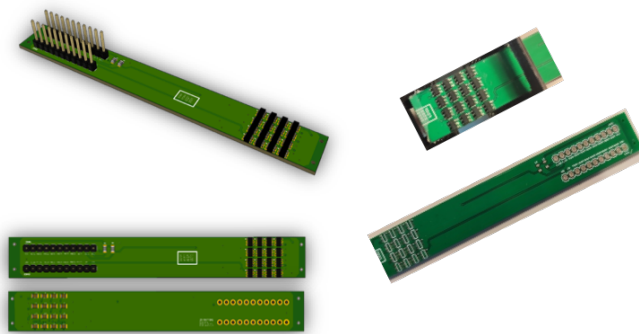


Figura 3.6: Prototipo hardware versión 2, PCB Board e implementación.

3.2.5 Software

El desarrollo y la implementación del software que ha utilizado en este sistema propuesto, conlleva a realizar dos tipos de algoritmos (programas), el primero enfocado a la configuración, adquisición y transmisión de la data de los sensores y el segundo direccionado a la recepción, procesamiento y visualización de la data de los sensores. En la Figura 3.7 se muestran diagramas de bloques del sistema propuesto.

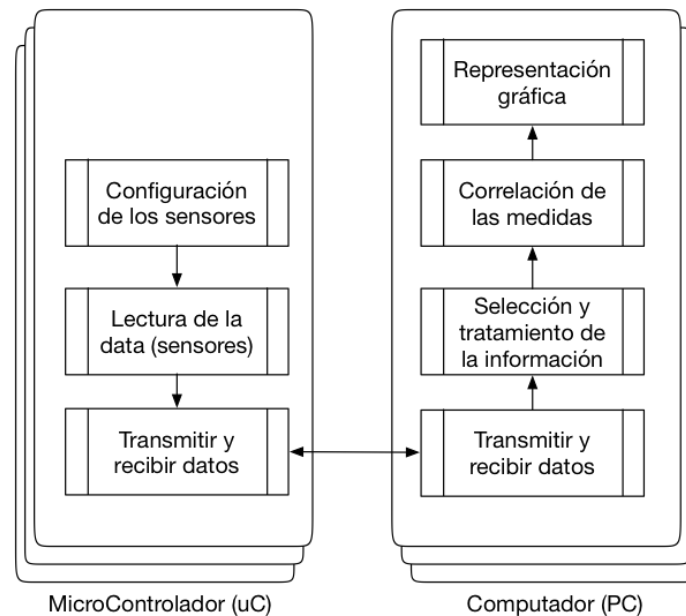


Figura 3.7: Diagrama de bloques para el mapeo 2D con campos magnéticos.

El sistema propuesto, esta conformado por una placa hardware desarrollada que integra una matriz de 4 x 4 (16 sensores) con su respectivo acondicionamiento, por un microcontrolador ARM-M3 integrado en la placa de desarrollo comercial (Arduino Due) y por un computador donde se realiza la representación gráfica de la data recolectada por los sensores, ver Figura 3.8.

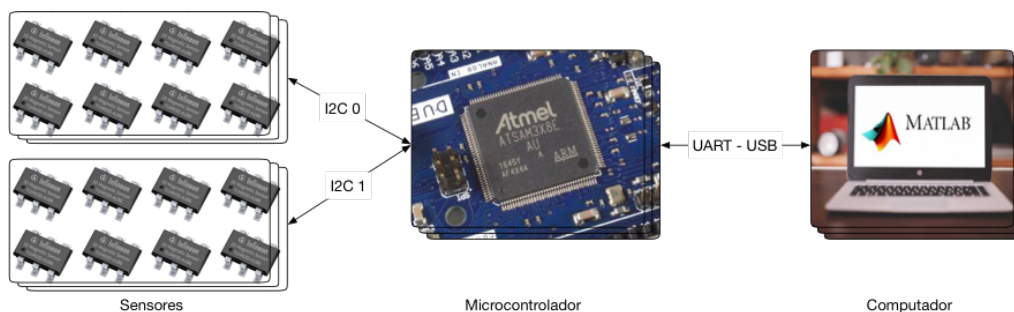


Figura 3.8: Sistema propuesto para el mapeo 2D con campos magnéticos.

Para establecer la comunicación entre el uC y el PC se ha utilizado un canal UART y un cable C232HD-DDHSP(USB), este cable permite conectar un puerto USB de un PC con cualquier microcontrolador (uC) que admita una conexión serie. El protocolo UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter) solamente utiliza dos cables, uno de recepción de datos y otro de transmisión, en el terminal de transmisión de uno de los dispositivos se debe de conectar al de recepción del otro, y viceversa, sin olvidar de conectar la tierra (GND) común en ambos dispositivos, la velocidad de transmisión de la información queda preestablecida en la configuración de los dispositivos a conectar antes de iniciar la transmisión, esta velocidad siempre tiene que ser la misma en ambos dispositivos. Recordando un poco de teoría, se explica el funcionamiento del protocolo UART utilizado en la comunicación del uC y el PC.

En estado inactivo la línea permanece en estado alto ‘1’, la transmisión de datos comienza con un bit de arranque (START), el cual siempre es ‘0’, cada dato tiene un ancho de 8 bits (primero se transmite el bit menos significativo “LSB”), la transmisión de datos termina con un bit de parada (STOP), siempre es ‘1’.

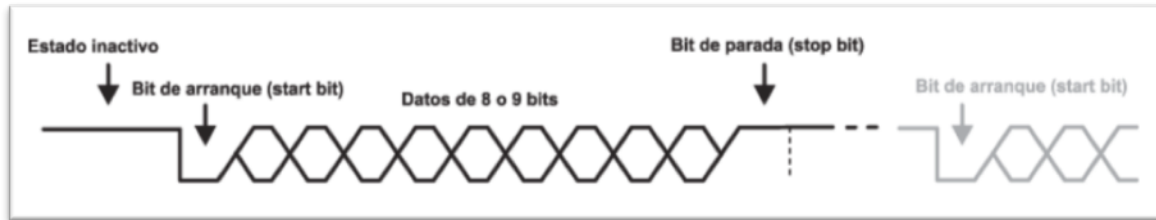


Figura 3.9: Protocolo de comunicación UART.

En el PC mediante el software Matlab se configura la recepción para crear una interrupción cuando se reciba la trama procedente del uC, en esta configuración se determina la velocidad de transmisión, el tipo de dato enviado, el puerto y la longitud entre otros parámetros. La trama creada tiene una configuración que permite detectar al PC errores en el envío. En primer lugar se envía un número concreto para determinar si el inicio de la comunicación ha sido correcto, este número siempre será el mismo independiente de los valores que se envíen, a este número le siguen los registros 0,1,2,4 y 5 de los 16 sensores que contienen los valores del campo magnético en los tres ejes (X,Y,Z).

Cada uno de estos registros tiene un byte de longitud, y contienen los valores de campo repartidos entre los diferentes registros, al final de toda la trama se envía otro número para detectar errores, pero en este caso sí que depende de los valores enviados en la trama.

Este número, a partir de ahora el checksum, se calcula sumando todos los valores de la trama y dividiéndolo por el número de valores enviados (cantidad de datos enviados exceptuando el checksum), el resto de la división será el checksum. Esto permite determinar si ha sucedido una pérdida de información en alguno de los valores, ya que el valor está condicionado por todos los valores de la trama, resumen de la trama enviada es:

”85(1 byte) + data sensores (96 byte) + checksum(1 byte)” = 98 bytes.

3.2.5.1 Software del uC

A continuación se representa mediante diagramas de flujo la descripción del software implementado en el microcontrolador (uC) así como una explicación de cada parte del software del uC, concerniente a la configuración, adquisición y transmisión de la data de los sensores. Como primera parte el software desarrollado se enfoca a configurar cada uno de los 16 sensores, luego ha adquirir los tres datos (X,Y,Z) de cada sensor y finalmente enviar todos los datos de cada uno de los sensores en una trama global. El software desarrollado para el uC se dividió en funciones con el fin de realizar una programación modular. En la Figura 3.10 se describe de manera general la composición del software implementado en el uC, el cual consta de variables globales de tipo *BYTE* y procedimientos como el *void setup ()* y el *void loop ()*. Cabe mencionar que se utiliza una librería llamada *wire.h* para la comunicación I2C, esta librería nos permite acceder a funciones que interaccionan con registros del microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU. El *void setup ()* es un procedimiento o función general, que solo se ejecuta una sola vez en el hardware, en esta función se inicia la configuración para la comunicación entre el uC y los sensores y entre el uC y el PC. La velocidad de comunicación seteado es de 115200 baudios para ambas comunicaciones (uC - Sensores y uC - Pc).

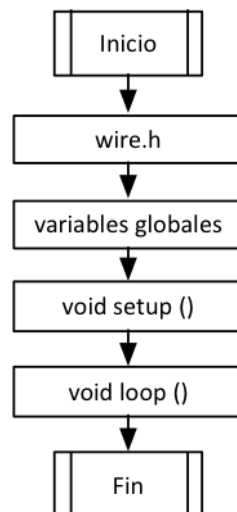


Figura 3.10: Diagrama de flujo general del software implementado en el uC.

Además en el *void setup ()* se setea los pines digitales como salida, pin que requiere cada sensor. Los pines utilizados son 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 para los 16 sensores. Luego se hace el llamado a funciones *void ConfSensorMg ()* y *void ConfSensorMg1 ()*, funciones que designan las direcciones para cada sensor ver Figura 3.11.

La función *void ConfSensorMg ()* realiza la configuración de las direcciones de los 8 primeros sensores, en ella se utiliza el I2C 0 (pin 20 SDA, pin 21 SCL), además esta función requiere de parámetros como lo son: el estado, el pin digital, la dirección default, la dirección nueva, y el tipo pin SDA del I2C 0.

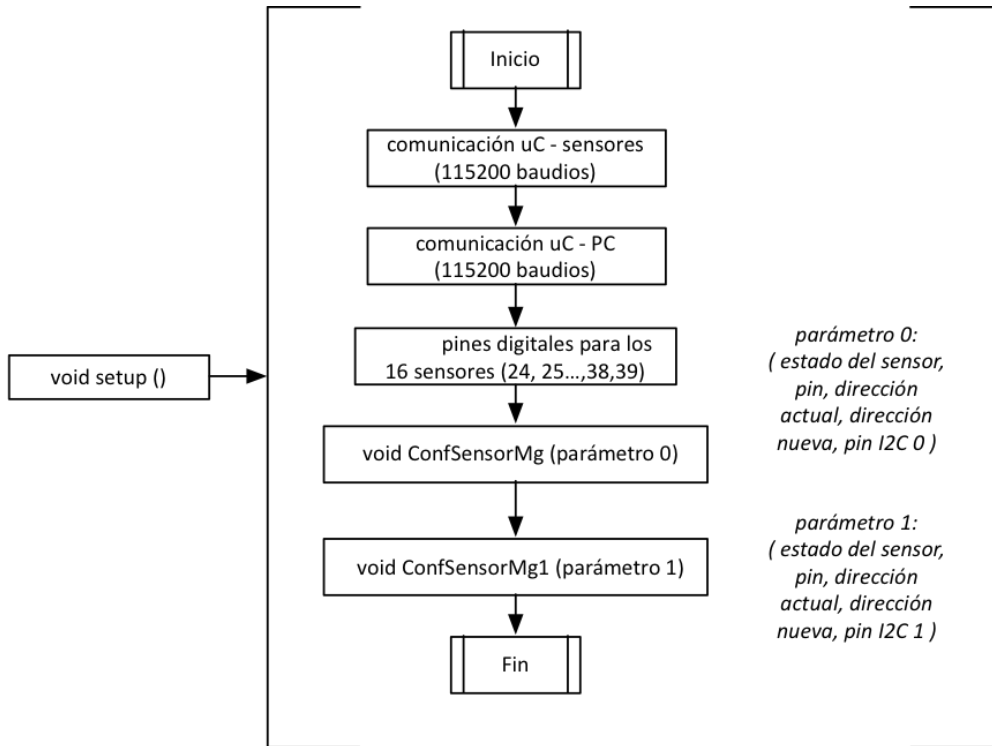


Figura 3.11: Diagrama de flujo general del void setup ().

Cabe mencionar que la función *void ConfSensorMg1 ()*, es para configurar los 8 sensores restantes, con el I2C 1, esta función es idéntica a la *void ConfSensorMg ()*, solo cambia el pin del I2C 1, mediante el siguiente diagrama de bloques se describe ambas funciones.

En la función *void ConfSensorMg ()* y *void ConfSensorMg1 ()*, se hace el llamado de la función *paridad()*, función que es de tipo *BYTE* y retorna valores de tipo bytes, en esta función lo que se hace es analizar todos los registros de escritura de cada sensor (son 4 registros de escritura y 10 de lectura por sensor), entonces se almacenan todos los registros de escritura y se suman todos los bits que presenten un valor de '1' de cada registro de escritura, si el valor de la suma de los bits '1' de todos los registros de escritura es par, solo entonces, se realiza una mascara *OR* en el registro de escritura 2 para cambiar el bit MSB de este registro y que la suma de bits '1' de todos los registros de escritura de impar. En el caso, de que la suma de bits '1' de todos los registros de escritura sea impar, no es necesario cambiar el bit MSB del registro de escritura 2.

Para saber si la suma es par o impar se realizó una condición *if* que verifica que el modulo de 2 de la suma ($\text{suma} \% 2$) en otras palabras que el residuo sea igual a cero ($\text{suma} \% 2 == 0$), solo si eso se cumple, la condición indica que la suma es par. Cabe recalcar que la función *paridad()*, utiliza un función llamada *obtenerbits()*, esta función *obtenerbits()* es de tipo *INT*, y retorna un *INT* (entero), esta función cuenta los bits de cada registro de escritura, y, solo si, encuentra bits con valores de '1' este los suma y retorna la suma, ver Figura 3.12.

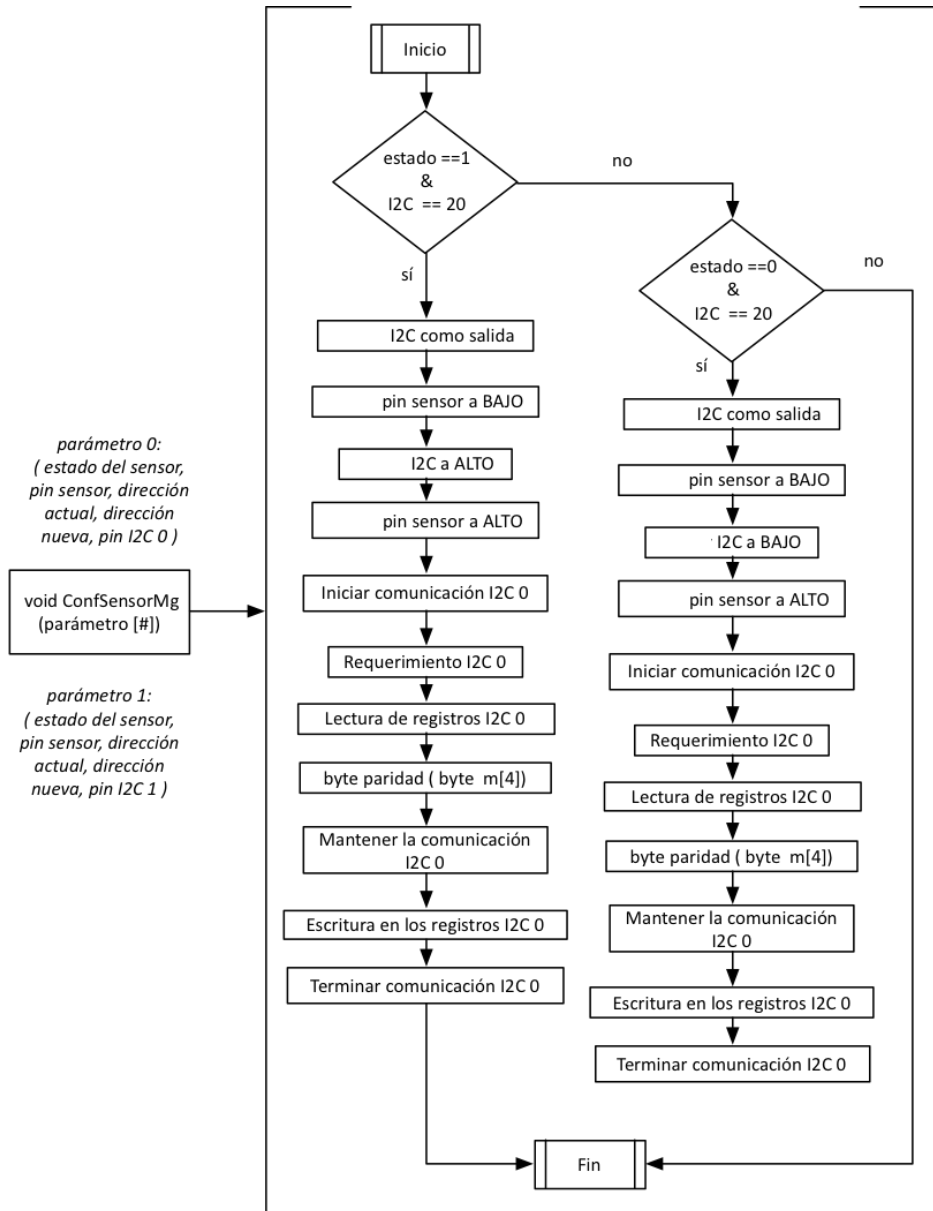


Figura 3.12: Diagrama de flujo general del void ConfSensorMg () y void ConfSensorMg1 ().

El procedimiento *void loop ()*, se ejecuta repetitivamente en el hardware, como un bucle repetitivo, en esta función se declaran variables locales de tipo *BYTE*, luego se verifica que la comunicación serial (uC - PC) se encuentre habilitado, si esta condición es verdadera se lee y se almacena la data, luego existe otra condición que verifica que la data leída sea igual a un número '170' (el PC inicia la comunicación enviando un número '170'), si esta condición es verdadera, se procede a leer los registros de los sensores y a construir la trama y finalmente a enviar la trama, ver Figura 3.13.

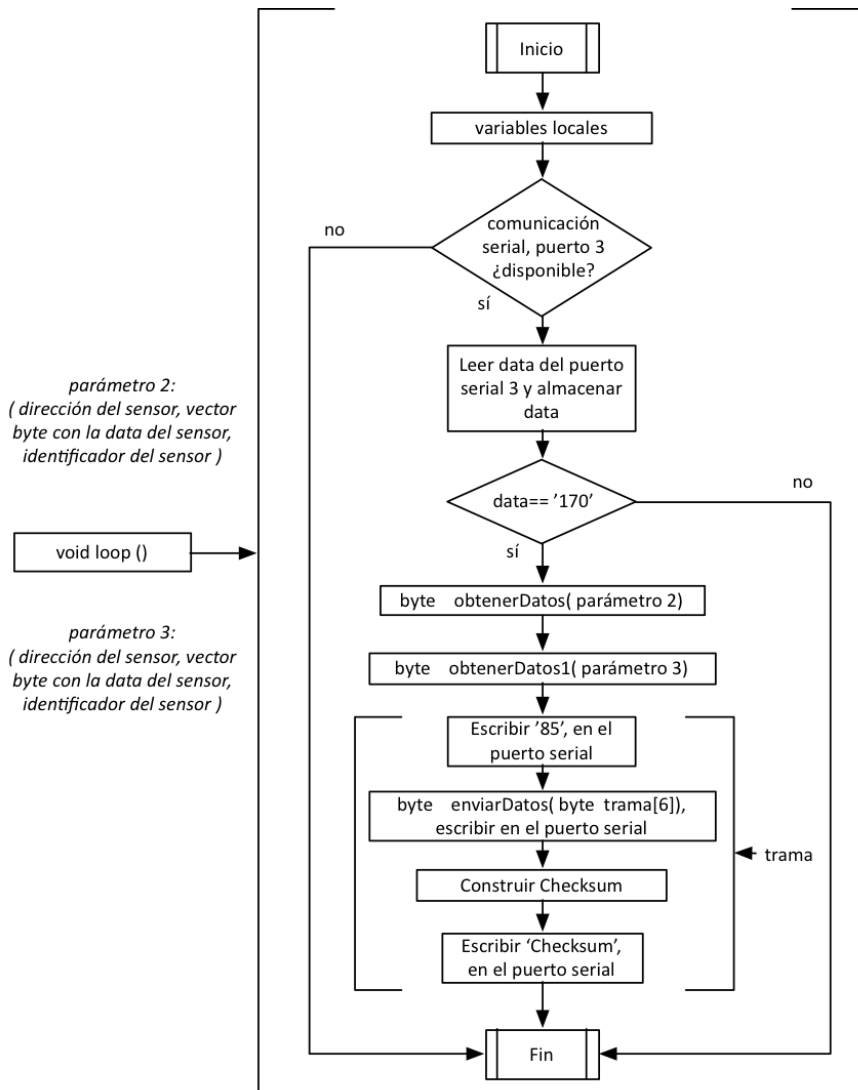


Figura 3.13: Diagrama de flujo general del void loop().

