



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN
DISCIPLINA EN SENSORES

DETECTOR MAGNÉTICO DE PROXIMIDAD PARA OPERACIÓN EN SUPERFICIES
PLANETARIAS O ASTEROIDALES SIN ATMÓSFERA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ CARLOS SÁNCHEZ CAJAL

TUTOR PRINCIPAL
DR. GUSTAVO ADOLFO MEDINA TANCO

Ciudad Universitaria, CD. MX. Noviembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Celia Angelina Sánchez Pérez
Secretario: Dra. María Herlinda Montiel Sánchez
1^{er}. Vocal: Dr. Gustavo Adolfo Medina Tanco
2^{do}. Vocal: Dr. Naser Qureshi
3^{er}. Vocal: Dr. Augusto García Valenzuela

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM.
Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Gustavo Adolfo Medina Tanco

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a mis papás por siempre brindarme el apoyo para poder tener una formación educativa de primer nivel, por apoyar mis decisiones y nunca dejarme vencer ante las adversidades. Por todo el amor y esfuerzo que me dan todos los días, porque me impulsan a lograr mis metas.

A Erika, por ser mi primer recurso, mi apoyo incondicional, mi persona, mi confidente, mi fan y mi ídola y sobre todo, por siempre ayudarme a salir adelante para poder lograr mis sueños, como lo es este trabajo, y otros tantos logros.

A mis hermanas, por ser el pilar fundamental de mi formación, no sólo de carácter, si no de alegrías y de momentos que definen la persona que ahora soy.

A mis amigos, que a pesar de no entender nunca lo que hacía, me alentaban a seguir luchando por mis sueños y a no darme por vencido a pesar de la distancia o la lejanía.

Al Doctor Gustavo Medina, por darme la oportunidad de formar parte del Laboratorio de Instrumentación Espacial y por darme la confianza para encargarme de varios subsistemas que me ayudaron a crecer académica y personalmente.

A Manuel y Aldo, colaboradores del laboratorio que me ayudaron en el proceso de este trabajo y puntualmente, a sacar resultados clave para la obtención de resultados satisfactorios.

Al técnico académico Juan Carlos Sánchez Balanzar, por las facilidades y prestaciones brindadas en las instancias del laboratorio de detectores del cual forma parte, en el Instituto de Ciencias Nucleares.

A Juan Carlos, Ernesto y William, por no sólo brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo, si no por brindarme también una amistad que pocos logran tener en un ambiente de trabajo tenso, pero también lleno de aprendizajes, risas, experiencias y por sobre todo, cariño.

A la Doctora Herlinda, al Doctor Augusto, al Doctor Naser y en especial a la Doctora Celia, por aceptar este trabajo como sinodales y jurado, pero también por compartirme un poco del gran conocimiento que poseen cada uno dentro y fuera de los salones y laboratorios. Me devuelven la fe en creer que México tiene investigadores de primer nivel.

Al Laboratorio de Instrumentación Espacial, por brindarme un hogar, aprendizajes, experiencias conocimiento y amistades que perdurarán.

Al Instituto de Ciencias Nucleares, por abrirme sus puertas para poder completar mi formación académica y brindarme apoyo para mostrar mi trabajo fuera de los laboratorios.

A mis colegas de la maestría, por brindarme una amistad dentro y fuera del programa, por hacerme confiar en que podemos ser grandes en todo lo que nos proponemos.

A la UNAM, por formarme y ayudarme a reforzar quién soy, de dónde vengo y a dónde quiero llegar.

Al CONACyT, por otorgarme la beca para poder realizar mis estudios de maestría.

Dedicatoria

A Erika, mis papás, a mis hermanas

y a mi abuelo, quien me enseñó el significado del amor.

Índice	
1. Resumen	1
2. Introducción	2
3. Antecedentes	3
4. Fundamentos	
4.1. Campo Magnético	5
4.2. Ley de Biot Savart	6
4.3. Ley de Ampere	6
4.3.1. Teorema de Stokes	7
4.4. Fuerza de Lorentz	7
4.5. Campo magnético de una espira	7
4.6. Efecto Hall	11
4.6.1. Modelo de Drude	12
4.7. Teorema de muestreo Nyquist-Shannon	13
4.8. MEMs	13
4.9. Ruido y fuentes de ruido en componentes electrónicos	14
5. Definición	
5.1. Objetivos y requerimientos	18
5.2. Sensor Magnético	
5.2.1. IMU	18
5.2.2. Resolución y rango dinámico	19
5.2.3. Velocidad de medición	20
5.2.4. Esquemático de sensor	21
5.3. Bobina	22
5.4. Fuente de energía	23
6. Implementación	
6.1. Corriente, resistencia, peso y número de vueltas	24
6.2. Energía consumida por el sistema	26
6.3. Fabricación y ensamblado de bobina	27
6.4. Montaje del sensor magnético	28
6.5. Algoritmo de detección	30
6.5.1. Conmutación del campo magnético	30
6.5.2. Filtro de datos de entrada	34
6.5.3. Filosofía de algoritmo	32
6.5.4. Calibración	33
6.5.5. Ruido del sistema	34
7. Resultados	
7.1. Resultados experimentales	
7.1.1. Sistemas interactuando	35
7.1.2. Comparación con el modelo teórico	35
7.1.3. Desempeño del sistema de detección de presencia en el entorno	37
7.2. Detección de los robots	39
7.3. Sistema de potencia	41
8. Conclusiones	42
9. Trabajo futuro	43
Bibliografía	44
Anexos	46

1. Resumen

Este proyecto es un subsistema que formará parte de un micro robot lunar que tiene como objetivo crear un enjambre del mayor número de robots posible sobre la superficie lunar con el fin de crear un panel fotovoltaico en conjunto; esto se logrará a través de la interacción de varios subsistemas trabajando en conjunto en un mismo robot.

Dado las especificaciones y limitantes que se tienen en la superficie lunar, así como el objetivo principal de la misión de aglomerarse y conectarse, los robots tendrán que saber con cierta antelación la cercanía que tendrán con otros robots de su tipo. Este problema no se puede abordar con cualquier tipo de sensor de proximidad.

En lo cotidiano, se utilizan un tipo de sensores acústicos para saber la proximidad de algún objeto y así evitar colisiones. Los sensores acústicos no son viables en esta aplicación debido a la falta de un medio en el que se propague la onda mecánica (normalmente aire). Un sensor óptico, como segunda opción de sensor de proximidad, presenta restricciones dado que este, debe ser direccionado a un detector y representa un gran número de componentes a implementar sobre el perímetro de la estructura de los robots, teniendo estos una geometría de disco con dientes, haciéndolo robusto para esta aplicación. Un sensor capacitivo también aplicado como sensor de proximidad para rangos más pequeños de detección (2 cm - 4 cm), es descartado dado que existe un potencial eléctrico en la superficie lunar debido al polvo lunar en contacto con la radiación solar, este campo se presenta a menos de 30 cm de la superficie, lugar donde se desarrollará la misión.

Un sensor magnético es una solución factible para los robots y para las especificaciones de la misión. Un sensor magnético implementado con una bobina y un sensor comercial posee características favorables para la misión: omnidireccionalidad, bajo peso de implementación y compatibilidad con la geometría del robot. Por estas razones, se decidió implementar un sistema de detección de proximidad magnético mediante la generación de un campo magnético conmutado por una bobina incrustada en la estructura del robot y un sensor magnético comercial situado en el centro geométrico de los robots, con el fin de que cada robot pueda producir un campo magnético para ser detectado y un sensor para poder detectar.

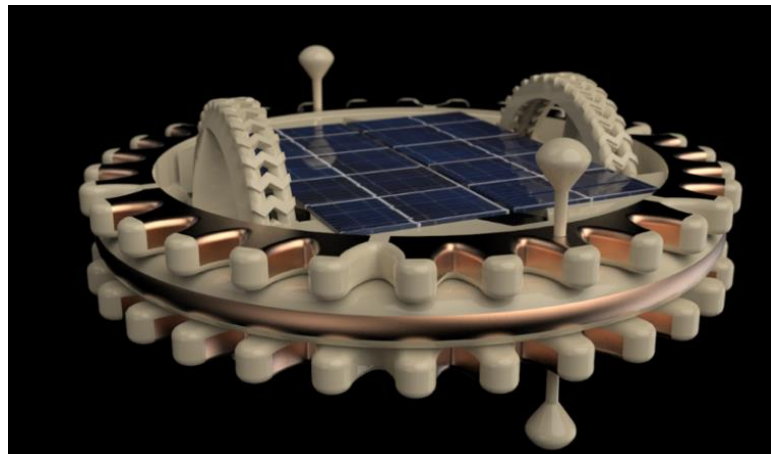


Figura 1: Prototipo de robot lunar realizado en LINX [1].

2. Introducción

La tecnología espacial está cambiando rápidamente y se busca reducir costos para hacer la exploración planetaria una realidad. En esta carrera de la exploración de cuerpos celestes y planetas, se tiene un gran incentivo económico, los minerales terrestres se agotan y en el espacio hay una gran fuente de ellos que se han ido descubriendo a través de la exploración y la minería espacial.

México tiene oportunidad de tener un nicho tecnológico en esta exploración al desarrollar robots con inteligencia artificial, que en otros países ya está muy desarrollada, al mandar varios cientos o miles de robots que puedan auto organizarse y formar estructuras tanto simples como complejas. México tiene las capacidades y el conocimiento para poder ser vanguardista a nivel internacional. Ya existen algunas misiones con robots pequeños en asteroides, pero se plantea ir un paso adelante, generar una plataforma cooperativa.

Aquí es donde la misión COLMENA cobra lugar, una primera misión de 9 micro robots con el objetivo de ser desplegados de forma aleatoria en la superficie lunar para que por medio de tiempo, interacción y energía se auto organicen en un enjambre o aglomerado con el mayor número de robots, para así, poder compartir la potencia de cada robot para lograr formar un solo panel solar fotovoltaico.