La función de obtenerDatos(), es una función tipo *BYTE* que requiere de parámetros, esta función lo que hace es leer los registros de lectura de cada sensor, pero de los 10 registros de lectura solo se leen los registros 0,1,2,4,5, ya que en estos registros se almacena la data de las 3 componentes X,Y,Z, una vez leídos todos los registros de interés, estos se los almacena y se los retornan. Para los primeros 8 sensores se utiliza la función *obtenerDatos()* y la para los 8 sensores restantes se utiliza la función *obtenerDatos1()*. Ambas son idénticas, solo cambiar en el uso de las funciones de la librería *wire.h*, cabe mencionar que para I2C 0 se utiliza la función *wire* y par I2C 1 se utiliza la función *wire1*. Y la función *enviarDatos()* lo que realiza es escribir cada dato adquirido por cada sensor, por cada sensor se escriben 6 bytes, para ellos se utiliza la función *Serial3.Write()* que escribe byte en el puerto serial 3 del uC, el puerto serial 3 es el utilizado para comunicación del uC con el PC.

3.2.5.2 Software del PC

De igual manera, en este apartado se representa mediante diagramas de flujo la descripción del software implementado en el computador (PC), enfocado a la recepción, procesamiento – tratamiento y visualización de la los sensores. A diferencia de la programación secuencial que se usa en la mayoría de códigos en los microcontroladores (uC), en el PC específicamente en el software MatLab se utiliza una programación orientada a objetos donde los objetos manipulan los datos de entrada para la obtención de datos de salida específicos, donde cada objeto ofrece una funcionalidad especial.

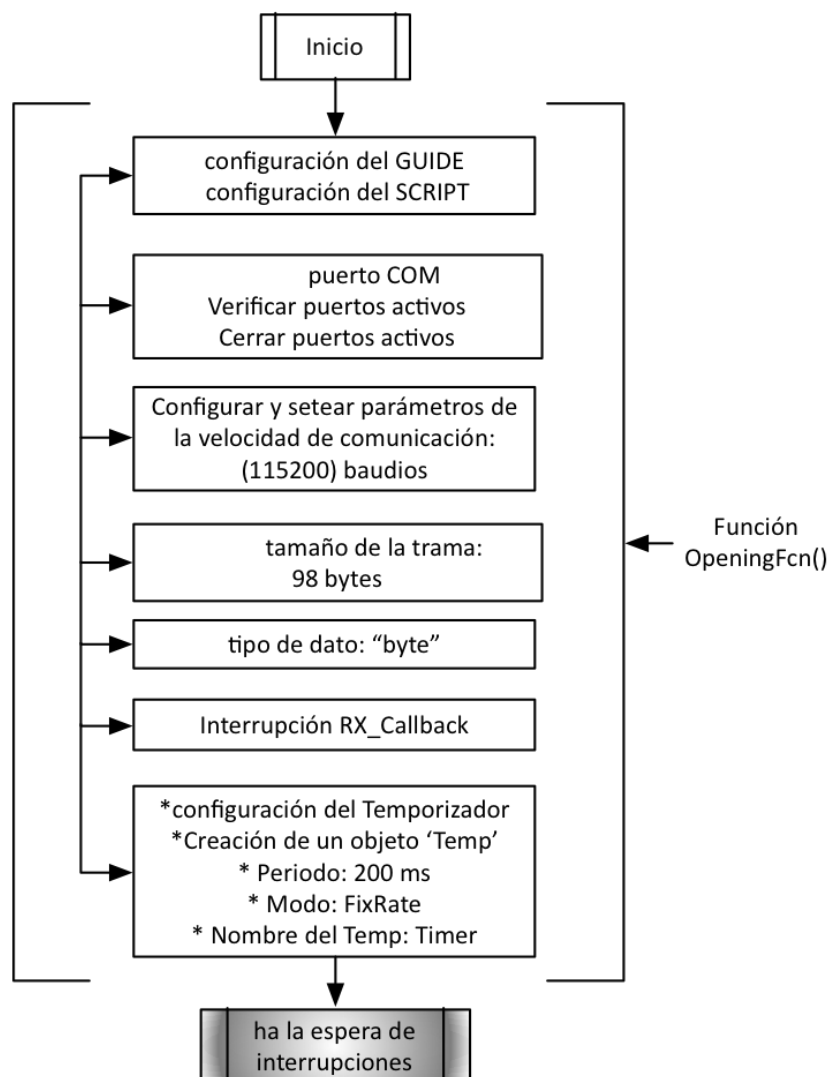


Figura 3.14: Diagrama de flujo general de la configuración del software en el PC(MatLab)

La configuración predeterminada del *Script* y del *Guide* (interfaz gráfica) se establece en MatLab al crear los objetos, a continuación se configura el puerto *COM* que se va a utilizar, determinando su velocidad (en este caso 115200 baudios), el tipo de datos que se va a recibir, la cantidad de valores y la creación de un objeto con un nombre asignado. En la configuración del temporizador se establece el tiempo de disparo, el modo de funcionamiento y el nombre asignado al objeto temporizador. Y finalmente se inserta la palabra *Inicio* al botón que habrá en la interfaz gráfica para indicar al usuario que al hacer clic empezará la adquisición de datos, una vez configurado, el programa espera a que se active la interrupción asignada al botón de *Inicio*. El programa espera a que el usuario haga clic sobre el botón de la interfaz gráfica para ejecutar la interrupción de Inicio/Paro, ver Figura 3.14.

En la interrupción de Inicio/Paro se comprueba cual es el valor del botón (Iniciar/Parar), lo que se traduce en sí, si el sistema esta parado y se desea empezar a adquirir datos o viceversa. Si es el caso en que se inicia la adquisición el programa inicia el temporizador para que se empiezan a disparar la interrupción asociada a él, también se cambia la etiqueta del botón de 'Inicio' a 'Paro'. Si es el caso contrario (se desea parar la adquisición), se para el temporizador, se plotean las gráficas en blanco y se cambia la etiqueta del botón de 'Paro' a 'Inicio'.

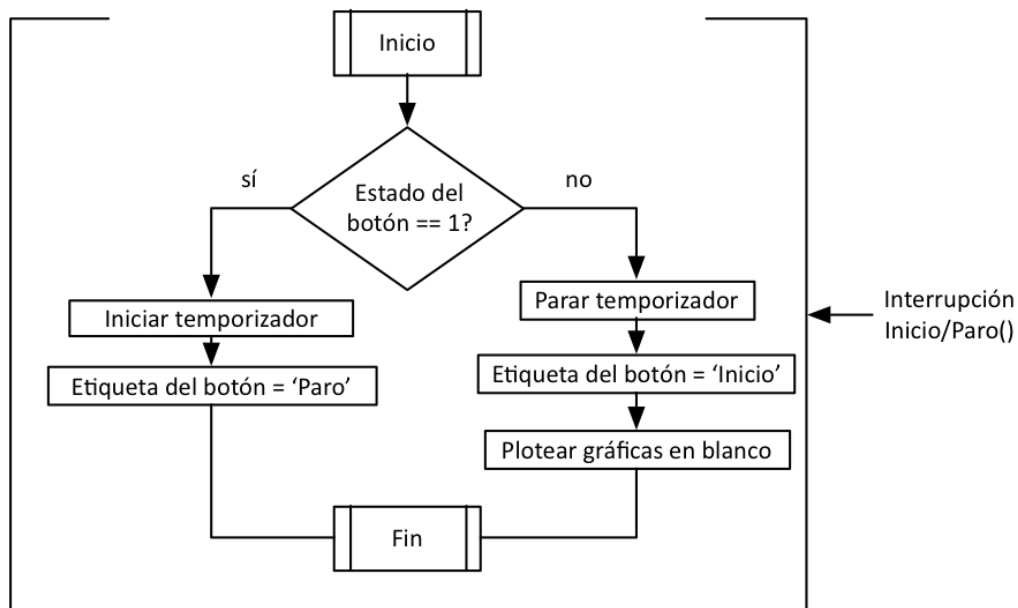


Figura 3.15: Diagrama de flujo de la interrupción del botón Inicio/Paro()

En la Figura 3.15 se detalla el proceso que sigue la interrupción. La siguiente interrupción es la del temporizador, esta interrupción se ejecuta cada 200 ms tal y como se ha especificado y configurado al inicio. El código que se ejecuta simplemente envía un carácter al uC para que este interprete que tiene que empezar a adquirir datos de los 16 sensores magnéticos y enviarlos a través del puerto UART al puerto USB del PC, este inicio de comunicación provocará una nueva interrupción en el buffer de recepción de datos, a continuación en la Figura 3.16 se detalla el proceso seguido.

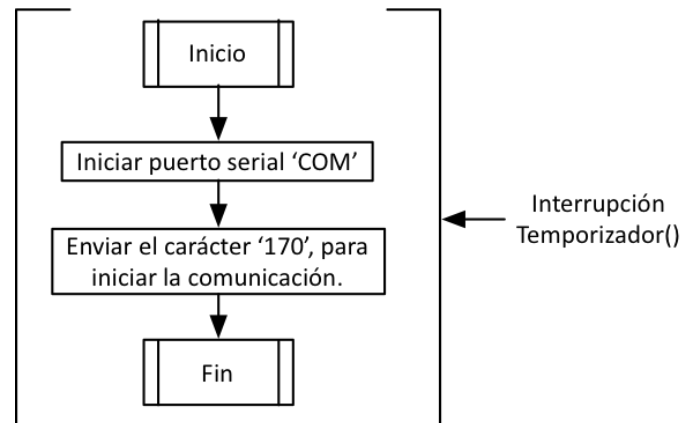


Figura 3.16: Diagrama de flujo de la interrupción del temporizador()

Seguidamente tenemos la interrupción de la recepción de datos, por lo tanto, cuando el buffer de recepción se llena con la cantidad de datos configurada al inicio se dispara la interrupción, en esta interrupción se ejecuta todo el cuerpo del programa, desde la reconstrucción de los datos hasta el plotado. Se recibe la trama y se comprueba que el primer valor y el último (Checksum) se correspondan con los que el microcontrolador (uC) ha enviado para determinar si ha habido errores en la comunicación.

Posteriormente se reconstruyen los valores de campo magnético en los tres ejes de los 16 sensores a partir de los registros recibidos, para ello se han creado tres funciones diferentes, una para cada eje (X,Y,Z). A continuación, se crea la matriz de puntos sobre los cuales se dibujarán los vectores de campo mediante la función *'meshgrid'* de MatLab. Con los valores de campo obtenidos y sabiendo la cantidad de puntos que se van a representarse se correlacionan los valores adquiridos con las diferentes posiciones para crear un mapa continuo. Para ello se utiliza la función *'gridData'* que proporciona MatLab, con esto se obtiene una matriz de puntos con sus respectivos valores de campo.

Para la representación o visualización se han optado por tres gráficas diferentes, y además se muestran los valores respectivos de campo magnético obtenidos en los 16 sensores para cada eje (X,Y,Z) en recuadros asemejando la posición de cada sensor. Para las gráficas, en la primera gráfica se tiene un mapeado en dos dimensiones ofrecido por la función *'quiver'* del MatLab, cada punto del mapa dispone de una flecha que representa la dirección del campo en el eje X y en el eje Y. Además esta misma flecha tiene una longitud proporcional a la intensidad del campo en ese punto. El segundo gráfico lo ofrece la función *'quiver3D'* de MatLab, que actúa igual que el anterior, pero se diferencia en que también se representa la componente Z del campo magnético. Para ello se determina un plano constante en el eje Z sobre el que se representan las flechas con las 3 componentes. El último gráfico lo ofrece la función *'mesh'* de MatLab, la cual crea una malla continua que se modifica dependiendo de los valores en el eje Z. Se crean picos o valles que marcan los puntos donde el campo es mayor, acompañados de un cambio de tonalidad en la malla. Todo este proceso se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo, ver Figura 3.17.

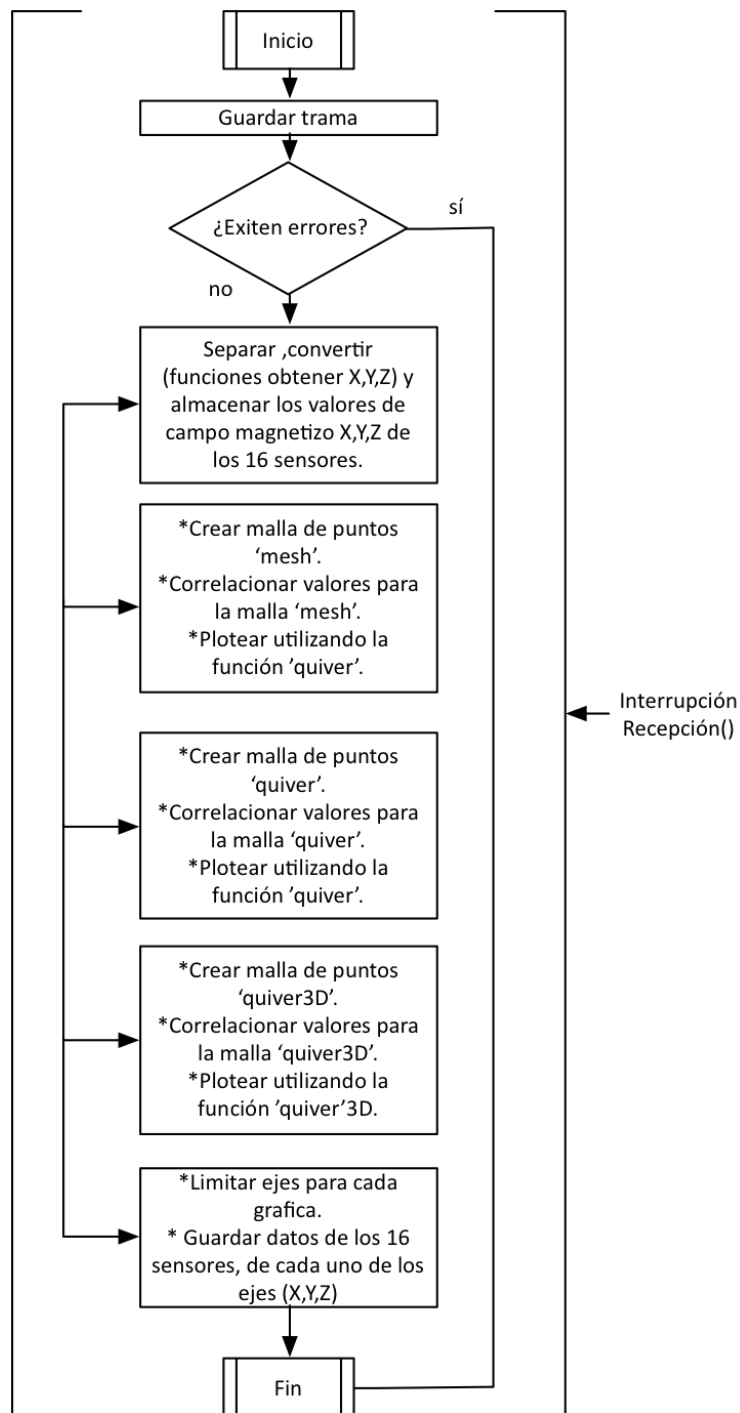


Figura 3.17: Diagrama de flujo de la interrupción de recepción ()

Finalmente se indexa los diagramas de flujo utilizados para realizar la conversión – obtención de los valores de cada uno de los 16 sensores para cada eje (X,Y,Z) y a su vez la contante que se necesita para poder convertir y expresar los valores de los sensores en militeslas (mT).

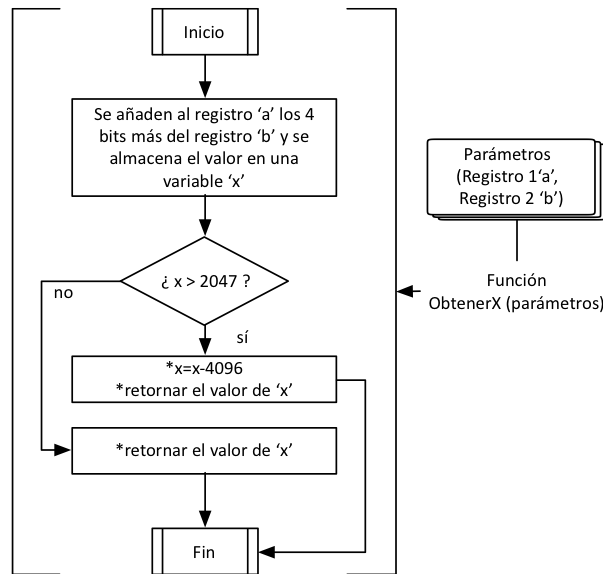


Figura 3.18: Diagrama de flujo de la función obtener X()

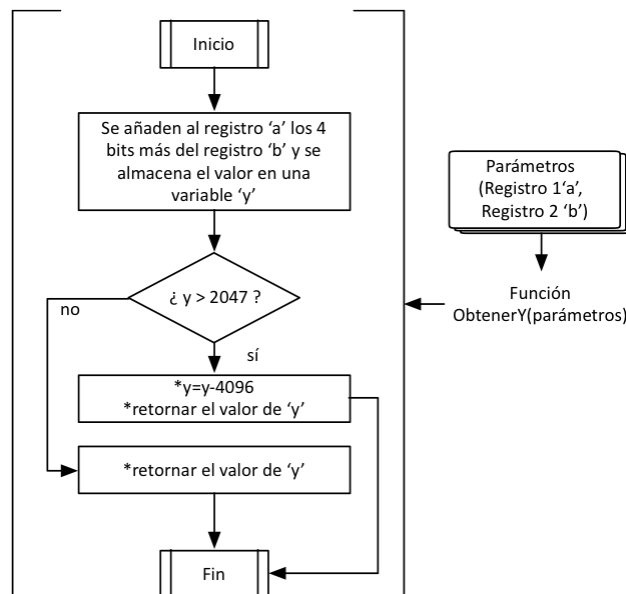


Figura 3.19: Diagrama de flujo de la función obtener Y()

Para convertir a militeslas (mT), se utiliza un valor de una constante de 0.098, esta constante se multiplica por cada valor obtenido de las componentes X,Y,Z para los 16 sensores, estos valores serán visualizados, en recuadros reflejando cada componente con su respectivo sensor, además, la *Guide* desarrollada incluye la función de exportar en .csv los valores de cada componente (X,Y,Z) de cada sensor. Finalmente la interrupción de salir, esta interrupción se ejecuta cuando el usuario cierra la interfaz gráfica, el programa finaliza el temporizador y cierra el puerto para que no se creen errores al volver a encenderlo.

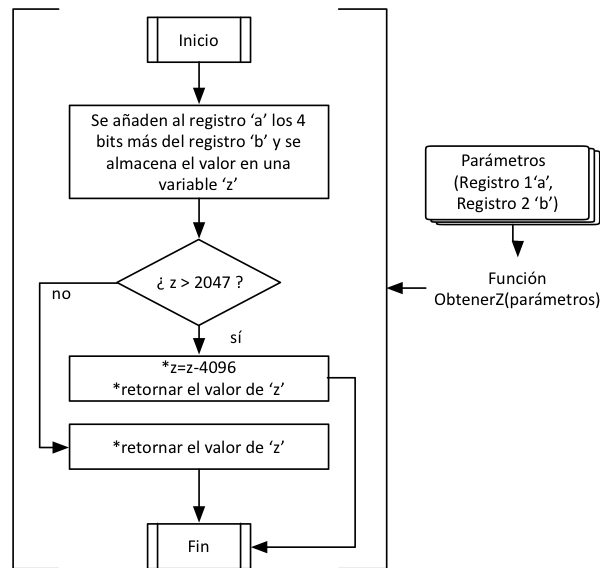


Figura 3.20: Diagrama de flujo de la función obtener Z()

3.3 Guiado 2D

3.3.1 Diagrama de Bloques

Una vez terminado el diseño y desarrollo e implementación de la parte de mapeo 2D, se procede con la parte del guiado 2D, a continuación se muestra un diagrama de bloques donde se presenta la metodología necesaria para el desarrollo del guiado 2D, ver Figura 3.21.