Las principales características de los robots son que no deben de pesar más de 40 gramos individualmente, ni deben contar con batería, deben tener una dimensión de 84 mm de diámetro y una altura de 38 mm, y tienen que ser iguales, no deberá existir algún tipo de maestro, esto con el fin de hacerlos reemplazables, para que, si un robot llega a quedar fuera de funcionamiento, no comprometa el objetivo de la misión.

Al ser el objetivo principal de la misión que los robots se aglomeren y se conecten eléctricamente, y al no contar con una conexión mecánica, sólo por contacto, un detector de proximidad es crucial para que un robot pueda cambiar su estado frente a un aglomerado de otros robots y es crucial para que en caso de que uno o varios robots avancen hacia este aglomerado, se pueda evitar alguna colisión que deshaga el aglomerado formado.

En este trabajo se plantea como solución un detector de proximidad magnético que podrá ser detectado por cualquier robot al tener un emisor (una bobina incrustada en el cuerpo del robot) y un sensor (una unidad de medición inercial comercial) con lo cual, cada robot podrá detectar a otros robots próximos.

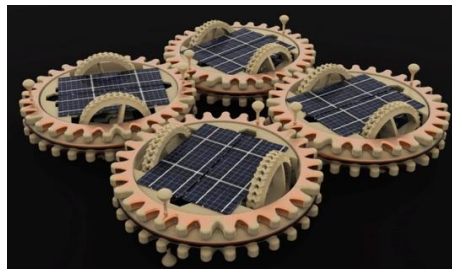


Figura 2: Aglomerado de robots realizado en LINX [1].

3. Antecedentes

Al tener un sensor magnético de proximidad, se abordan como antecedentes algunos ejemplos de sensores inductivos, así como sensores magneto resistivos, tecnología implementada en el sensor elegido para este trabajo. Se agrega un apartado sobre NFC, tecnología utilizada para transmisión de datos a través de bobinas de emisión y recepción con una energía mínima.

Sensores inductivos

Los sensores de proximidad inductivos trabajan generando un campo magnético y este se ve modificado con la presencia de objetos metálicos y no metálicos. Esto es gracias a que las líneas del campo magnético se confinan dentro del material próximo, generando corrientes inducidas en el objeto (corriente de Foucault). Esto es medible gracias a que el campo magnético oscilante aumenta su carga y genera un cambio en la amplitud del campo generado. En la figura 3 se observa con mayor detalle la operación de este tipo de sensores.

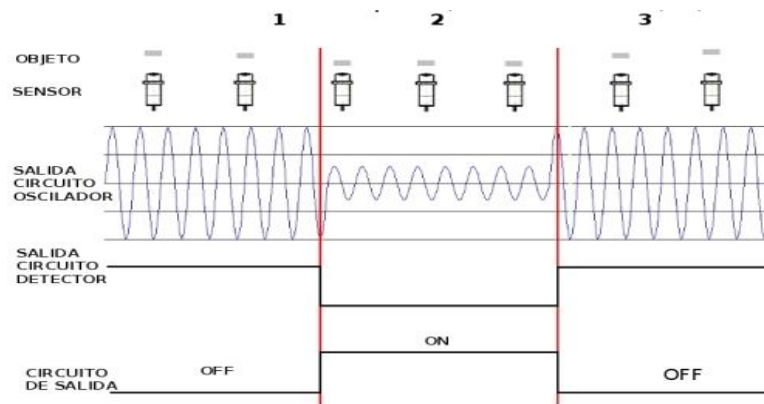


Figura 3: Operación de sensor de proximidad inductivo obtenido de [2].

a) Sensor blindado

Este sensor tiene en la parte de detección un blindaje metálico, lo que confina el campo magnético, obtenido de [3].

b) Sensor no blindado

Este sensor no tiene blindaje, lo que ofrece una distancia de detección mayor y, por ende, una mayor componente de ruido por objetos metálicos alrededor de este.

Sensor magneto resistivo

Los sensores magneto resistivos son componentes muy pequeños que están diseñados para detectar un campo magnético aplicado. Debido a que no se requiere un contacto eléctrico, el sensor puede operar a través de un espacio de aire relativamente grande. Para hacer posible la integración, los sensores magneto resistivos están diseñados para ser pequeños y operar con muy poca energía.

El efecto magneto resistivo consiste en un campo magnético aplicado a un conductor eléctrico que puede cambiar su resistencia. La resistencia aumenta o disminuye dependiendo de la orientación de las líneas de campo sobre la dirección del flujo de corriente. Un sensor magneto resistivo anisotrópico (AMR) puede compararse con el sensor de efecto Hall. En general, los sensores de efecto Hall operan a través de distancias más cortas y son menos precisos que los sensores AMR. Existe una amplia variedad de aplicaciones para los sensores magneto resistivos, la mayoría de las cuales giran en torno a la detección de la posición o la presencia de un objeto, obtenido de [4], como se muestra en la figura 4.