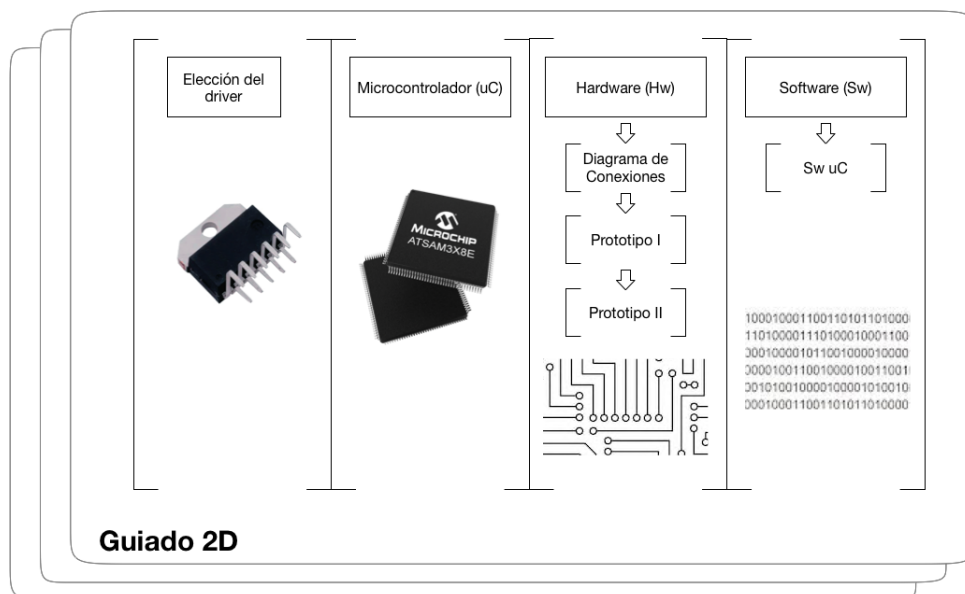


Figura 3.21: Diagrama de bloques del Guiado 2D

3.3.2 Elección del Driver

El driver que se ha utilizado para este trabajo final del máster es un amplificador operacional que proporciona una excelente precisión para detectar una señal de bajo nivel y presentar una salida de alto voltaje (V) o alta intensidad de corriente (I), la salida de intensidad de corriente que nos ofrece este driver es de 8A continuo y hasta 10A pico, el driver seleccionado es el OPA549T. El driver permite operar con una fuente de alimentación que puede ser en modo single o en modo dual dependiendo del diseño que se requiera, para este TFM, se utiliza el modo dual. Los rangos de operación de la fuente de alimentación van desde +8V hasta 60V para el modo single y para el modo dual van desde +- 4V hasta +- 30V, también el driver OPA549T integra protección contra condiciones de sobre temperatura y sobrecargas de intensidad de corriente. Algo importante de destacar en el driver, es que la corriente limite puede ser ajustada desde 0A hasta el máximo de 10A con un potenciómetro o un resistor o por un controlador digital DAC con una salida de voltaje o una salida de corriente [32].

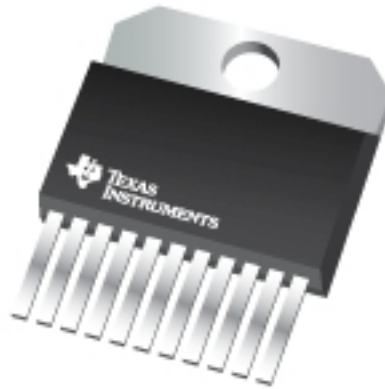


Figura 3.22: Driver seleccionado para el guiado 2D.

3.3.3 Microcontrolador

El microcontrolador (uC) es el mismo utilizado en la parte del mapeo 2D, el uC es el SAM3X8E ARM Cortex M3 de 32 bits, se mantiene el mismo uC porque presenta las salidas digitales PWM que se necesitan para el control y dirección de la corriente en las bobinas, se utilizan 4 salidas digitales PWM. Además se utilizan 2 entradas analógicas para la lectura de los ejes X,Y de Joystick que se utilizar para guiar o direccionar la intensidad de corriente a las bobinas, con la finalidad de poder guiar tanto en el eje X como en el eje Y a los microrobots.

3.3.4 Hardware

3.3.5 Diagrama de conexiones

A continuación se muestra un diagrama de conexiones muy simple de la estructura genérica del hardware de la parte del guiado 2D, en este diagrama se aprecian las etapas más relevantes que se necesitan para implementar prototipos hardware, ver figura 3.23.

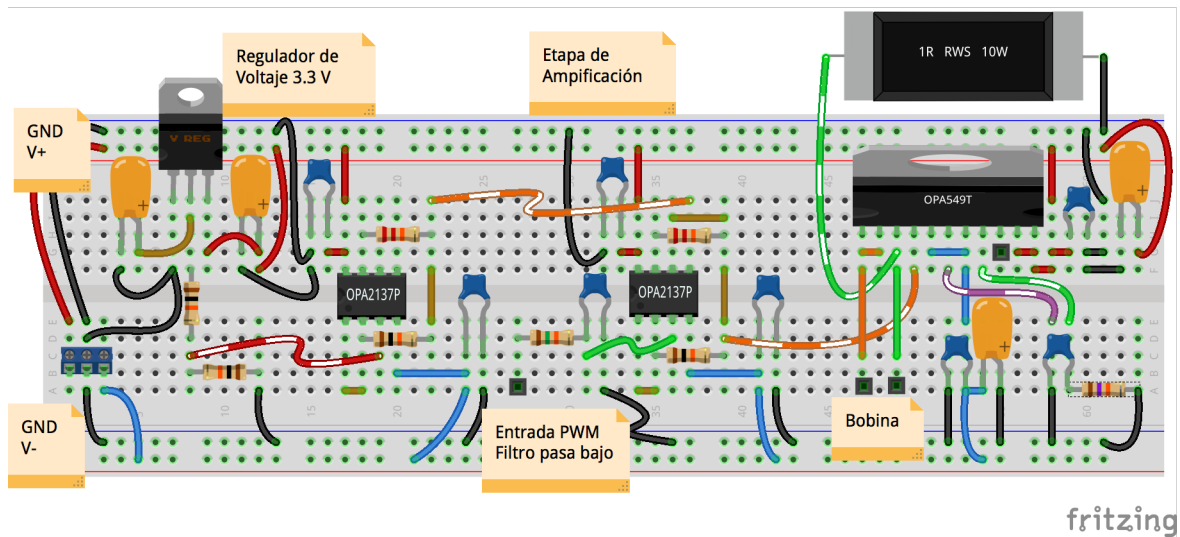


Figura 3.23: Diagrama de conexión genérico.

Mediante bloques se ha identificado la secuencia de conexión que sigue el desarrollo del hardware para el guiado 2D, observar figura 3.24.

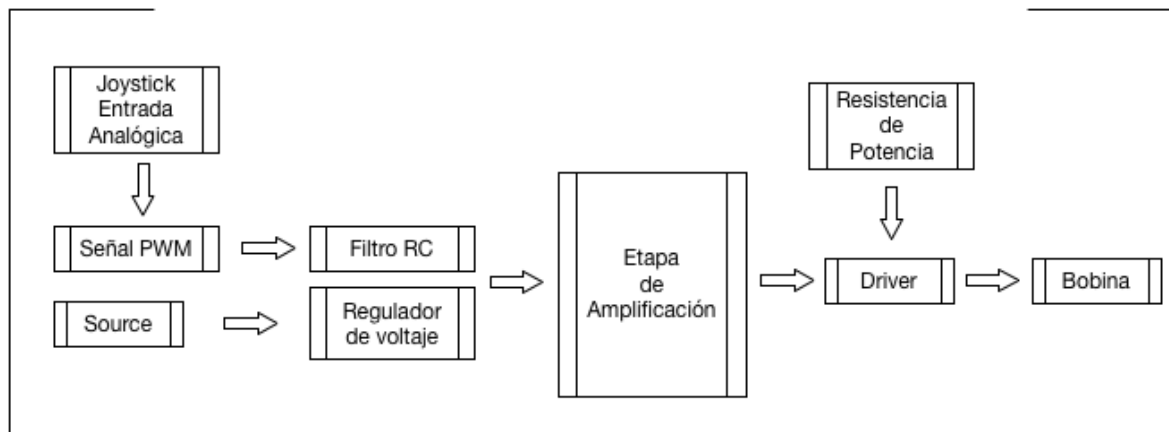


Figura 3.24: Diagrama de bloques del hardware para el guiado 2D.

3.3.5.1 Prototipo Hardware I

El primer prototipo se desarrolló para realizar la generación de campo magnético para una bobina, en este prototipo se añadió un potenciómetro para variar y controlar el voltaje suministrado al driver OPA549T que a su vez varía la corriente que atraviesa la bobina generando un campo magnético, además con el potenciómetro podemos controlar el sentido de la intensidad de corriente que fluye en la bobina. En las figuras siguientes observamos el prototipo hardware I ya implementado, ver figura 3.25.

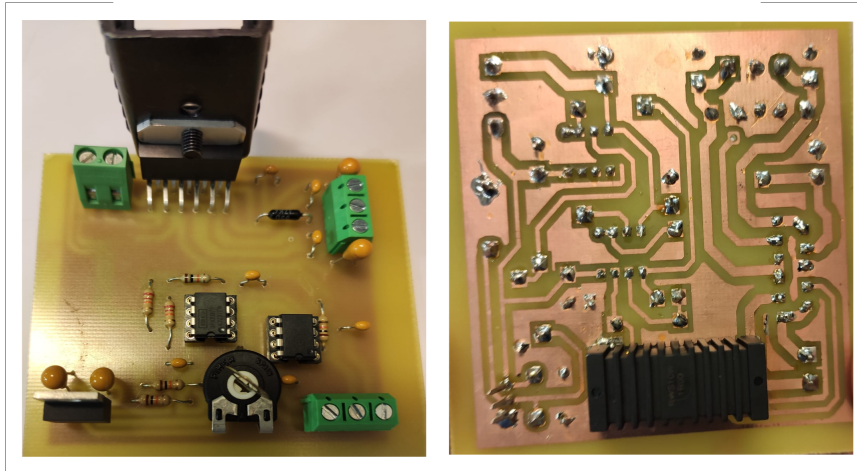


Figura 3.25: Prototipo hardware I, para el guiado 2D para una salida.

A continuación se muestra la figura 3.26, que representa la verificación del funcionamiento del prototipo hardware I, para ello se ha utilizado dos fuentes externas como fuente de alimentación conectadas en paralelo para obtener una mayor intensidad de corriente. Las líneas del circuito impreso (PCB) presenta las especificaciones adecuadas para soportar hasta 3.5A de intensidad de corriente, además se añade un disipador térmico de aluminio pintado de color negro con la finalidad de disipar mejor la temperatura del driver y absorber la temperatura ambiente, es decir enfriar más rápido el driver, la elección del material del disipador esta basado en el parámetro de difusividad térmica del material y el costo del mismo.

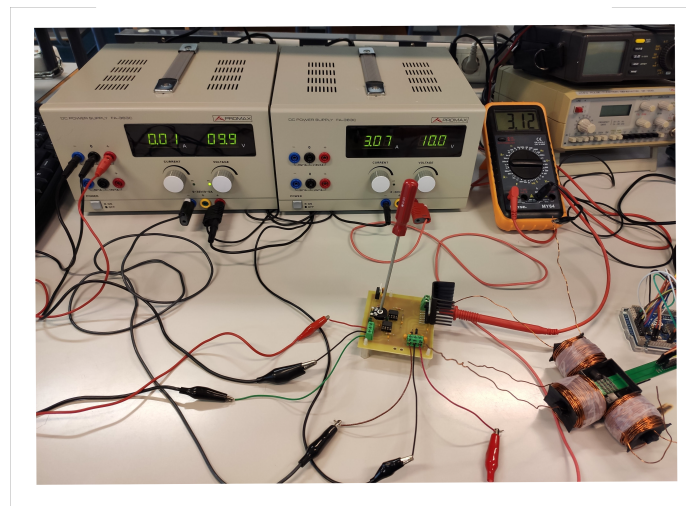


Figura 3.26: Verificación del funcionamiento del Prototipo hardware I.

3.3.5.2 Prototipo Hardware II

Una vez implementado y verificado el prototipo hardware I, se procede a implementar la misma estructura de diseño para las 3 bobinas restantes, lo que produce como resultado el prototipo hardware II. Este prototipo integra todo el diseño para las 4 bobinas, en una sola PCB, la PCB es de 2 capas, además se han distribuidos los componentes electrónicos con el fin de disipar el calor, cada Driver cuenta con su disipador térmico, ver Figura 3.27.

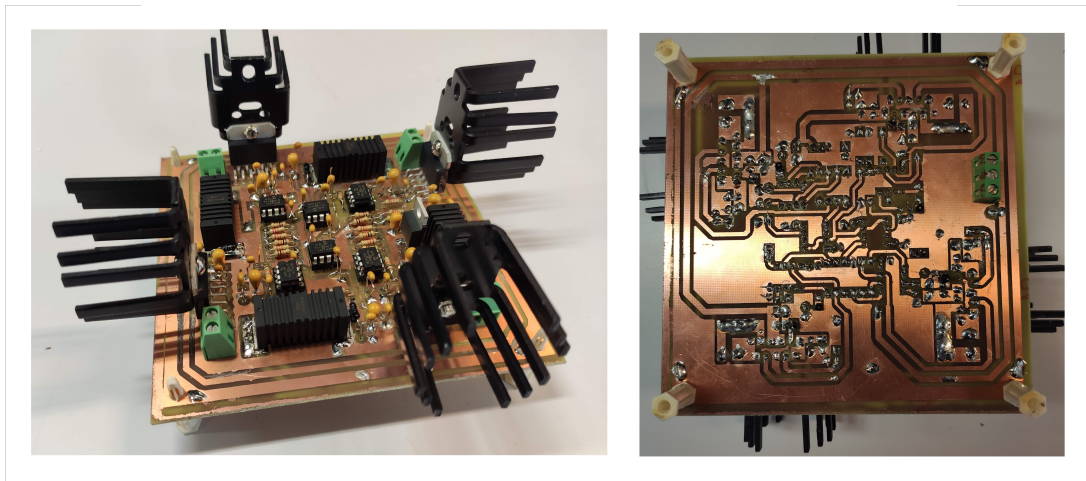


Figura 3.27: Prototipo hardware II para el guiado 2D.

3.3.6 Software

3.3.6.1 Software del uC

De la misma manera que se ha realizado un software para la parte de mapeo 2D se ha desarrollado uno para el guiado 2D, este software se ha implementado en un microcontrolador de 32 bits el SAM3X8E ARM Cortex M3. El software del guiado 2D esta encargado de leer valores analógicos del Joystick tanto para el eje X como para el eje Y para realizar esta lectura se hace uso de los pines analógicos del uC, por otro lado, se utiliza pines digitales con PWM para el control de la corriente que fluirá en cada bobina, en total se utiliza 4 pines digitales PWM y 2 pines analógicos. La finalidad del software de guiado 2D es guiar el o los microrobots. Para la programación se ha implementado una maquina de estados finitos de tipo Moore utilizando una condición switch case. El software realiza lecturas de las entradas analógicas utilizando una resolución de 12 bits de convertidor de analógico a digital (ADC), la implementación de una maquina de estados finitos de Moore, con 9 estados, el primer estado esta enfocado cuando el joystick se encuentra en una dirección central o estado neutro, en este estado todas las salidas de PWM escriben un ciclo de trabajo del 50%. De igual manera para los siguientes estados, en donde, dependiendo de la dirección fijada en el joystick se activan las salidas digitales PWM que controlan la intensidad de corriente que se inyecta en la o las bobinas que corresponden a la dirección fijada. Los estados son: estado 0(neutro), estado 1(norte), estado 2(sur), estado 3(este), estado 4(oeste), estado 5(noreste), estado 6(noroeste), estado 7(sureste) y estado 8(suroeste).

3.4 Piezas 3D

3.4.1 Mapeo 2D

Para el mapeo 2D se ha diseñado la siguiente pieza (ver Figura 3.28), en donde se observa que integran 3 bobinas con su respectivo núcleo y con la placa de desarrollo hardware de sensores con el fin de caracterizar la superficie de trabajo.

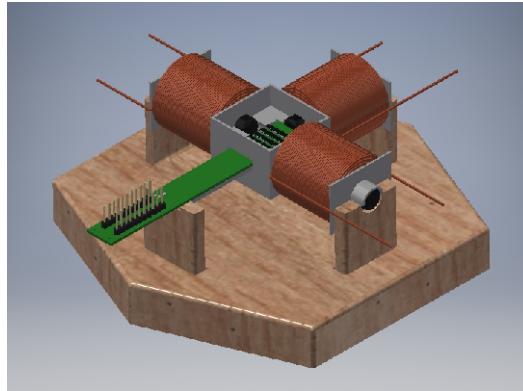


Figura 3.28: Piezas 3D de la parte del mapeo 2D.

3.4.2 Guiado 2D

Para el guiado 2D, se separa la placa que contiene los sensores y solo se tienen una pieza 3D que integra las 4 bobinas y un espacio de trabajo mínimo donde se realizará el guiado de microrobots con campos magnéticos. De igual manera, se muestra la siguiente Figura 3.29 que representa la forma de la pieza del guiado 2D.

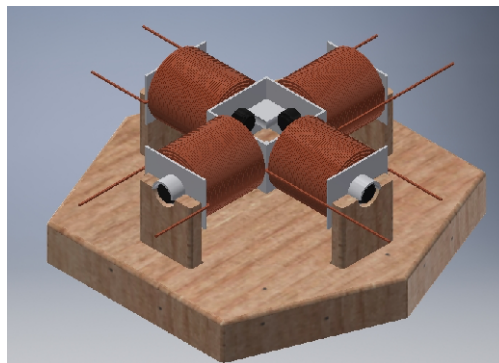


Figura 3.29: Piezas 3D de la parte del guiado 2D.

Ambos diseños que se muestran en las figuras anteriores, son piezas 3D y se han creado para poder anclar tanto la placa de desarrollo hardware de los sensores, como las bobinas a un microscopio donde se aplicará el sistema desarrollado en este trabajo de fin de máster, además las dimensiones de estas piezas estas enfocadas al espacio mínimo requerido en el microscopio. La implementación de este prototipo ha sido posible a la impresión 3D. El resultado es el siguiente de las figuras impresas (ver Figura 3.30 y Figura 3.31).

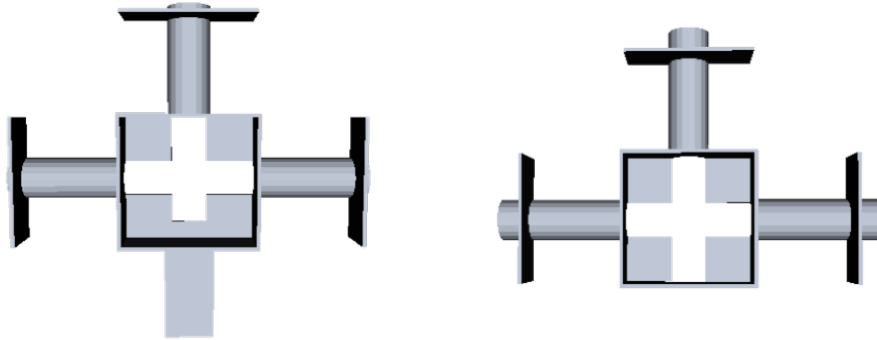


Figura 3.30: Piezas 3D de medida, diseño (Parte superior e inferior).
línea

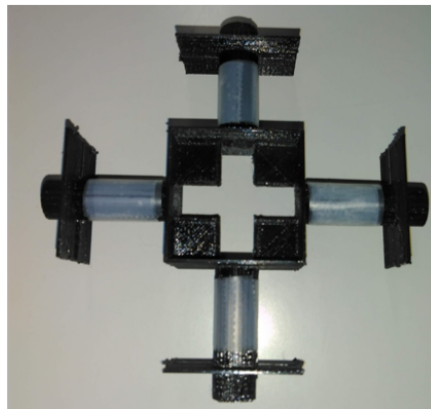


Figura 3.31: Piezas 3D de medida, diseño e implementación.

4 Resultados y discusión

4.1 Resultados y Discusión del Mapeo 2D

Una vez desarrollada la parte de hardware (que contemplan los prototipos I y II) y la parte del software, se ha realizado pruebas y test, cabe recordar que en la parte del mapeo 2D se utiliza una matriz de 16 sensores, así como la interfaz gráfica desarrollada en la plataforma software MatLab. En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se representan la parte hardware, software y la comunicación. En el mapeo 2D se han realizado pruebas utilizando el prototipo hardware II. Para realizar pruebas al funcionamiento del mapeo 2D se procede a realizar las siguientes configuraciones, cabe mencionar que cada bobina tiene una longitud de 30.5 metros de cable de cobre y un diámetro de 0.8mm.