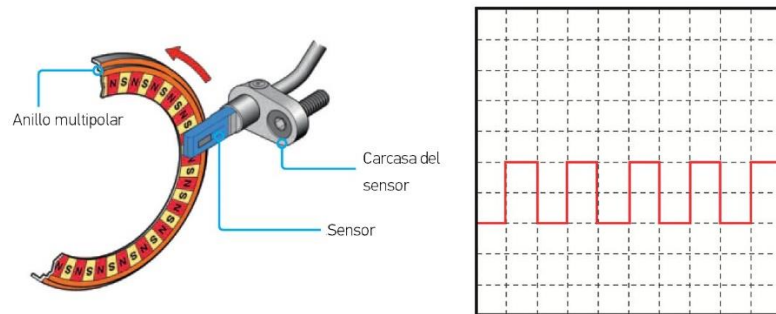


Figura 4: Aplicación de un sensor magneto resistivo y su señal de salida, mostrado en [5].

NFC

NFC (por sus siglas en inglés, Near Field Communcation) está basada en el ya existente RFID (por sus siglas en inglés, Radio-Frequency Identification). Esta tecnología utiliza inducción electromagnética para poder transmitir información a una distancia máxima de 10 centímetros.

Sus 3 principios de trabajo son:

- *Peer to peer*: Donde ambos dispositivos comparten información.
Ej. 2 teléfonos celulares.
- *Read/Write*: Donde un dispositivo envía la información y otro la recibe.
Ej. Programación de un dispositivo sin fuente de energía propia (tarjeta, identificador, etc.).
- *Card emulation*: Donde un dispositivo emula la respuesta de un dispositivo sin fuente de energía propia.
Ej. Pago de bienes y servicios con teléfono celular.

La frecuencia de comunicación del NFC es de 13.56 MHz, pudiendo transmitir la información entre 106, 212 o 424 kilobits por segundo, como se muestra en [6].

La potencia eléctrica empleada para este tipo de sistema de comunicación es 9.92 mW para emisión y 14.21 mW en transmisión [7], por lo que ya existe tecnología que ocupa inducción magnética de campo cercano para poder detectar e inclusive compartir información.

4. Fundamentos

En este capítulo se abordarán los fundamentos básicos para poder justificar y caracterizar el sistema de detección, así como el principio de funcionamiento del sensor y la tecnología que utiliza para realizar la detección del campo magnético.

4.1. Campo magnético

Un campo magnético es un campo de fuerza consecuencia del movimiento de cargas eléctricas. La fuerza o intensidad de un campo magnético se mide en Oersted o su equivalente en SI ampere sobre metro ($\frac{A}{m}$), este, al ser multiplicado por la permeabilidad del vacío, obtiene el flujo magnético medido en Gauss (G) o Teslas (T) [8]. El flujo magnético estudiado en este trabajo está definido por la ley de Biot-Savart.

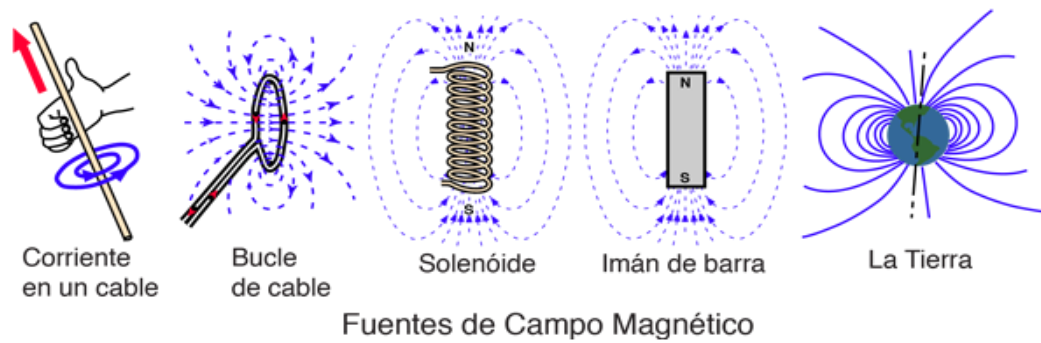


Figura 5: Fuentes de campo magnético obtenido de [9].

De la figura 5 podemos observar las diferentes fuentes del campo magnético, por mostrar algunas.

La unidad fundamental del campo magnético en el sistema CGS (Centímetro Gramo Segundo) es el Gauss (G) que equivale a 1 Maxwell entre centímetro cuadrado.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI) la unidad fundamental es el Tesla (T) que equivale a un Weber sobre metro cuadrado, un kilogramo sobre segundo al cuadrado por ampere y a un kilogramo sobre Coulomb por segundo.

Un Gauss equivale a 0.1 micro Teslas y una Tesla equivale a 10 kilo Gauss.

Es conocido que la Tierra tiene un campo magnético asociado a las corrientes eléctricas que fluyen en el interior de ella. El polo norte terrestre coincide con el polo sur magnético y el polo sur terrestre corresponde al polo norte magnético. Este campo es de la magnitud de entre 0.3 a 0.6 Gauss [10] (30 a 60 micro Teslas), que depende de la localización geográfica en la que se mida este campo, como también de la dirección de este.

4.2. Ley de Biot-Savart

La ley de Biot-Savart expresa la relación del campo magnético debido a corrientes eléctricas estacionarias. Para calcular la distribución de campo magnético en un punto específico del espacio debido a un alambre conductor, se tiene una contribución de un elemento infinitesimal de longitud $d\vec{\ell}$ del alambre conductor por donde pasa una corriente I , en un punto P, que es el punto de interés del análisis:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \times \hat{u}_r}{r^2} \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{\ell} \times \hat{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2)$$

μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío cuyo valor es $4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$.

$d\vec{\ell}$ es un elemento diferencial de distancia sobre la espira con dirección tangencial a la circunferencia de la espira (sentido igual al sentido de la corriente I).

\hat{u}_r un vector apuntando al punto P de análisis.

r la distancia entre el diferencial de distancia $d\vec{\ell}$ y el punto P de análisis.

La fórmula (1) se puede reescribir como

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\hat{u}_t \times \hat{u}_r}{r^2} d\ell, \quad (3)$$

Donde \hat{u}_t es el vector unitario de $d\vec{\ell}$, el producto cruz nos da la dirección del campo y es multiplicado por la magnitud del diferencial de distancia.

En el caso de corrientes distribuidas en volúmenes, la contribución de cada elemento de volumen de la distribución está dada por:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\hat{u}_t \times (\vec{r} - \vec{r}')}{(\vec{r} - \vec{r}')^3} d\ell, \quad (4)$$

donde \vec{r} es el vector \hat{u}_r multiplicado por la distancia r y \vec{r}' es el vector que va del origen de nuestra referencia hacia el punto P de interés.

4.3. Ley de Ampere

Establece que la integral de línea del campo magnético \vec{B} sobre cualquier trayectoria cerrada s igual a la corriente encerrada por dicha trayectoria

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{L} = I, \quad (5)$$

Donde \vec{L} es la trayectoria sobre la cual fluye \vec{B} e I es la corriente contenida en la trayectoria.

4.3.1. Teorema de Stokes

Sea una superficie dada S , acotada por una curva C de frontera y F un campo vectorial cuyas componentes poseen derivadas parciales continuas.

$$\oint_C \vec{F} \cdot d\vec{r} = \iint_S (\nabla \times \vec{F}) \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

4.4. Fuerza de Lorentz

Para saber la fuerza debida al campo magnético se define la fuerza de Lorentz como:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{V} \times \vec{B}, \quad (7)$$

donde \vec{F} es la fuerza resultante (de Lorentz).

q es la carga del portador (la carga de un electrón es $-1.6 \times 10^{-19} C$).

\vec{E} es el campo eléctrico y

\vec{V} es la velocidad del portador de carga.

4.5. Campo magnético de una espira

Al proponer en este trabajo una bobina como generador de campo magnético, tenemos que entender la interacción de la corriente suministrada a la bobina y su distribución espacial a través de la ley de Biot-Savart.

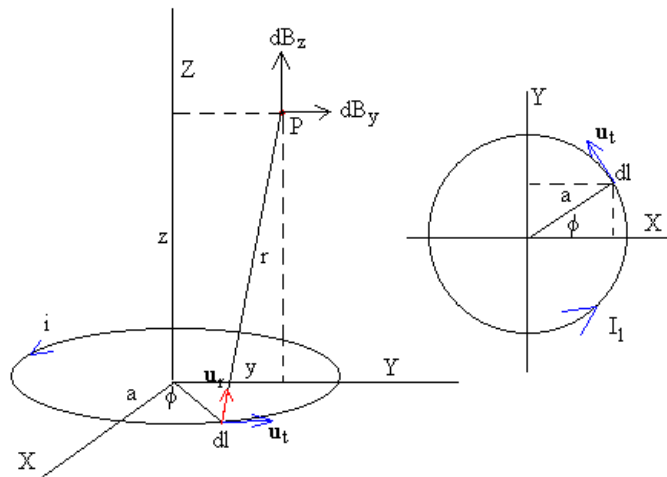


Figura 6: Campo magnético de una espira circular evaluada en un punto P mostrado en [11].

En la figura 6 se muestra una espira circular de radio a , con una corriente I en dirección levógira.

Definida la figura 6 y de la ecuación (2), podemos definir nuestro campo magnético \vec{B} :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{\ell} \times \hat{u}_r}{r^2} \quad (2)$$

De acuerdo con la geometría de la figura 6 y dada la ecuación (2), se propone hacer un cambio de variables de la siguiente forma:

$$dl = a d\phi \quad (8)$$

$$dl = -a \operatorname{sen}\phi d\phi \hat{x} + a \operatorname{cos}\phi d\phi \hat{y} \quad (9)$$

$$r = (x - a \operatorname{cos}\phi)\hat{x} - a \operatorname{sen}\phi \hat{y} + z \hat{z} \quad (10)$$

Al efectuar el producto punto de $d\vec{\ell} \times \vec{r}$ con (9) y (10) obtenemos:

$$d\vec{\ell} \times \vec{r} = (az \operatorname{cos}\phi - 0) d\phi \hat{x} + (0 + az \operatorname{sen}\phi) d\phi \hat{y} + (a^2 \operatorname{sen}^2\phi - ax \operatorname{cos}\phi + a^2 \operatorname{cos}^2\phi) d\phi \hat{z} \quad (11)$$