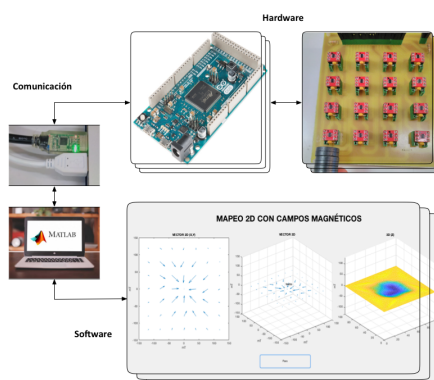


Figura 4.1: Prototipo I en funcionamiento, software y hardware.

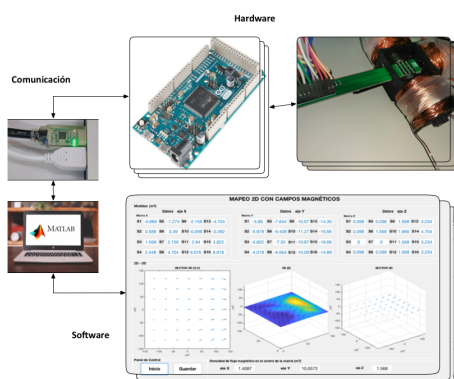


Figura 4.2: Prototipo II en funcionamiento, software y hardware.

En la Figura 4.3, se muestra toda la parte del mapeo 2D en funcionamiento (respectivas pruebas), de igual manera se propusieron 3 configuraciones (ver Figura 4.4) para realizar las pruebas de la parte de mapeo 2D, la primera esta enfocada en una configuración con una sola bobina y un solo núcleo, con el fin de poder observar el campo magnético que podemos generar en una sola dirección. La segunda configuración hace énfasis a dos bobinas con sus respectivos núcleos, pero ubicadas perpendicularmente entre estas y por ultimo la tercera configuración propuesta hace igual uso de 2 bobinas con dos núcleos pero esta vez en línea, para poder observar el campo magnético máximo que se genera en una sola dirección.

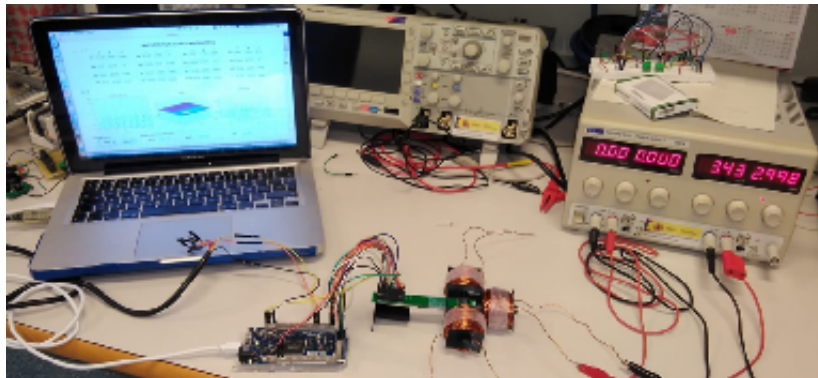


Figura 4.3: Pruebas de laboratorio de la parte de mapeo 2D.



Figura 4.4: Configuraciones propuestas del sistema desarrollado.

4.1.1 Configuración con un único núcleo

4.1.1.1 Mediciones del Eje Y

En esta configuración solo se hace uso de una bobina con único núcleo (eje Y) con una distancia del núcleo a los sensores de 6 mm. Las pruebas se han realizado aplicando corrientes desde 0.5A hasta 3A, con un paso de 500mA, los resultados y gráficas se muestran a continuación. En la Figura 4.5 se muestra el sistema de mapeo 2D con una intensidad de corriente de 0A, lo que significa que los valores de densidad de flujo magnético son próximos a cero.

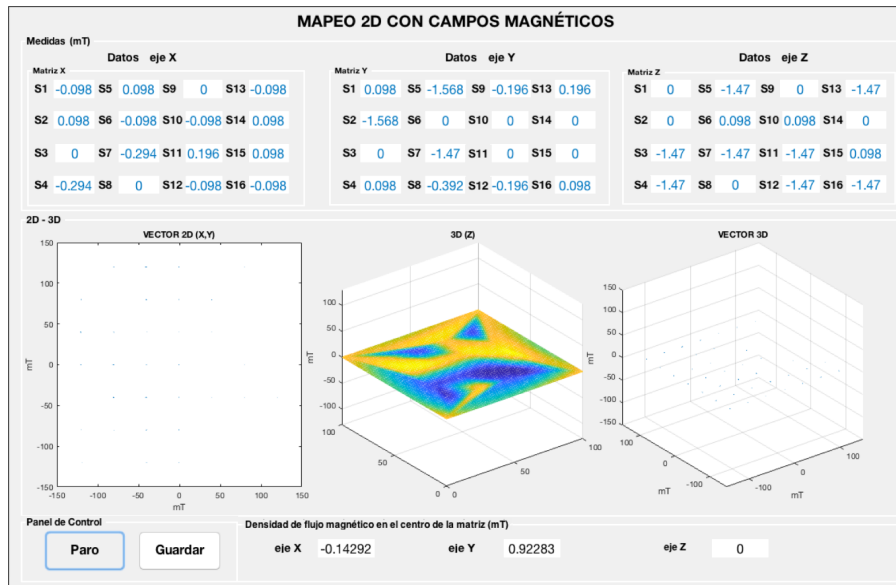


Figura 4.5: Configuración con único núcleo, $I=0A$.

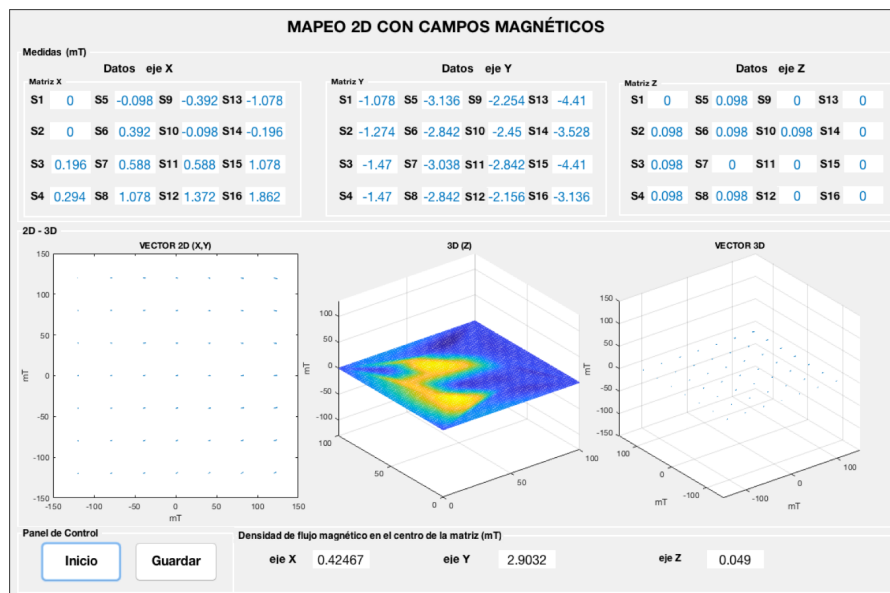


Figura 4.6: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=0.5A$.

En la Figura 4.6 se observa los resultados para una intensidad de corriente (I) de $0.5A$ con una configuración de un único núcleo, en el centro del espacio de trabajo alrededor de $2.90mT$ (eje Y), por otro lado los valores de los ejes X,Z son muy aproximados a un valor de cero. Para la Figura 4.7 se tiene una densidad de flujo magnético en el centro de la matriz de $4.62mT$ mayor, correspondiente al tener una $I=1.0A$ que fluye en una bobina del eje Y. La Figura 4.8 y 4.9, muestran la densidad de flujo magnético en el eje Y para una $I=1.5A$ y para otra $I=2.0A$, obteniendo como resultado valores de $6.85mT$ y $8.57mT$ respectivamente para cada (I) aplicada,

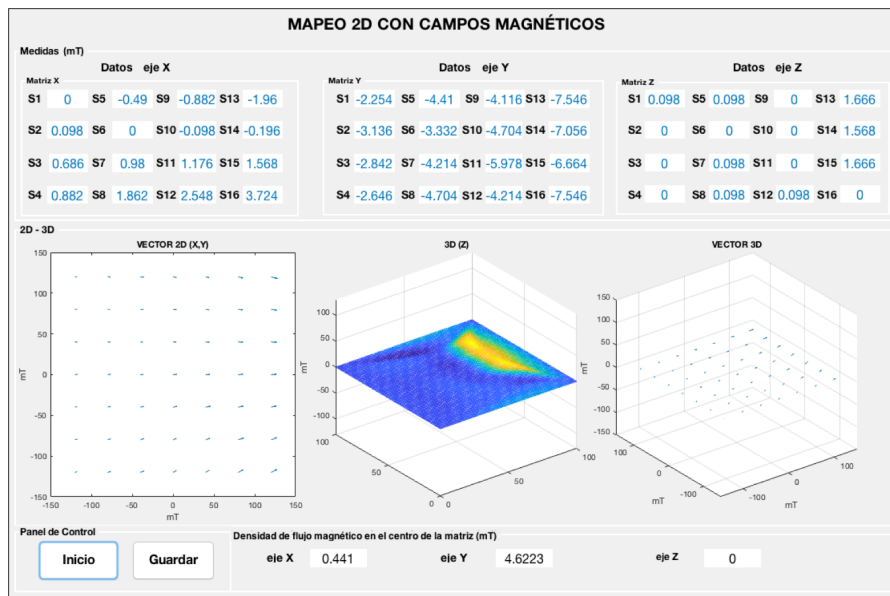


Figura 4.7: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=1.0A$.

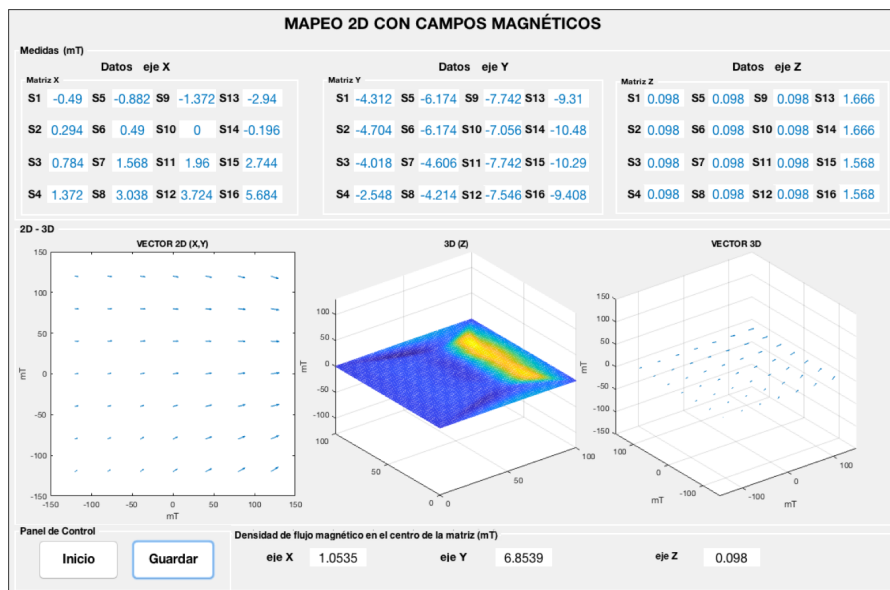


Figura 4.8: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=1.5A$.

estos valores obtenidos están ubicados en el centro del espacio de trabajo (Workspace center), cabe mencionar que los valores de la matriz en el eje X reaccionan al campo magnético generado al eje Y, estos valores de mT que rondan entre 1.0mT o 1.1mT. Finalmente, en la Figura 4.10 y Figura 4.11 se presentan los resultados de densidad de flujo magnético para una $I=2.5A$ que alcanza en el centro del espacio de trabajo alrededor de 9.14mT (eje Y), y para una $I=3.0A$ aplicada aproximadamente 10.05mT. En estas figuras los valores correspondientes a los ejes X,Z presentan valores no superiores a 1.6mT aproximadamente, el campo magnético aplicado influye

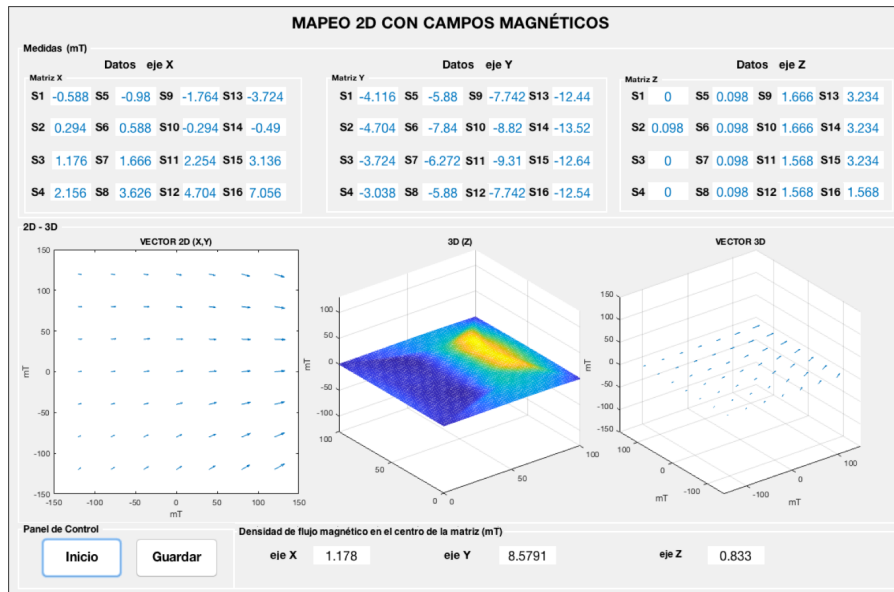


Figura 4.9: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=2.0A$.

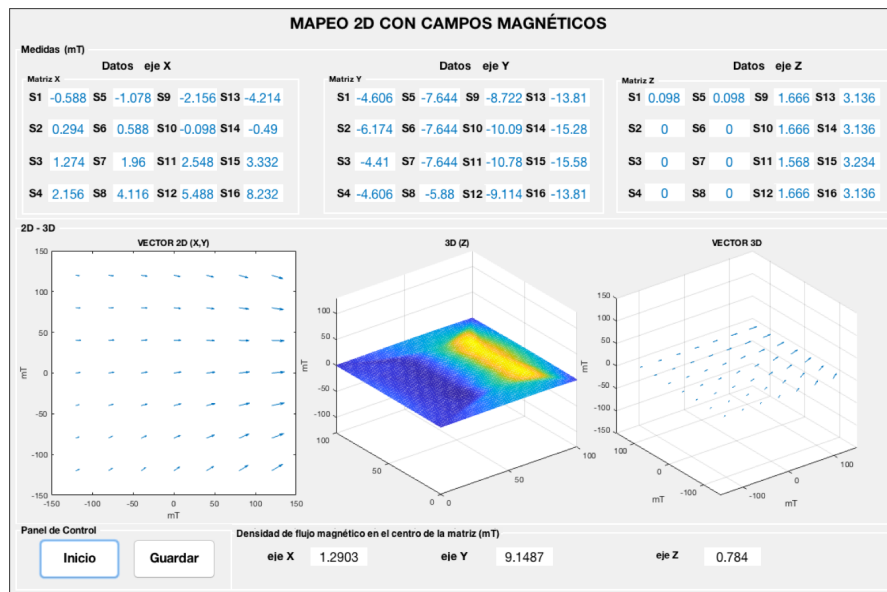


Figura 4.10: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=2.5A$.

en los otros ejes. La interfaz que se muestran en las figuras, están compuestas por los valores de los ejes X,Y,Z para los 16 sensores separados por ejes, estos valores se encuentran en magnitudes de militeslas, si recordamos al inicio el sensor puede medir valores entre $+ - 150mT$. Esta interfaz contiene recuadros donde se representan las magnitudes vectoriales de los ejes. El recuadro de la izquierda de la interfaz integra vectores de los ejes X-Y con sus correspondientes magnitudes, de igual manera la interfaz contiene un recuadro para visualizar los valores solo de los ejes Z y otro recuadro que muestra los valores vectoriales de los 3 ejes (X,Y,Z).

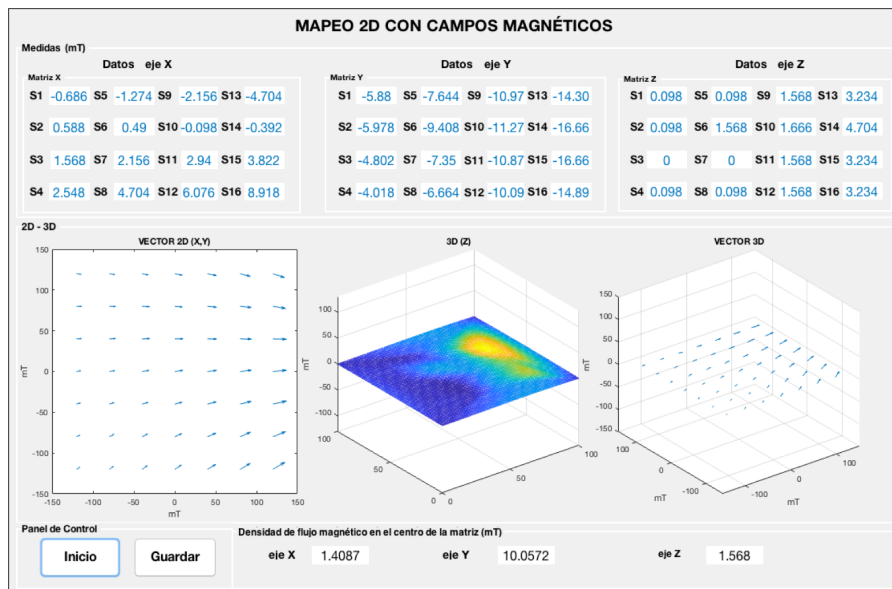


Figura 4.11: Configuración con único núcleo(eje Y), $I=3.0A$.

4.1.1.2 Mediciones del Eje X

En esta configuración solo se hace uso de una bobina con único núcleo (eje X) con una distancia del núcleo a los sensores de 1 mm, los resultados son muy diferentes a los obtenidos del eje Y con una distancia de 6 mm entre núcleo y sensores. Seguidamente se muestran en figuras los resultados de las pruebas realizadas inyectando una intensidad de corriente (I) de 0.5 A hasta 3A, variando cada 500mA.

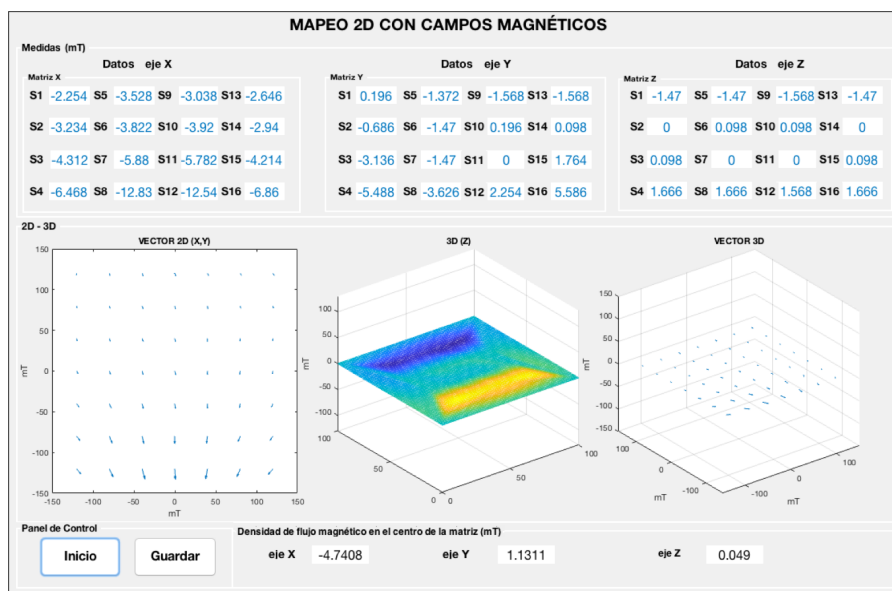


Figura 4.12: Configuración con único núcleo (eje X) , $I=0.5A$.