Podemos generar un cambio de coordenadas dada la simetría del plano XY, proponiendo cambiar $\hat{x} \rightarrow \hat{\rho}$ y $\hat{y} \rightarrow \hat{\phi}$ y sustituirla en (11)

$$d\vec{\ell} \times \vec{r} = az \operatorname{cos}\phi d\phi \hat{\rho} + az \operatorname{sen}\phi d\phi \hat{\phi} + (a^2 - a\rho \operatorname{cos}\phi) d\phi \hat{z} \quad (12)$$

Sustituyendo $d\vec{\ell} \times \vec{r}$ para las componentes de campo magnético para cada eje, tenemos las siguientes ecuaciones:

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{az \operatorname{cos}\phi}{(z^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho \operatorname{cos}\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi$$

$$B_\phi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} az \int_0^{2\pi} \frac{az \operatorname{sen}\phi}{(z^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho \operatorname{cos}\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi = 0$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{a^2 - a\rho \operatorname{cos}\phi}{(z^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho \operatorname{cos}\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi$$

Dada la simetría de la espira, el análisis se puede reducir a tener la integración de 0 a π multiplicado por un factor de 2.

$$B_\rho = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{az \operatorname{cos}\phi}{(z^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho \operatorname{cos}\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \quad (13)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a^2 - a\rho \operatorname{cos}\phi}{(z^2 + a^2 + \rho^2 - 2a\rho \operatorname{cos}\phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \quad (14)$$

Estas ecuaciones se pueden resolver dadas las funciones elípticas de [12], descritas a continuación:

$$\int_0^\pi \frac{d\theta}{(1 - m \operatorname{sen}^2\theta)^{\frac{1}{2}}} = K(m) \quad \text{con } 0 < m < 1 \quad (15)$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - m \operatorname{sen}^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta = E(m) \quad (16)$$

$$\int_0^{\pi} \frac{d\theta}{(b \pm \cos \phi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{m}{2-2m} \sqrt{2mE} \quad (17)$$

$$\int_0^{\pi} \frac{\pm \cos \phi d\theta}{(b \pm \cos \phi)^{\frac{3}{2}}} = \sqrt{2mK} - \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2mE} \quad (18)$$

De (13) y (14) y las integrales elípticas definimos las componentes del campo magnético de la siguiente manera:

De (13) y (18).

$$B_{\rho} = -\frac{az}{(2a\rho)^{\frac{3}{2}}} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{-\cos \phi}{(b - \cos \phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi = -\frac{az}{(2a\rho)^{\frac{3}{2}}} \frac{\mu_0 I}{2\pi} (-\sqrt{2mK} - \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2mE})$$

$$B_{\rho} = \frac{z \mu_0 I}{2\pi \rho} \left(\frac{m}{4a\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2-m}{2-2m} E - K \right) \quad (19)$$

De (13), (17) y (18).

$$\begin{aligned} B_z &= \frac{a}{(2a\rho)^{\frac{3}{2}}} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(a \int_0^{\pi} \frac{d\phi}{(b - \cos \phi)^{\frac{3}{2}}} + \rho \int_0^{\pi} \frac{-\cos \phi}{(b - \cos \phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \right) \\ &= \frac{a}{(2a\rho)^{\frac{3}{2}}} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(a \frac{m}{2-2m} \sqrt{2mE} + \rho \sqrt{2mK} - \rho \frac{2-m}{2-2m} \sqrt{2mE} \right) \end{aligned}$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi \rho} \left(\frac{m}{4a\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\rho K + \frac{am-(2-m)\rho}{2-2m} E \right) \quad (20)$$

Las componentes del campo B_{ρ} y B_z descritas para una espira también nos describen el flujo magnético debido a una bobina con la misma geometría con N espiras de la siguiente forma:

$$B_{\rho} = \frac{N z \mu_0 I}{2\pi \rho} \left(\frac{m}{4a\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2-m}{2-2m} E - K \right) \quad (21)$$

$$B_z = \frac{N \mu_0 I}{2\pi \rho} \left(\frac{m}{4a\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\rho K + \frac{am-(2-m)\rho}{2-2m} E \right) \quad (22)$$

Las fórmulas (19) y (20) son las fórmulas que describen el campo magnético para una espira con centro en el origen.

En la figura 7 se muestra la distribución de las líneas de campo debido a una espira con centro en el origen y de radio 1, las flechas únicamente demuestran la dirección del campo en el plano YZ, sin tener relación su tamaño con la intensidad del campo.