En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se muestran la densidad de flujo magnético en el eje X para una $I=0.5A$ y para otra $I=1.0A$, obteniendo como resultado valores de $-4.74mT$ y $-9.58mT$ respectivamente para cada (I) aplicada, estos valores obtenidos están ubicados en el centro del espacio de trabajo, cabe mencionar que los valores de la matriz en el eje Y reaccionan al campo magnético generado al eje X, estos valores en el centro de la matriz de mT que rondan entre $0.70mT$ a $1.1mT$.

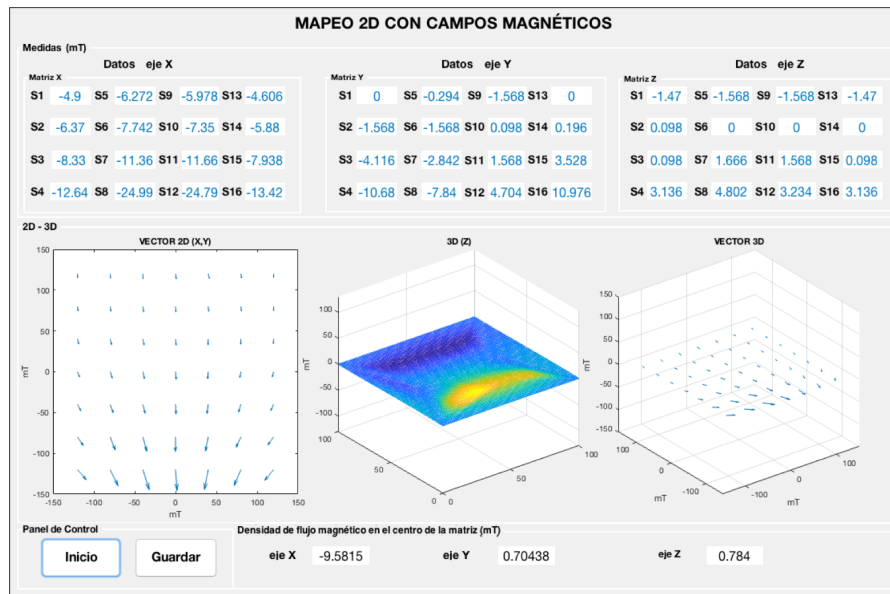


Figura 4.13: Configuración con único núcleo(eje X) , $I=1.0A$.

Al tener el núcleo de ferrita más cerca de la matriz de 4×4 de sensores, se observa en las Figuras 4.12 y 4.13, que la densidad de flujo magnético es superior a las observadas en las del eje Y al aplicar las mismas intensidades de corriente, la distancia del núcleo afecta directamente a las lecturas de la matriz de sensores. De igual manera la densidad de flujo magnético en el centro del espacio de trabajo es el doble con respecto a las mostradas en el eje Y.

Se observa que la densidad de flujo magnético en el centro del espacio de trabajo no sobrepasa los $1.2mT$ aproximadamente, pero si observamos los valores de los sensores que se encuentran más expuestos directamente al campo magnético aplicado, se observa que los valores en los eje Y y eje Z, presentan valores máximos de $-10mT$ y $4.8mT$ respectivamente.

En la Figura 4.14 se observa los resultados para una intensidad de corriente (I) de $1.5A$, en el centro del espacio de trabajo alrededor de $-13.47mT$ (eje X), por otro lado los valores de los ejes X,Z en el centro son muy aproximados a un valor de cero. Para la Figura 4.15 se tiene una densidad de flujo magnético en el centro de la matriz de $-16.04mT$, correspondiente al tener una $I=2.0A$ que fluye en una bobina del eje X.

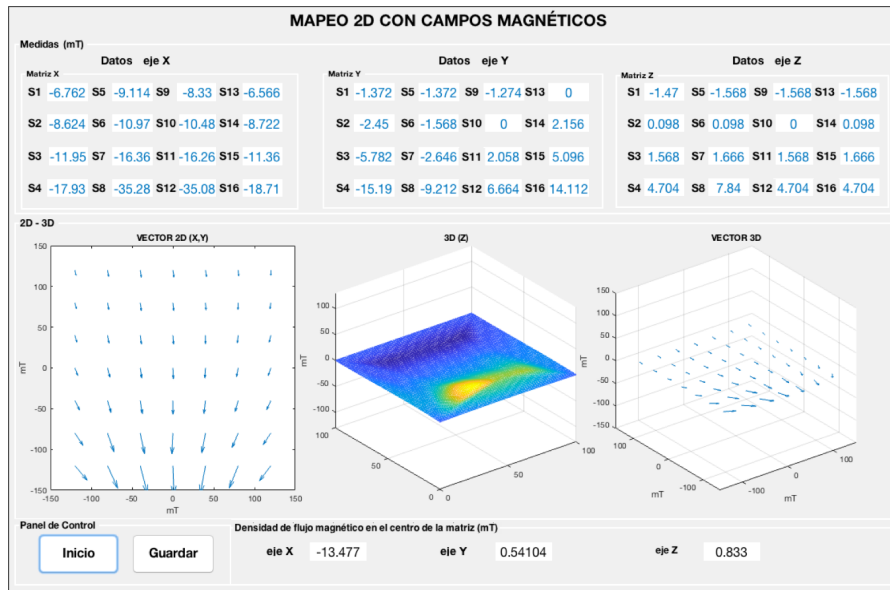


Figura 4.14: Configuración con único núcleo(eje X) , $I=1.5A$.

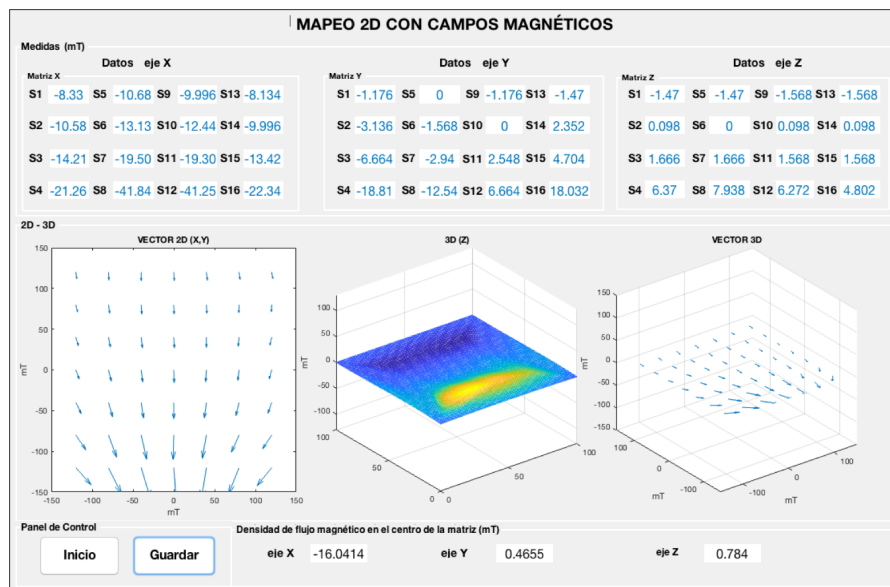


Figura 4.15: Configuración con único núcleo(eje X) , $I=2.0A$.

Por ultimo la Figura 4.16 y Figura 4.17 se presentan los resultados de densidad de flujo magnético para una $I=2.5A$ que alcanza en el centro del espacio de trabajo alrededor de $-17.89mT$ (eje X), y para una $I=3.0A$ aplicada aproximadamente $-19.18mT$. Además se observa en estas figuras que los valores correspondientes a los ejes X,Z presentan valores no superiores a $1.7mT$ aproximadamente, el campo magnético aplicado influye en los otros ejes.

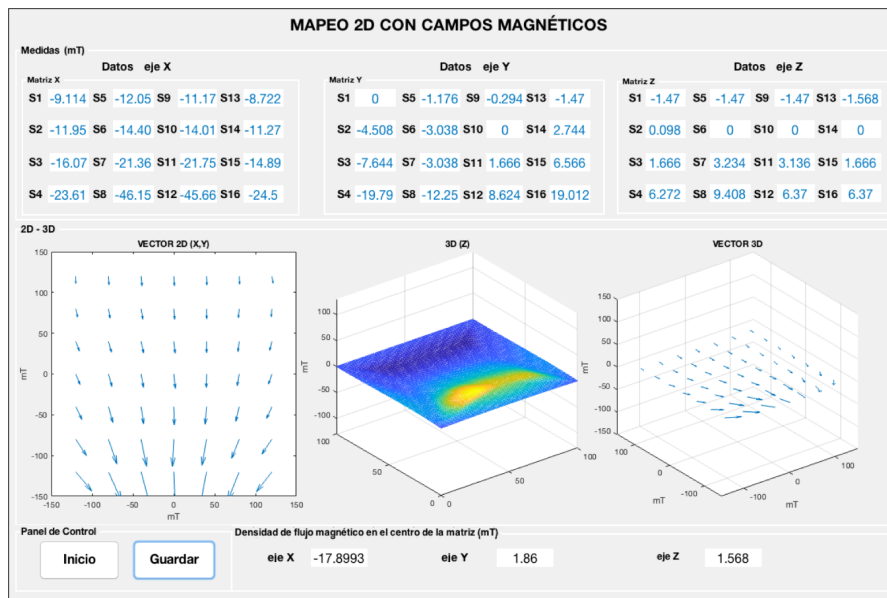


Figura 4.16: Configuración con único núcleo(eje X) , $I=2.5A$.

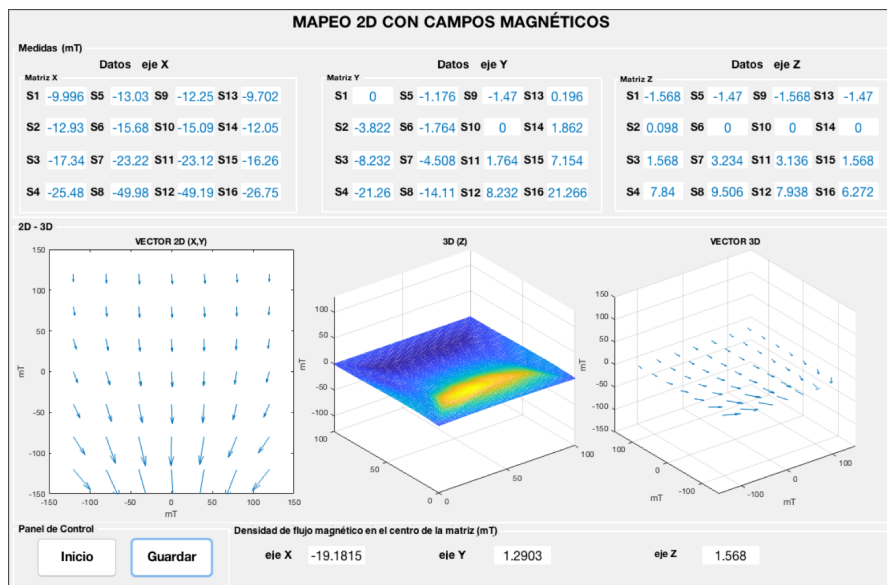


Figura 4.17: Configuración con único núcleo(eje X) , $I=3A$.

4.1.2 Configuración con dos núcleos en perpendicular

Así mismo, en esta configuración se hace uso de 2 bobinas con 2 núcleos pero esta vez perpendicular, las pruebas están realizadas en los ejes X, Y. Como se ha explicado al inicio, el objetivo principal de este proyecto es caracterizar una superficie para el guiado de microrobots con campos magnéticos. La pruebas se realizaron aplicado corriente desde 0.5A hasta 3A, con un paso de 500mA, los resultados y gráficas se muestran a continuación.

En la Figura 4.18 y Figura 4.19, se ha representado los resultados al aplicar una $I= 0.5A$ con la configuración de 2 núcleos perpendiculares, se ha alcanzado en el centro del espacio de trabajo (Workspace center) alrededor de $-2.32mT$ (eje X) y $3.05mT$ (eje Y), y para una $I=1.0A$ aproximadamente $-4.53mT$ (eje X) y 4.08 (eje Y), el eje Z varia desde $0mT$ hasta $0.83mT$ aproximadamente, respectivamente para cada intensidad de corriente (I).

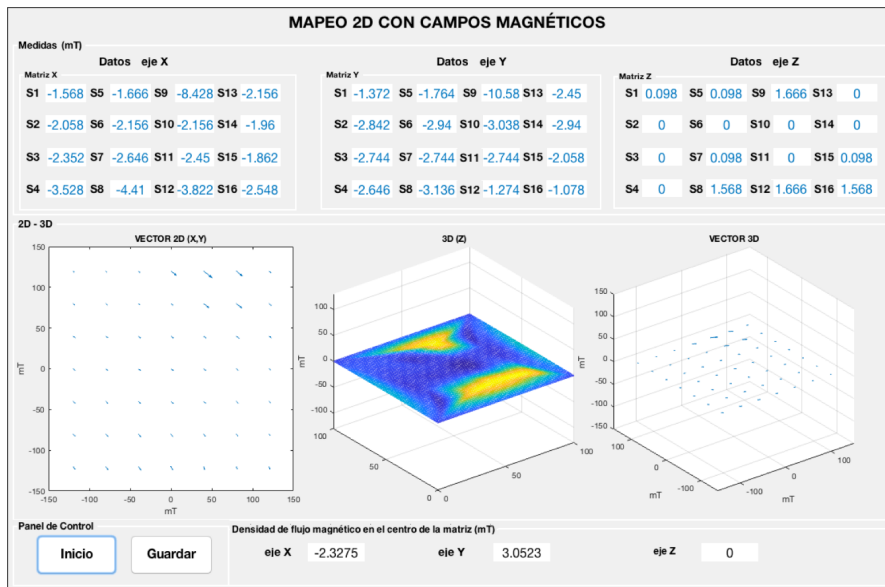


Figura 4.18: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=0.5A$.

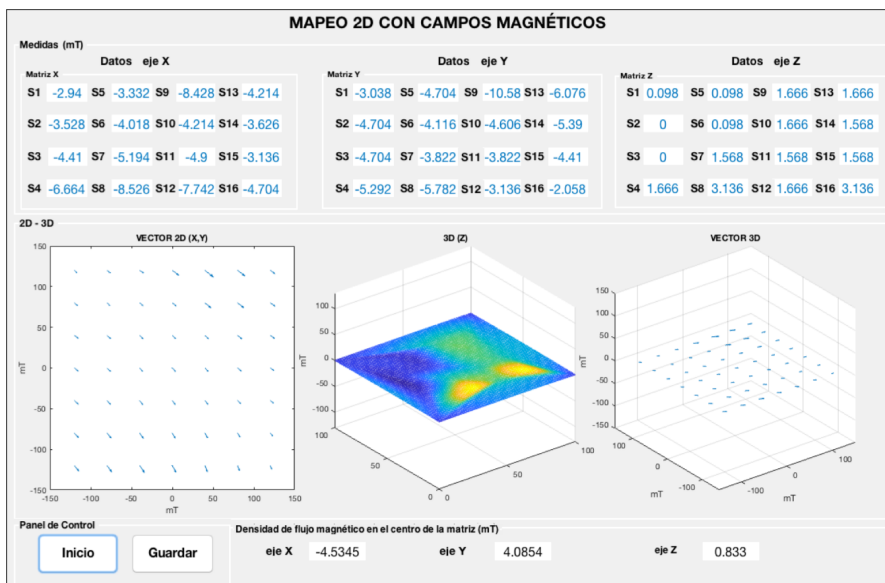


Figura 4.19: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=1.0A$.

Hay que tener en cuenta que los resultados que se han obtenido para todas las figuras que se exponen en este sub apartado, depende de la distancia de los núcleos a la matriz de sensores (para los ejes X, Y), en este caso ambos núcleos están a una distancia de 0.4 mm de la matriz de sensores. Otra cosa importante que recalcar es que el núcleo utilizado en la bobina del eje X difiere en longitud con el núcleo utilizado en la bobina del eje Y, siendo el del eje X un poco más largo con respecto al del eje Y son los únicos núcleos con los que se contaba en el laboratorio. Al aplicar esta configuración perpendicular entre los ejes X,Y se pretende esperar un resultado de densidad de flujo magnético elevado en los sensores más expuestos al campo magnético aplicado.

Si analizamos los datos obtenidos en los ejes X, Y de la matriz 4x4 de sensores magnéticos, y nos centramos en los datos de los sensores S4,S8,12,S16 (ver Figura 4.18 y 4.19) se observa que los datos de densidad de flujo magnético del eje X son superiores a los del eje Y, de igual forma si analizamos los datos de los sensores S13,S14,S15,S16 (ver Figura 4.18 y 4.19), se observa que los datos de estos sensores en el eje Y también son superiores a los del eje Y. Los datos en el eje Z obtenidos por la matriz de sensores se mantienen muy cercanos a cero.

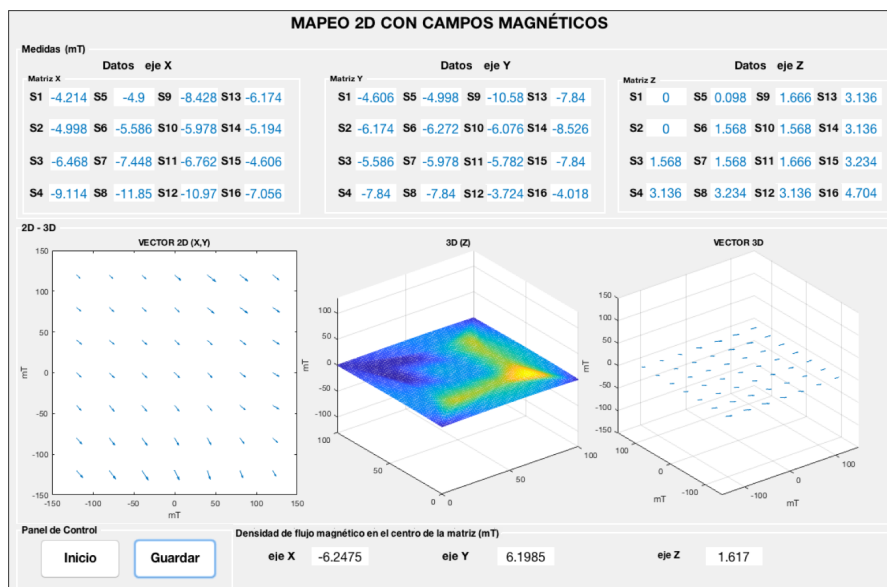


Figura 4.20: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=1.5A$.

La Figura 4.20 y Figura 4.21, muestran las pruebas para una intensidad de corriente (I)=1.5A y con la configuración de 2 núcleos perpendiculares en donde se ha alcanzado en el centro del espacio de trabajo alrededor de -6.24mT (eje X) y 6.19(eje Y), y para una intensidad de corriente (I)=2.0A aproximadamente -7.86mT (eje X) y 7.70(eje Y), en el eje Z se muestra los valores de 1.65mT y 2.45mT respectivamente para cada intensidad de corriente (I) aplicada. Cabe mencionar que a medida que se aumenta la intensidad de corriente (I) la densidad de flujo magnético aumenta, pero este aumento de densidad de flujo magnético es más notable en intensidades de corrientes mayores a 2A, en menores a 2A es poco perceptible.

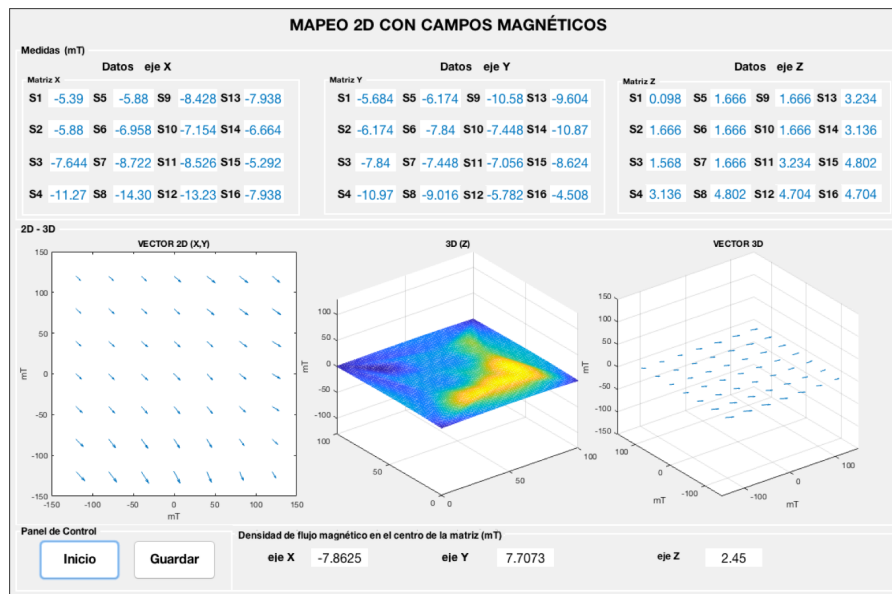


Figura 4.21: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=2.0A$.

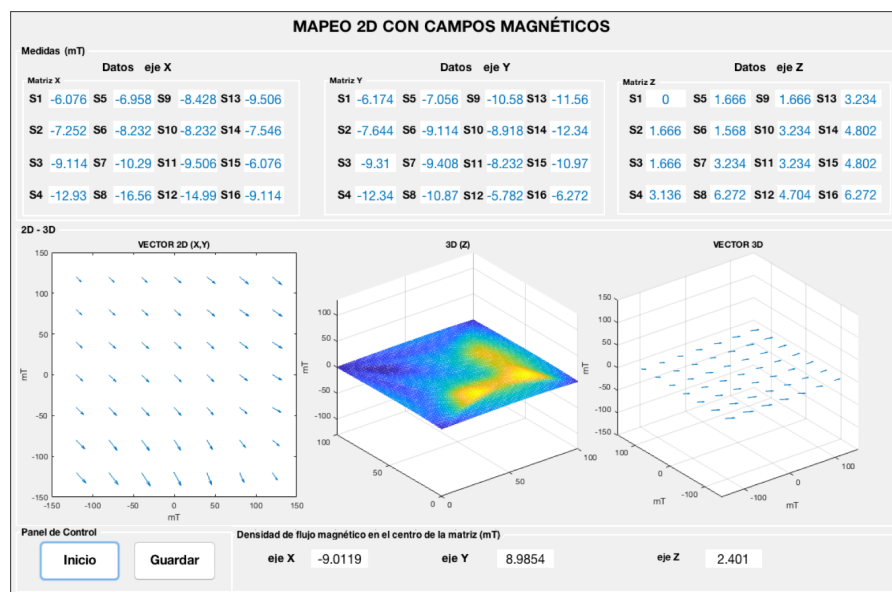


Figura 4.22: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=2.5A$.

Por ultimo en la Figura 4.22 y Figura 4.23, se ha realizado pruebas para una intensidad de corriente (I)= $2.5A$ y con la configuración de 2 núcleos perpendiculares alcanzando en el centro del espacio de trabajo (Workspace center) alrededor de $-9.01mT$ (eje X) y 8.98 (eje Y), y para una Intensidad de corriente (I)= $3.0A$ aproximadamente $-10.00mT$ (eje X) y 10.36 (eje Y) en la parte central del espacio de trabajo, el eje Z se presenta $2.40mT$ y $3.18mT$ para las intensidades de corriente (I) aplicada en esta configuración en el centro del espacio de trabajo.

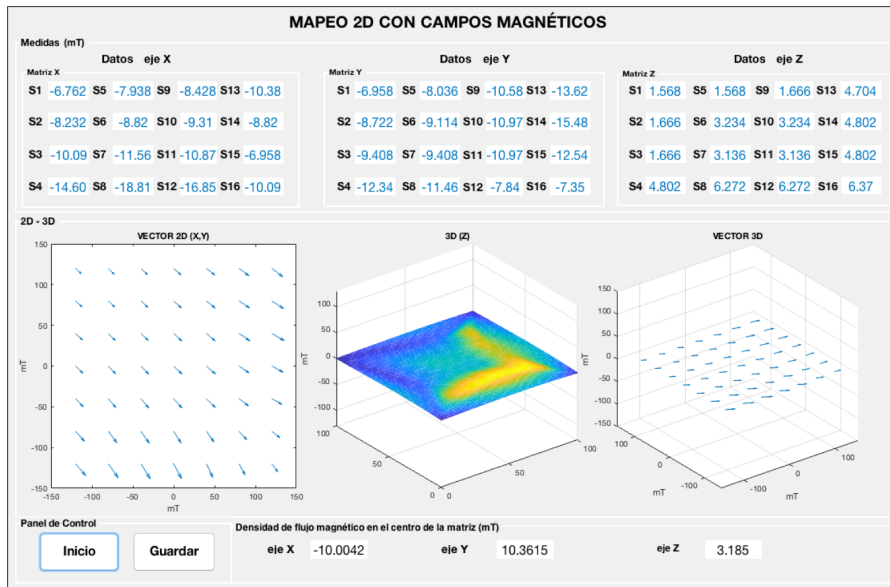


Figura 4.23: Configuración con 2 núcleos en perpendicular, $I=3.0A$.

4.1.3 Configuración con dos núcleos en línea

Finalmente la última configuración con 2 bobinas y sus 2 respectivos núcleos pero en línea en este caso se eligió el eje X. La pruebas son similares a las anteriores, se aplica una intensidad de corriente (I) desde 0.5A hasta 3A, con un paso de 500mA.

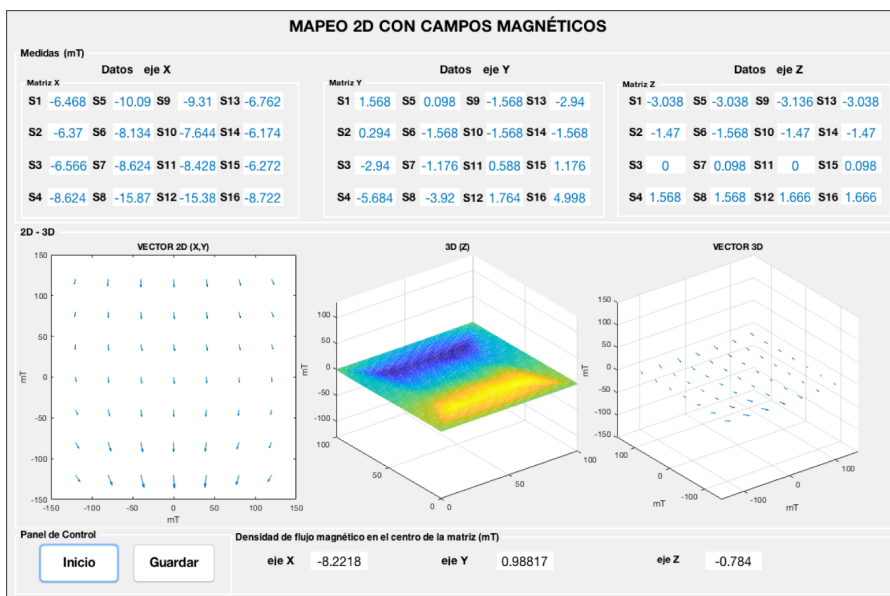


Figura 4.24: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=0.5A$.

En la Figura 4.24 se muestra para una $I=0.5A$ la configuración de 2 núcleos en línea (eje X), en donde se ha alcanzado en el centro del espacio de trabajo (Workspace center) alrededor de $-8.22mT$ (eje X). Manteniendo los otros ejes (Y,Z) en valores que no sobrepasan los $1mT$ y muy cercanos a cero. La distancia de los núcleos de ferrita a la matriz(4x4) de sensores magnéticos es de $1mm$, por lo que la matriz de sensores va a detectar valores de densidad de flujo magnético superiores en comparación con los valores obtenidos en las configuraciones anteriores.

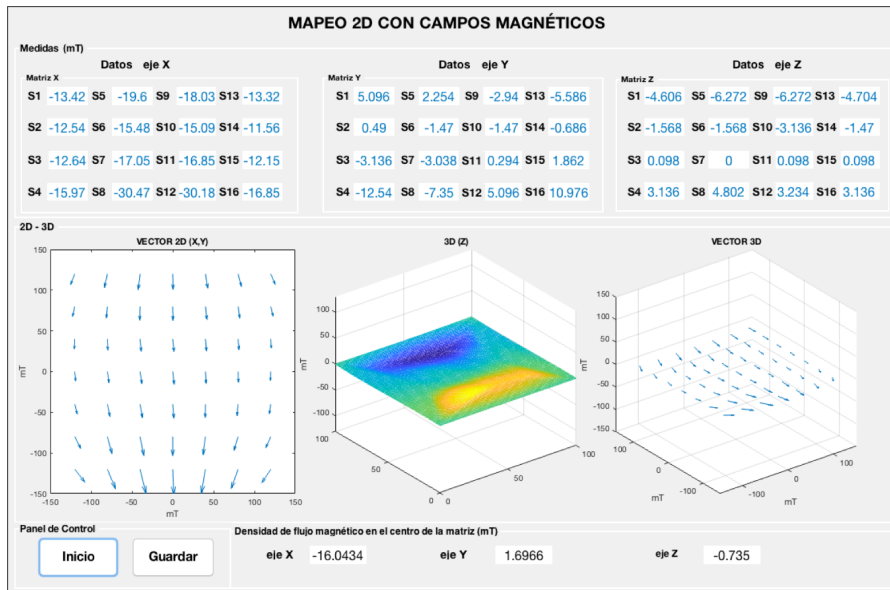


Figura 4.25: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=1.0A$.

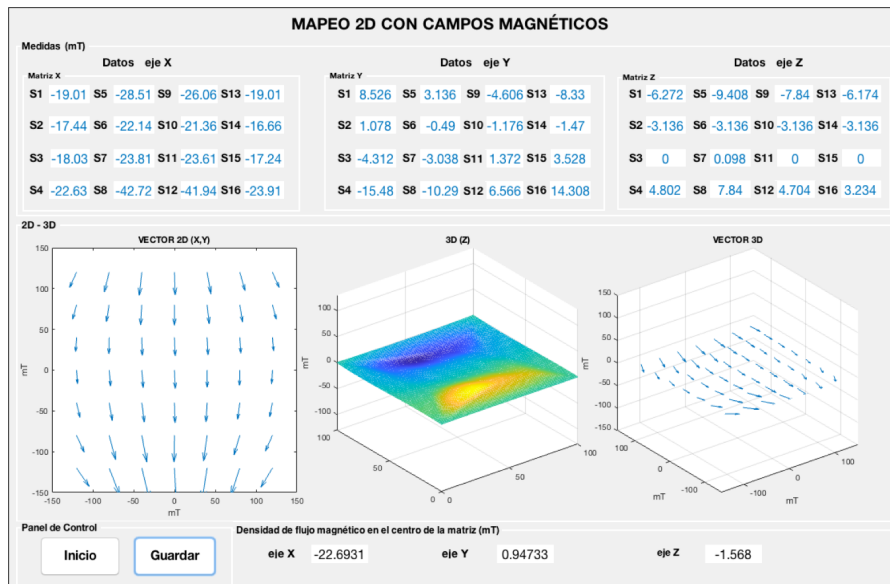


Figura 4.26: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=1.5A$.

La Figura 4.25 representa los resultados de aplicar una intensidad de corriente de $I=1.0A$ en ambas bobinas del mismo eje, como consecuencia del campo generado la densidad de flujo magnético en el centro es aproximadamente $-16.04mT$. Y aplicando una $I=1.5A$ y se ha alcanzado en el centro del espacio de trabajo alrededor de $-22.47mT$, ver Figura 4.26.

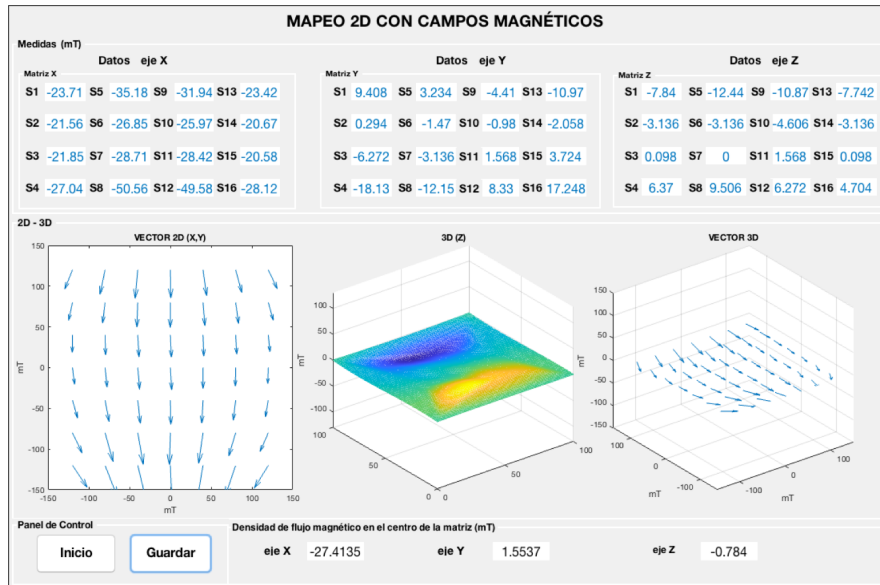


Figura 4.27: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=2.0A$.

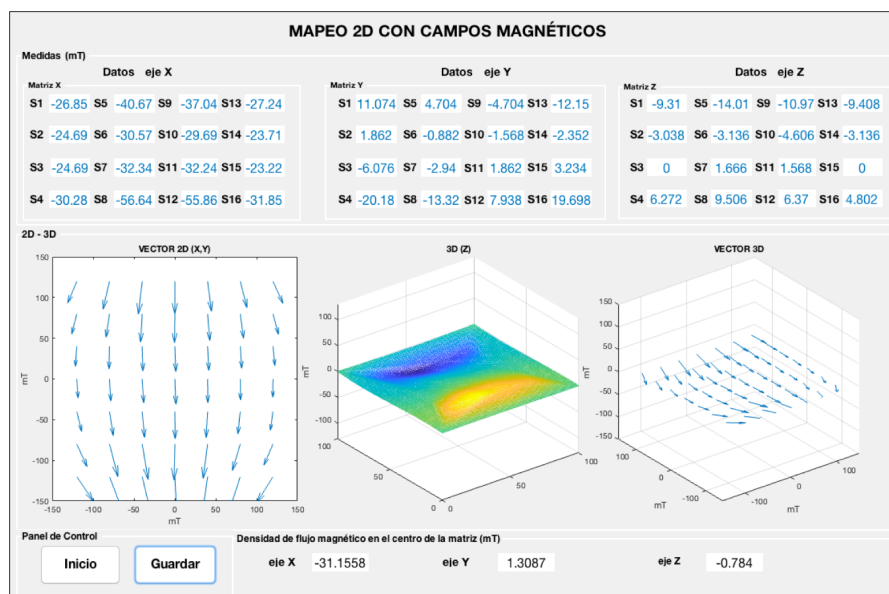


Figura 4.28: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=2.5A$.

La siguiente es la Figura 4.27, la intensidad de corriente que se aplicó es de $I=2.0A$ en donde se ha alcanzado una densidad de flujo magnético en el centro del espacio de trabajo alrededor de $-27.41mT$ (eje X) y para una $I= 2.5A$ (ver la Figura 4.28), aproximadamente una densidad de flujo magnético en el centro del espacio de trabajo de $-31.15mT$ (eje X).

Los valores en el centro del espacio de trabajo de los ejes Y,Z son cercanos a $0mT$ y no superan los $1.3mT$ aproximadamente para la Figura 4.27 y la Figura 4.28. Por último la Figura 4.29, se observa los resultados al aplicar una $I= 3.0A$, una densidad de flujo magnético en el centro de $-34.66mT$, se puede analizar esta figura y nos encontramos valores de densidad de flujo magnético que rondan los $60mT$ (eje X) aproximadamente.

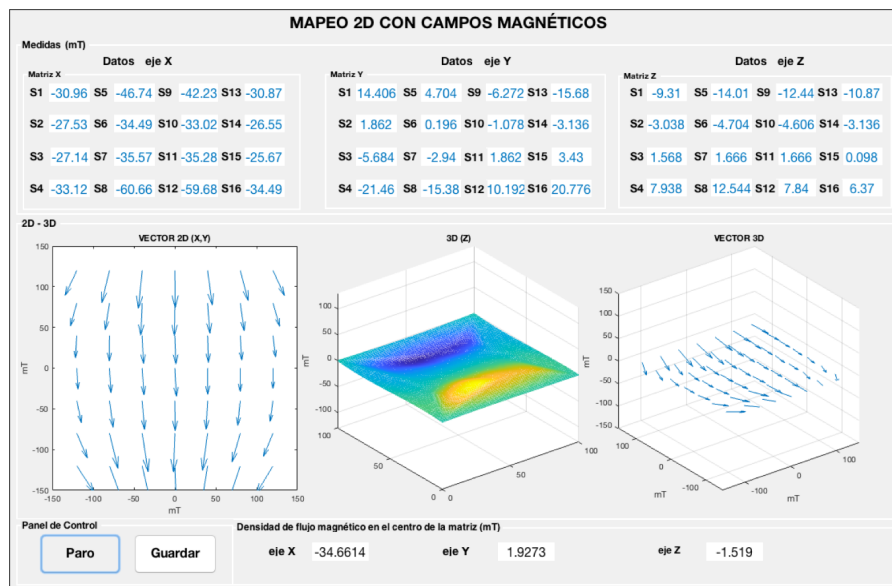


Figura 4.29: Configuración con 2 núcleos en línea, $I=3.0A$.

En resumen se han presentado tres configuraciones para realizar la caracterización de una plataforma con un espacio de trabajo de $14mm \times 1.4mm$, para el guiado de microrobots utilizando campos magnéticos, como se ha observado en los resultados (ver figuras de los resultados), la densidad de flujo magnético que se ha obtenido con 2 bobinas y 2 núcleos de ferrita (configuración con 2 núcleos en línea) presenta un mayor valor de densidad de flujo magnético (en magnitudes de mT) en el centro del espacio de trabajo, esto se debe a que el campo magnético generado presenta una misma dirección por lo que este campo magnético se intensifica de forma direccionado proporcionado por los núcleos de ferrita que atraviesan las bobinas.

4.2 Resultados y Discusión del Guiado 2D

Para la realizar las pruebas de la parte del Guiado 2D, se ha diseñado un control simple que utiliza señales digitales PWM. Las señales digitales de PWM se han generado a partir de lecturas de señales analógicas de un dispositivo de control (en este caso un joystick para el control de los ejes X,Y) desde el microcontrolador.

Una vez efectuado e implementado el software que realiza las lecturas del joystick e inyectar las señales digitales PWM se procede a verificar. Para testear y verificar que las señales digitales PWM se ha utilizado un osciloscopio y un analizador lógico, (ver Figura 4.30), debido a muchas circunstancias que se han presentado para el desarrollo de TFM se hace uso de una plataforma hardware Analogic Dscovery 2 que nos va ha permitir realizar toda la verificación correspondiente a la parte del Guiado 2D. A continuación se muestra la figura 4.31 correspondiente a las señales PWM que se han generado, después otra figura que muestra todo el hardware que se utiliza para la verificación.

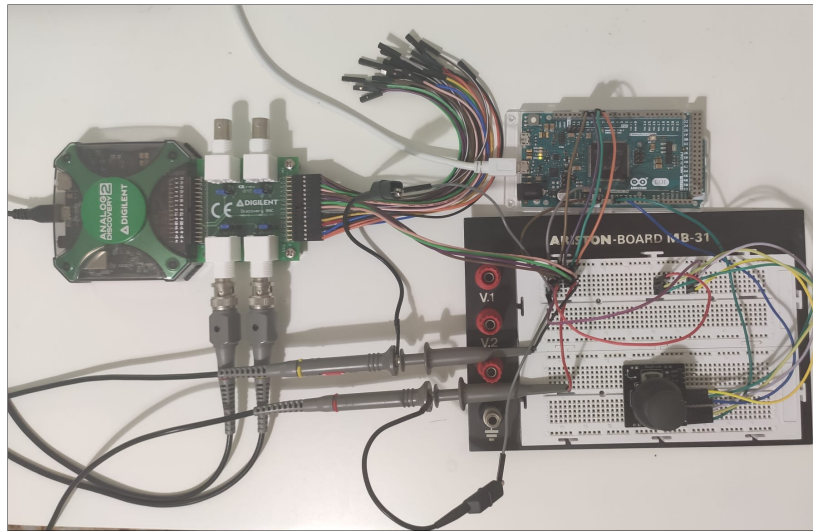


Figura 4.30: Hardware para la lectura de las señales digitales PWM.