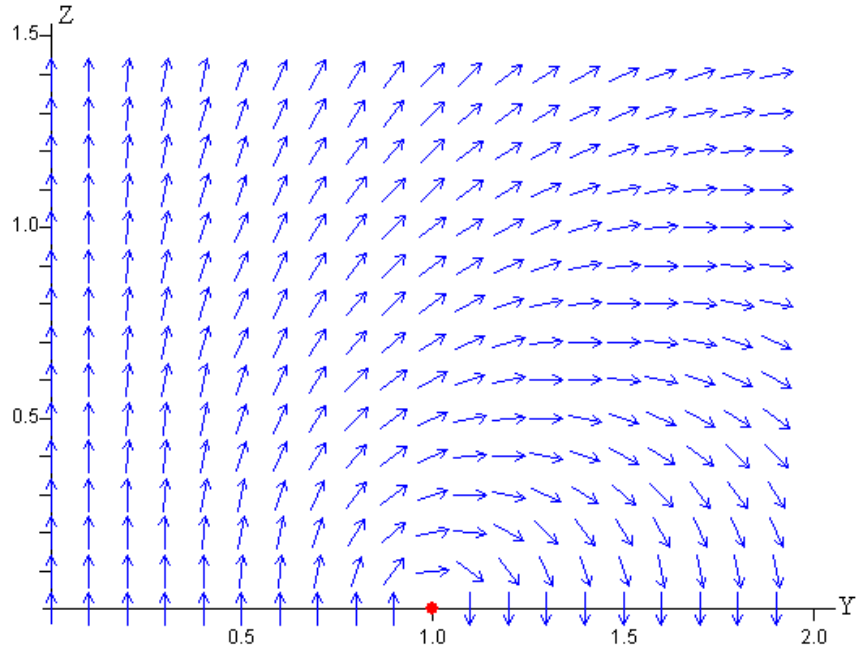


Figura 7: Dirección de las líneas de campo de una espira en el plano YZ obtenido de [9].

Para efectos de comprender mejor la magnitud de la componente Z del campo magnético, se realizó una simulación en MatLab donde se establece que P está sobre el plano XY y se varía el eje Y, donde la magnitud del campo magnético se calcula utilizando las fórmulas (15), (16) y (22). Los resultados son mostrados en la figura 8.

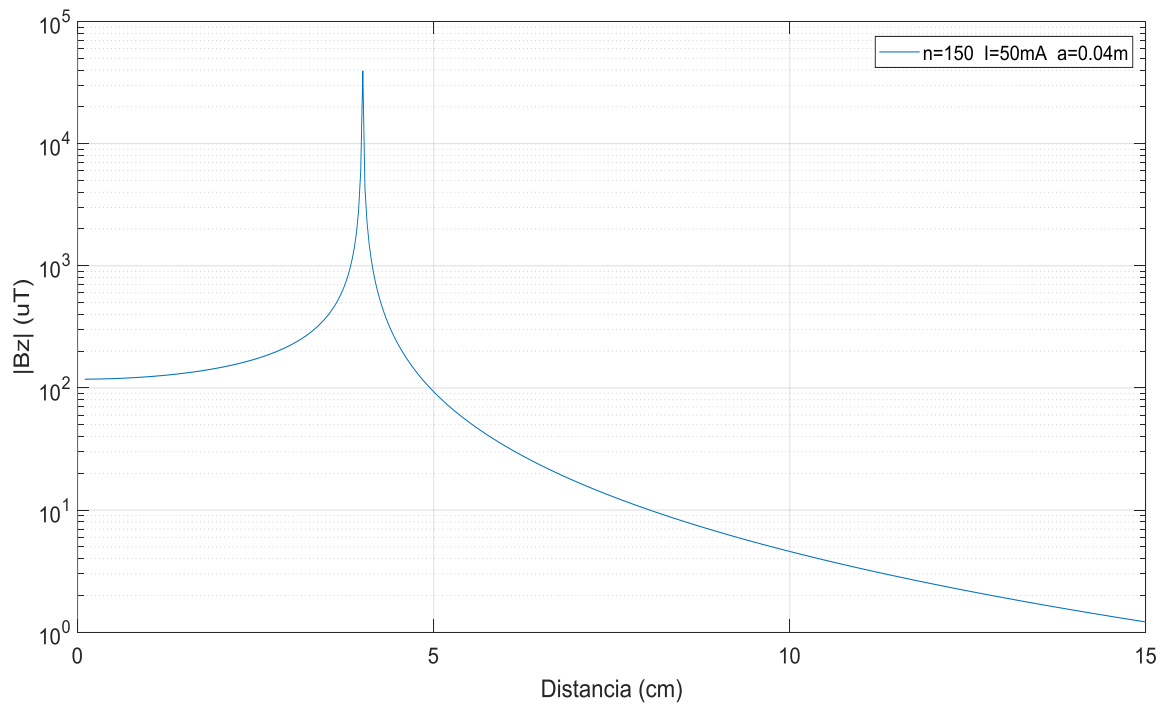


Figura 8: Magnitud del campo magnético en el eje Z de una espira.

4.6. Efecto Hall

Supongamos que se aplica a un conductor un campo magnético constante \vec{B} en la dirección del eje z y restringimos a los electrones a moverse en el plano (x,y) haciendo aparecer una corriente I en la dirección x. El Efecto Hall nos dice que esto produce un voltaje V_H en la dirección y.

Sea el material por el que circula la corriente con una velocidad \vec{V} al que se le aplica un campo magnético \vec{B} . Al aparecer una fuerza magnética $\vec{F}m$, los portadores de carga se agrupan en una región del material, ocasionando la aparición de una tensión V_H y por lo tanto, un campo eléctrico \vec{E} en la misma dirección. Este campo ocasiona a su vez la aparición de una fuerza eléctrica $\vec{F}e$ de dirección contraria a $\vec{F}m$.