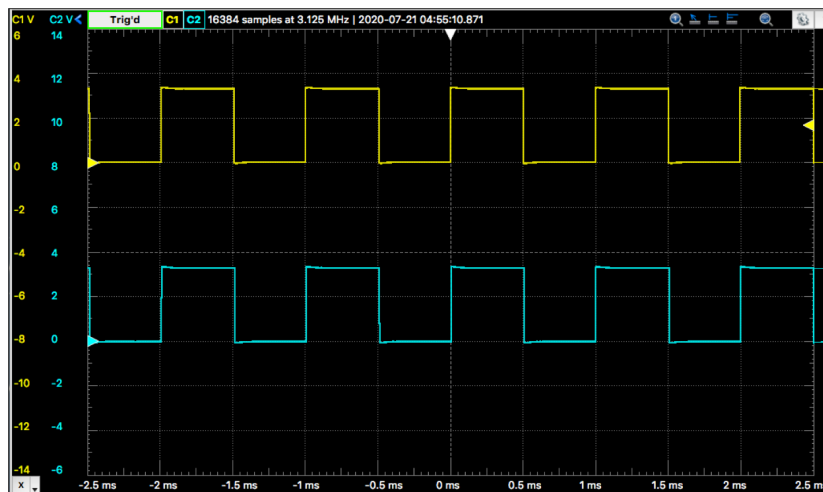


Figura 4.31: Señales Digitales PWM generada para dos bobinas.

Las pruebas correspondiente a la parte de guiado 2D, en donde se hace uso del analizador lógico del Analog Discovery 2 para observar el comportamiento del control simple que se ha implementado en el microcontrolador, que básicamente es que de acuerdo a la dirección dada en el joystick se inyecta la señal digital PWM en dicha bobina, de igual manera cuando tengamos una dirección que involucre los dos ejes (X,Y).

El comportamiento del algoritmo desarrollado e implementado en el microcontrolador permite realizar un control simple de las bobinas para el guiado 2D mediante campos magnéticos. Entonces, para una dirección dada en el joystick solo se activará una o dos bobinas correspondiente a dicha dirección, por lo tanto, cuando se tiene una dirección fijada en el joystick se activa sola la bobina que corresponde a esa dirección, mientras que las otras bobinas permanecen con un ciclo de trabajo del 50%.

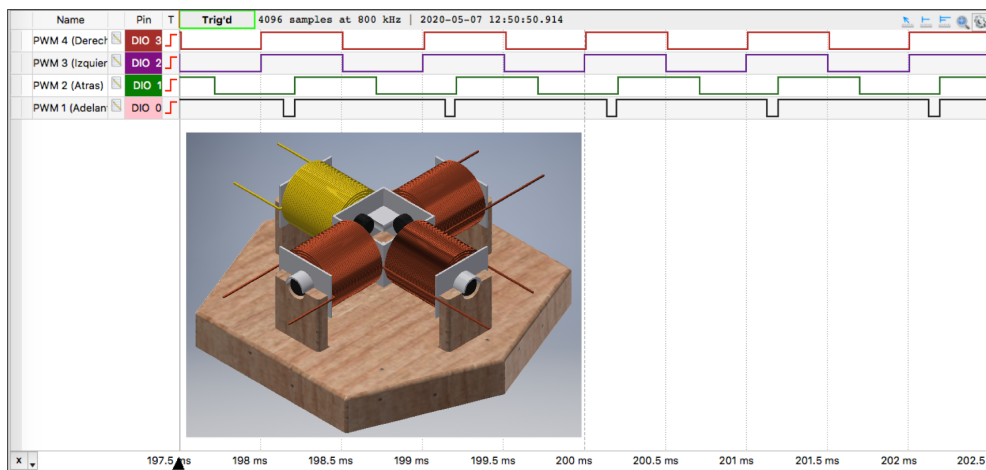


Figura 4.32: Activación de la bobina Norte(adelante).

Desde la Figura 4.32 en adelante se muestran figuras que corresponden a los resultados del algoritmo desarrollado e implementado para realizar el control del sistema de guiado 2D mediante campos magnéticos, en estas figuras se observa señales digitales PWM obtenidas desde el analizador lógico y además se muestra la estructura base que contiene las 4 bobinas que sirven para identificar la dirección que se fijará en el dispositivo de control (joystick).

En la figura 4.32, se observa que la dirección fijada en el joystick es norte(adelante), por lo tanto, solo dicha bobina correspondiente a esa dirección se activará mientras que las otras bobinas tendrán una señal PWM con un ciclo de trabajo del 50%.

Hay que mencionar que se puede controlar la dirección de la intensidad de corriente que fluye a través de las bobinas, por lo tanto, también se puede activar la bobina Sur con la dirección de intensidad de corriente adecuada para intensificar el campo magnético en esa dirección. Pero el alcance del TFM solo se ha limitado a controlar la bobina que corresponde a la dirección fijada en el Joystick.

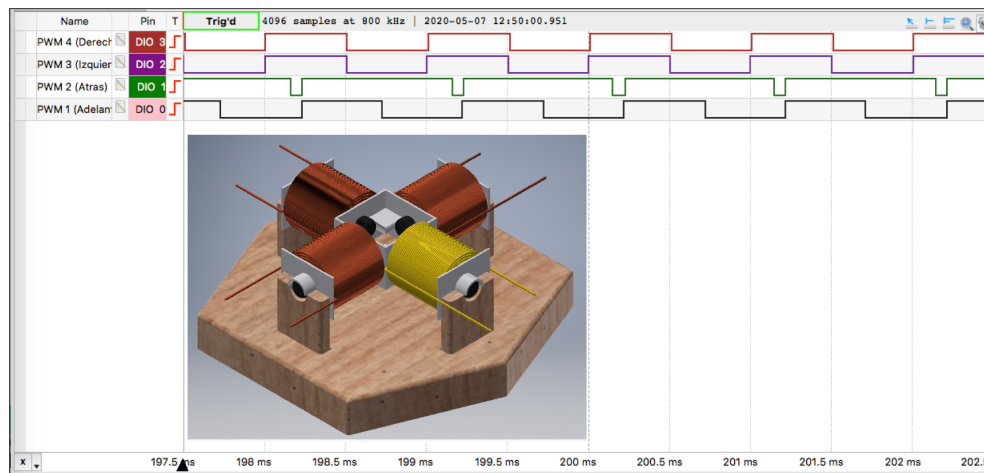


Figura 4.33: Activación de la bobina Sur(atrás).

Lo mismo sucede en la figura 4.33, donde la posición del joystick es Sur(atrás), por lo tanto, como se observa en esa figura 4.33 que solo se activa dicha bobina, el ciclo de trabajo de esta bobina es superior a un 90%.

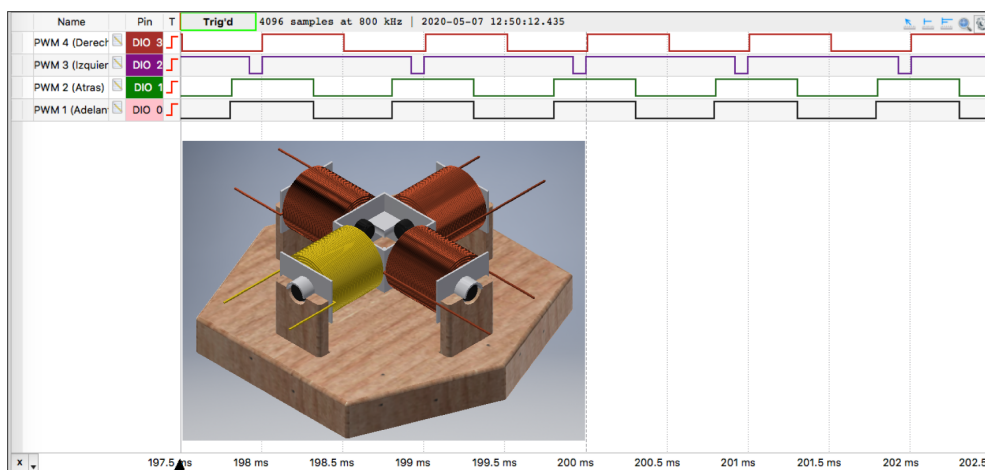


Figura 4.34: Activación de la bobina Oeste(izquierda).

De igual manera para la bobina ubicada en la dirección Oeste (izquierda), solo se activará la bobina correspondiente a la dirección del joystick. En la figura 4.34 se observa las señales digitales PWM, donde solo se observa que solamente la bobina en dirección oeste su señal PWM tiene un ciclo de trabajo mayor a las otras bobinas.

Para la bobina ubicada en la dirección Este(derecha), la figura 4.35 muestra el resultado de fijar una dirección a la derecha en el joystick, además se observa que el ciclo de trabajo de la señal digital PWM con dirección este(derecha) es muy superior a las otras señales digitales PWM que permanecen con un ciclo de trabajo de 50%.

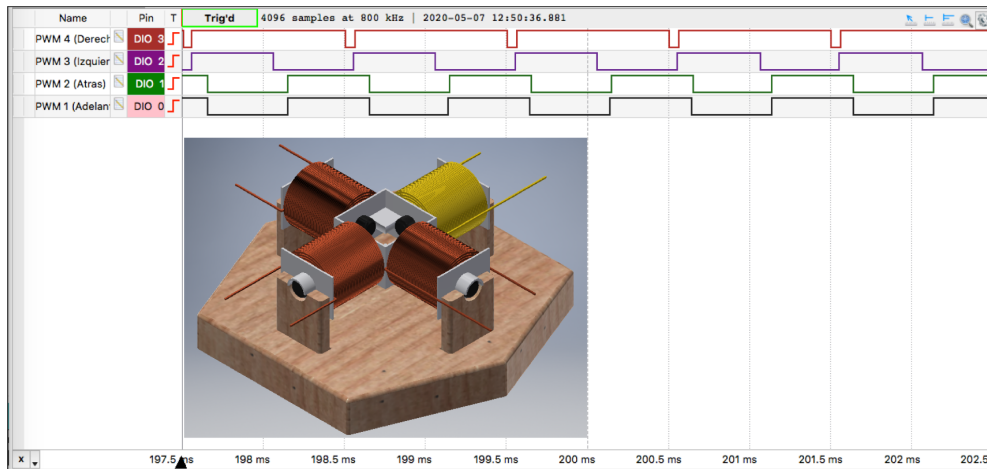


Figura 4.35: Activación de la bobina Este(derecha).

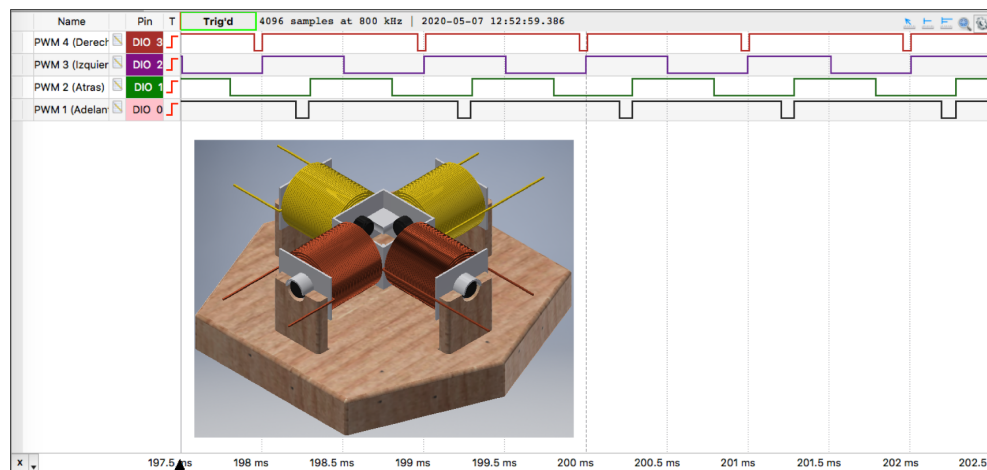


Figura 4.36: Activación de las bobinas Noreste(adelante-derecha).

Para las bobinas ubicadas en las direcciones noreste y noroeste se muestran las figuras 4.36 y 4.37 correspondientes a estas direcciones, en estas figuras se observa que el ciclo de trabajo esta alrededor de 90% un poco más o un poco menos, mientras que las señales digitales PWM correspondientes a las otras bobinas se mantienen en un ciclo de trabajo del 50%.

Cabe mencionar que depende mucho de la dirección fijada en el joystick para que el ciclo de trabajo de ambas bobinas en ambas figuras 4.36 y 4.37 sean muy similares.

Por ultimo tenemos las bobinas ubicadas en las direcciones sureste y suroeste que se muestran en las figuras 4.38 y 4.39 correspondientes a estas direcciones, de igual forma que las figuras anteriores la dirección fijada o seteada en el joystick va a representar el ciclo de trabajo de cada señal digital PWM. Por lo tanto, el ciclo de de trabajo de las bobinas involucradas en las direcciones fijadas en el Joystick depende mucho de la precisión e intensidad en la dirección que se desea fijar.

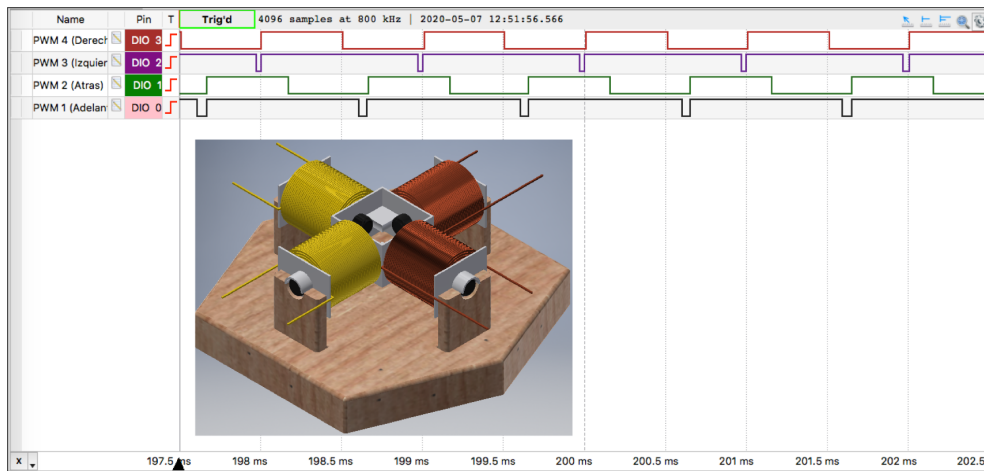


Figura 4.37: Activación de las bobinas Noroeste(adelante-izquierda).

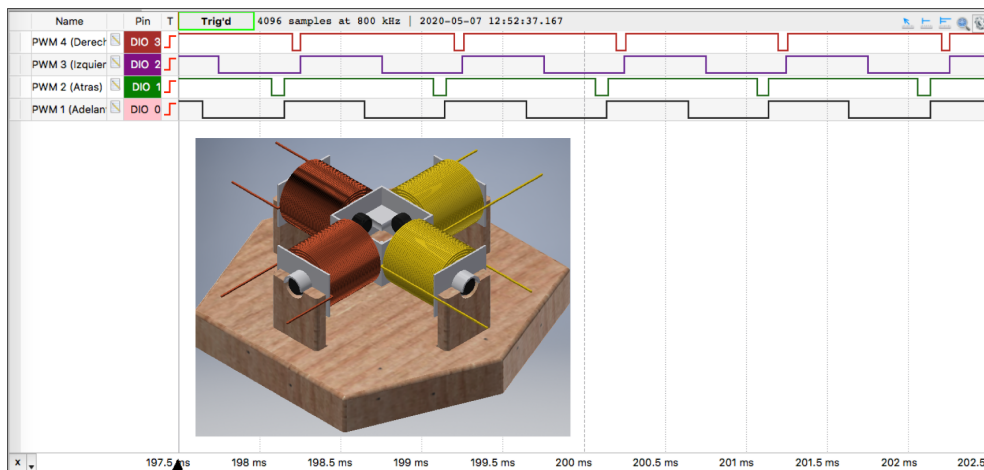


Figura 4.38: Activación de las bobinas Sureste(atrás-derecha).

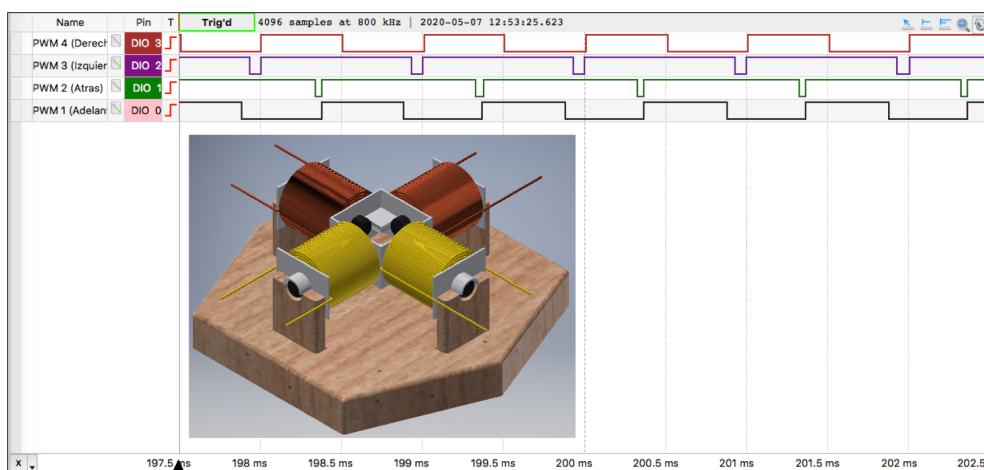


Figura 4.39: Activación de las bobinas Suroeste(atrás-izquierda).

5 Conclusiones

En el presente trabajo final de máster se desarrolló un sistema que permite el guiado en dos dimensiones de microrobots basado en el mapeo 2D de campos magnéticos. La parte más importante del todo el sistema es la caracterización o el mapeo 2D de una superficie, porque al realizar un mapeo 2D se puede identificar la densidad de flujo magnético que se puede generar en toda la superficie o en cualquier punto específico de esta mediante la interpolación de datos, todo la caracterización de esta superficie es posible a la intensidad de corriente que su puede suministrar en las bobinas. Un problema que se presentó en el desarrollo de este sistema es el no poder incrementar la intensidad de corriente a valores superiores a los 3.5A, porque la temperatura aumenta en las bobinas y esto atrofia y deforma la pieza 3D que hace de soporte base para todo el sistema desarrollado.

Se generó densidades de flujo magnético mayores a los propuestos en los objetivos específicamente en el centro del espacio de trabajo, esto es posible, porque se realizó diferentes configuraciones para testear el mejor escenario y se identificó que la densidad de flujo magnético dependen de la distancia que existe entre el núcleo y del espacio de trabajo. Se añadió núcleos a las bobinas con el fin de intensificar y direccionar el campo magnético generado.

Se desarrolló distintos tipos de software y hardware que han permitido la implementación del sistema planteado en este TFM, desde el mapeo 2D de la superficie de interés hasta el guiado 2D de los microrobots.

Se desarrolló un software que permite el guiado 2D de los microrobots, con un control muy simple y eficaz que permite dirigir y orientar las micropartículas o microrobots, pero, hay que mencionar que algunas pruebas no se han realizado a consecuencia del Covid-19. Entonces, se diseñó otra alternativa para solventar y verificar las pruebas de este software, lo que ayudó a realizar esta verificación es un osciloscopio y analizador lógico.

En consecuencia del estudio y trabajo desarrollado considero que el diseño y desarrollo de microrobots es una parte muy fundamental en los sistemas de guiado de los mismos, por lo tanto, son líneas de investigaciones nuevas o trabajos futuros que se pueden indexar para complementar trabajos relacionados al guiado de microrobots, las aplicaciones de estos trabajos son prometedoras y necesarias. Otro trabajo futuro es el realizar un sistema de guiado 2D para entornos secos utilizando diversas fuente de energía, además, considero que es posible realizar un control más robusto para el guiado de microrobots.

Bibliografía

- [1] Bradley J. Nelson, Ioannis K. Kaliakatsos, and Jake J. Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 12(1):55–85, 2010. PMID: 20415589.
- [2] A. J. Petruska, A. W. Mahoney, and J. J. Abbott. Remote manipulation with a stationary computer-controlled magnetic dipole source. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(5):1222–1227, Oct 2014.
- [3] R. Chen, D. Folio, and A. Ferreira. Study of robotized electromagnetic actuation system for magnetic microrobots devoted to minimally invasive ophthalmic surgery. In *2019 International Symposium on Medical Robotics (ISMR)*, pages 1–7, 2019.
- [4] P. Ryan and E. Diller. Magnetic actuation for full dexterity microrobotic control using rotating permanent magnets. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(6):1398–1409, 2017.
- [5] Gioia Lucarini, Gastone Ciuti, Marco Mura, Rocco Rizzo, and Arianna Menciassi. A new concept for magnetic capsule colonoscopy based on an electromagnetic system. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12(3):25, 2015.
- [6] Jinxing Li, Berta Esteban-Fernández de Ávila, Wei Gao, Liangfang Zhang, and Joseph Wang. Micro/nanorobots for biomedicine: Delivery, surgery, sensing, and detoxification. *Science Robotics*, 2(4), 2017.
- [7] M. Sitti, H. Ceylan, W. Hu, J. Giltinan, M. Turan, S. Yim, and E. Diller. Biomedical applications of untethered mobile milli/microrobots. *Proceedings of the IEEE*, 103(2):205–224, 2015.
- [8] Zhiguang Wu, Lei Li, Yiran Yang, Peng Hu, Yang Li, So-Yoon Yang, Lihong V. Wang, and Wei Gao. A microrobotic system guided by photoacoustic computed tomography for targeted navigation in intestines in vivo. *Science Robotics*, 4(32), 2019.
- [9] Hakan Ceylan, Joshua Giltinan, Kristen Kozielski, and Metin Sitti. Mobile microrobots for bioengineering applications. *Lab Chip*, 17:1705–1724, 2017.
- [10] G. Go, H. Choi, S. Jeong, C. Lee, S. Y. Ko, J. Park, and S. Park. Electromagnetic navigation system using simple coil structure (4 coils) for 3-d locomotive microrobot. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(4):1–7, 2015.
- [11] W. Ma, J. Li, F. Niu, H. Ji, and D. Sun. Robust control to manipulate a microparticle with electromagnetic coil system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11):8566–8577, 2017.

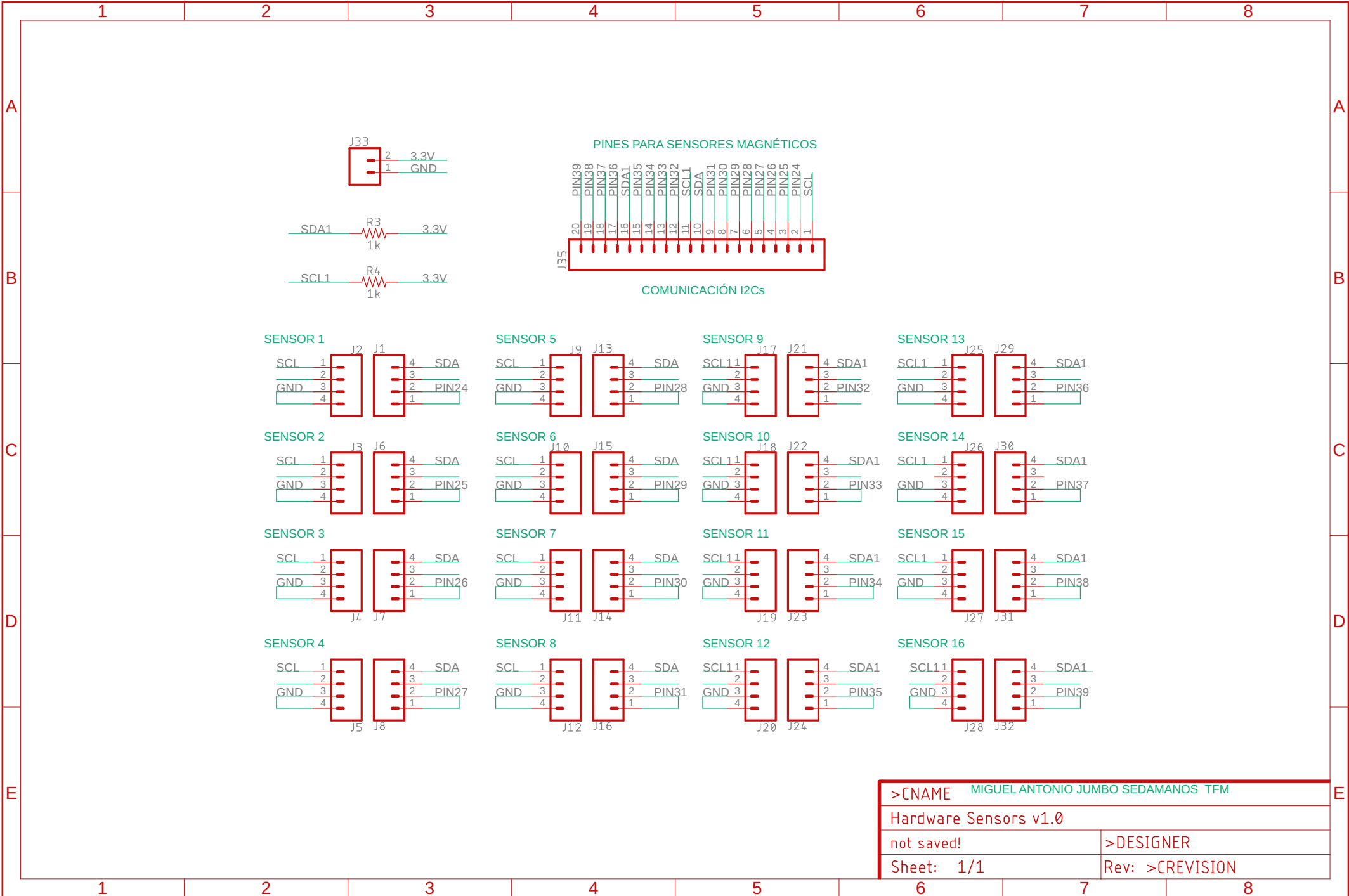
-
- [12] Ugur Bozuyuk, Oncay Yasa, I. Ceren Yasa, Hakan Ceylan, Seda Kizilel, and Metin Sitti. Light-triggered drug release from 3d-printed magnetic chitosan microswimmers. *ACS Nano*, 12(9):9617–9625, 2018. PMID: 30203963.
- [13] Haifeng Xu, Mariana Medina-Sánchez, Veronika Magdanz, Lukas Schwarz, Franziska Hebenstreit, and Oliver G Schmidt. Sperm-hybrid micromotor for targeted drug delivery. *ACS Nano*, 12(1):327–337, 2018. PMID: 29202221.
- [14] A. Hsu, C. Cowan, W. Chu, B. McCoy, A. Wong-Foy, R. Pelrine, C. Velez, D. Arnold, J. Lake, J. Ballard, and J. Randall. Automated 2d micro-assembly using diamagnetically levitated milli-robots. In *2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*, pages 1–6, 2017.
- [15] Daniele Foresti, Mirko Klingauf, A. Ferrari, and Dimos Poulikakos. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 7 2013.
- [16] S. Floyd, C. Pawashe, and M. Sitti. An untethered magnetically actuated micro-robot capable of motion on arbitrary surfaces. In *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 419–424, 2008.
- [17] Omid Youssefi and Eric Diller. Dry surface micromanipulation using an untethered magnetic microrobot. In Farrokh Janabi-Sharifi and William Melek, editors, *Advances in Motion Sensing and Control for Robotic Applications*, pages 75–91, Cham, 2019. Springer International Publishing.
- [18] Bio-optic. Microscopio digital invertido, 4 2020. Library Catalog: www.bio-optic.com/.
- [19] M. P. Kummer, J. J. Abbott, B. E. Kratochvil, R. Borer, A. Sengul, and B. J. Nelson. Octomag: An electromagnetic system for 5-dof wireless micromanipulation. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(6):1006–1017, 2010.
- [20] I. S. M. Khalil, J. D. Keuning, L. Abelmann, and S. Misra. Wireless magnetic-based control of paramagnetic microparticles. In *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics BioRob*, pages 460–466, 2012.
- [21] Eric Diller, Joshua Giltinan, Guo Zhan Lum, Zhou Ye, and Metin Sitti. Six-degree-of-freedom magnetic actuation for wireless microrobotics. *The International Journal of Robotics Research*, 35(1-3):114–128, 2016.
- [22] F. Niu, J. Li, W. Ma, J. Yang, and D. Sun. Development of an enhanced electromagnetic actuation system with enlarged workspace. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(5):2265–2276, 2017.
- [23] Tianqi Xu, Jiachen Zhang, Mohammad Salehizadeh, Onaizah Onaizah, and Eric Diller. Millimeter scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions. *Science Robotics*, 4(29), 2019.
- [24] R.S Popovic. *Hall effect devices : magnetic sensors and characterization of semiconductors*. The Adam Hilger series on sensors. Adam Hilger, Bristol [etc], 1991.
-

- [25] Edwin W. H. Jager, Olle Inganas, and Ingemar Lundstrom. Microrobots for micrometer-size objects in aqueous media: Potential tools for single cell manipulation. *Science*, 288(5475):2335–2338, 2000.
 - [26] Arduino. Arduino hardware due, 4 2020. Library Catalog: www.arduino.cc.
 - [27] Arduino. Software, 4 2020. Library Catalog: www.arduino.cc.
 - [28] MathWorks. Matlab software is the easiest and most productive software environment for engineers and scientists, 4 2020. Library Catalog: www.mathworks.com.
 - [29] AutoDesk. Eagle, pcb design software, 4 2020. Library Catalog: www.autodesk.com.
 - [30] Infineon Technologies AG. Tlv493d - a1b6 - sensor magnetic 3d, 4 2020. Library Catalog: <https://www.infineon.com>.
 - [31] Microchip. Atsam3x8e - 32-bit sam microcontrollers, 4 2020. Library Catalog Datasheet: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf.
 - [32] Texas Instruments. Ti is a global semiconductor design and manufacturing company. innovate with 100,000+ analog ics and embedded processors, along with software, tools and the industry’s largest sales/support staff., 4 2020. Library Catalog: www.ti.com.
-

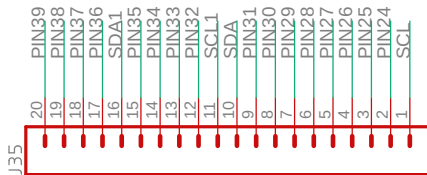
6 Anexo I

Se adjuntan los esquemáticos de conexiones de los circuitos impresos (PCB) diseñados e implementados, tanto para la parte del mapeo como la del guiado 2D.

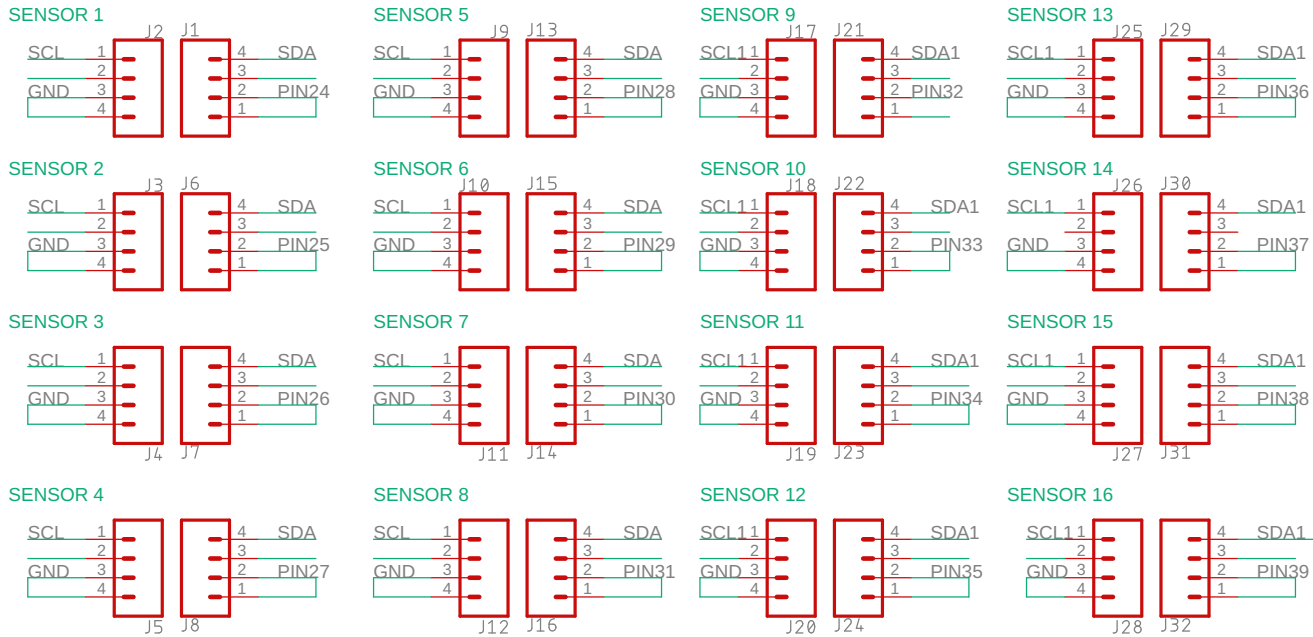
- Prototipo Hardware 2 de la parte de mapeo 2D.
- Prototipo Hardware 1 de la parte de mapeo 2D.
- Prototipo Hardware 3 de la parte de guiado 2D.



PINES PARA SENSORES MAGNÉTICOS



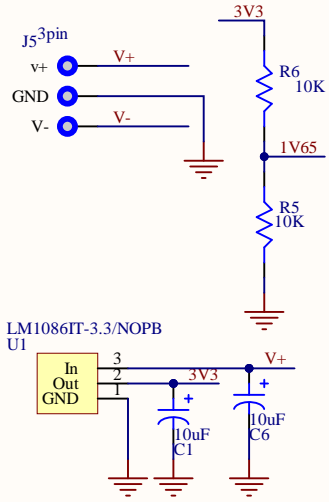
COMUNICACIÓN I2Cs



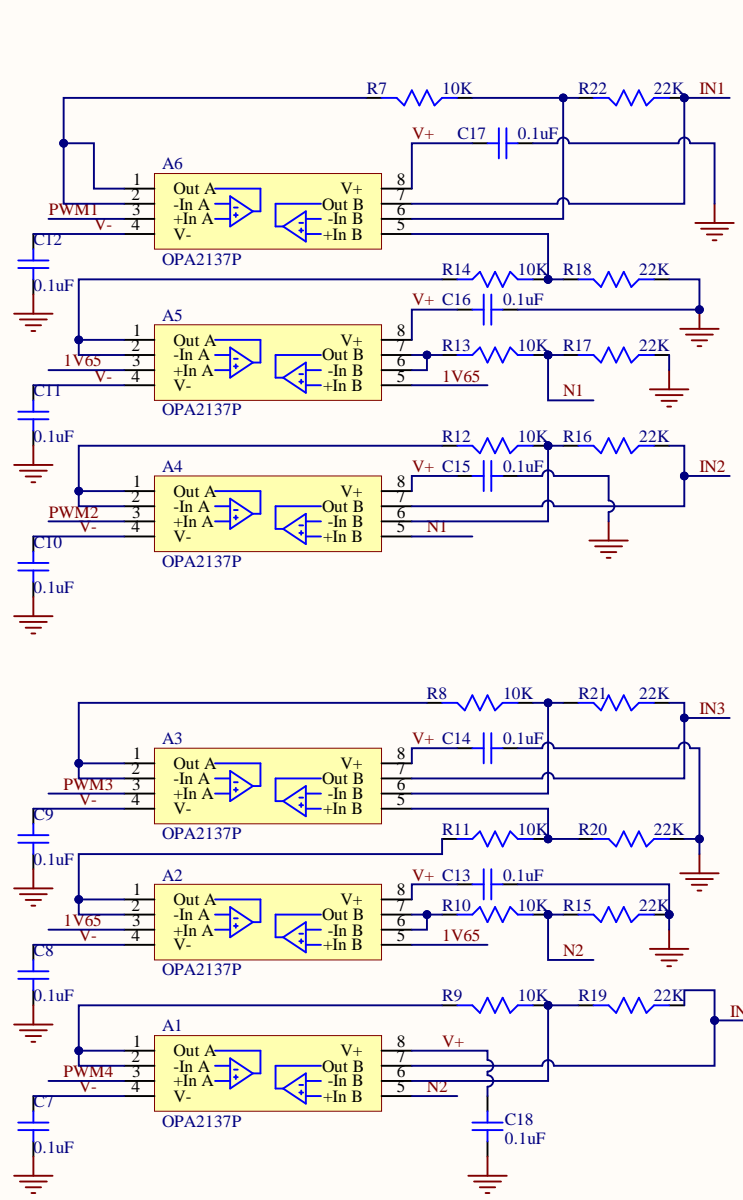
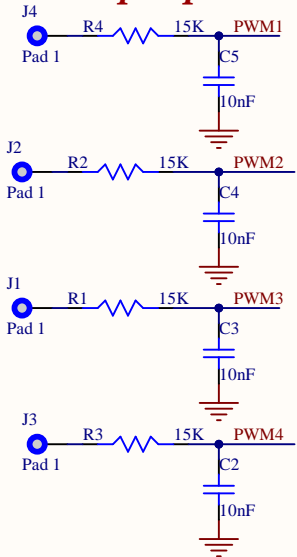
| | |
|---|-----------------|
| >CNAME MIGUEL ANTONIO JUMBO SEDAMANOS TFM | |
| Hardware Sensors v1.0 | |
| not saved! | >DESIGNER |
| Sheet: 1/1 | Rev: >CREVISION |

POWER MAG. BOARD

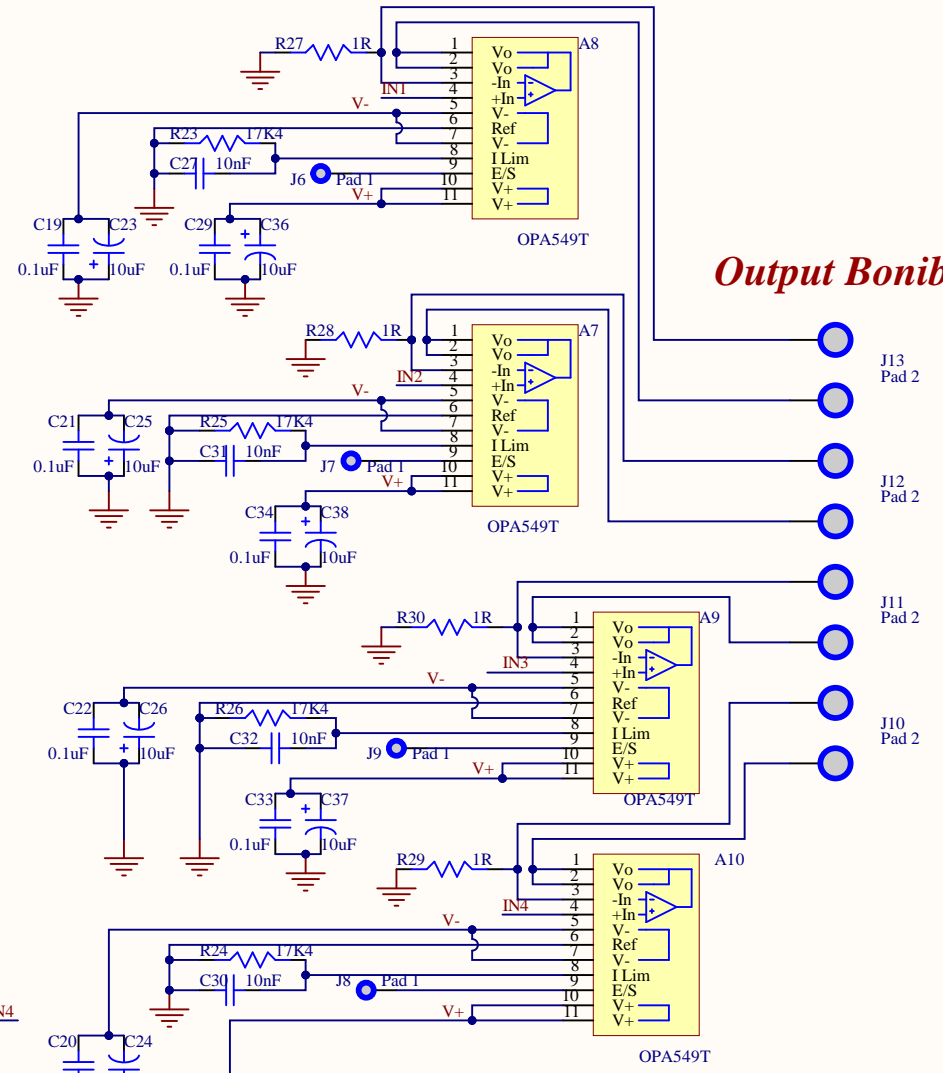
Input Source



Input pwm



Output Bonibas



| | | | | | |
|-------|-----------|--------|----------------------------------|-----------|----------|
| Title | | | Power Mag. Board V1.0 | | |
| Size | A4 | Number | | | Revision |
| Date: | 4/28/2020 | File: | C:\Users\...\Power_TFM_V2.SchDoc | Sheet of | |
| | | | | Drawn By: | |