Se sabe que un campo magnético actúa sobre las cargas en movimiento (fuerza de Lorentz).

Una corriente I que atraviesa un material consiste en cargas (electrones) que se desplazan (en dirección contraria a la corriente) con una velocidad que se denomina \vec{V} . Si se sumerge esa corriente de electrones en un campo magnético \vec{B} , cada uno de los electrones que forman la corriente estarán sometidos a la fuerza de Lorentz como se muestra en la figura 9.

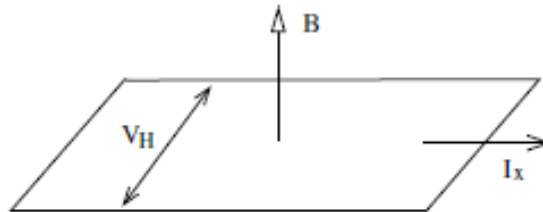


Figura 9: Voltaje de efecto Hall, de [13]

El campo magnético causa que las partículas cargadas se muevan en círculos siguiendo la ecuación de movimiento de los electrones:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{v} \times \vec{B} \quad (23)$$

Donde m es la masa del portador de carga.

Para el ejemplo anterior tenemos únicamente la componente z del campo magnético y el electrón restringido a tener velocidad únicamente en el plano x y. Por lo que la ecuación de movimiento se define en 2 ecuaciones diferenciales:

$$m\ddot{x} = -eB_z\dot{y} \quad (24)$$

$$m\ddot{y} = -eB_z\dot{x} \quad (25)$$

Donde las soluciones son de la forma:

$$x(t) = X - R \sin(\omega_B t + \phi) \quad (26)$$

$$y(t) = Y - R \cos(\omega_B t + \phi) \quad (27)$$

Definiendo también la frecuencia de ciclotrón como:

$$\omega_B = \frac{eB_z}{m} \quad (28)$$

4.6.1. Modelo de Drude

Es importante entender este concepto para entender el efecto Hall.

Se analiza el sistema anterior de la misma forma, pero ahora se excita el sistema con un campo eléctrico que ocasionará una corriente en el sentido del campo E.

Dada la corriente se genera una fricción lineal debido al movimiento de los electrones.

Nuestra ecuación cambia a:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - e\vec{v} \times \vec{B} - \frac{m\vec{v}}{\tau} \quad (29)$$

Donde la variable τ de la fricción se puede tratar como el tiempo promedio entre colisión.

Para soluciones equilibradas se busca que la derivada de la velocidad sea igual a cero por lo que tenemos:

$$\vec{v} + \frac{e\tau}{m} \vec{v} \times \vec{B} = \frac{e\tau}{m} \vec{E} \quad (30)$$

Retomamos nuestra definición de corriente (8):

$$J = e \cdot v \cdot n \cdot a \quad (8)$$

Para sustituir esta densidad de corriente en la ecuación (32) teniendo como resultado:

$$\begin{pmatrix} 1 & \omega_B \tau \\ -\omega_B \tau & 1 \end{pmatrix} J = \frac{e^2 n \tau}{m} E \quad (31)$$

De donde podemos obtener la ley de ohm:

$$J = \sigma E \quad (32)$$

Donde la conductividad la podemos expresar en función del modelo de Drude:

$$\sigma = \frac{\sigma_{DC}}{1 + \omega_B^2 \tau^2} \begin{pmatrix} 1 & \omega_B \tau \\ -\omega_B \tau & 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\sigma_{DC} = \frac{e^2 n \tau}{m} \quad (34)$$

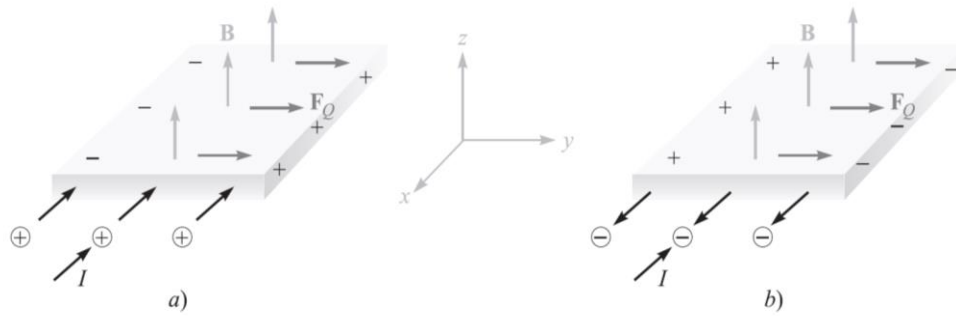


Figura 10: Efecto Hall para corrientes con distinto sentido, obtenido de [13].

En la figura 10 se observa que, al cambiar la dirección de la corriente, se cambia la polarización del material.

4.7. Teorema de muestreo Nyquist-Shannon [14]

Al tener una señal digitalizada que es adquirida por el sensor magnético comercial a utilizar, es necesario hacer procesamiento de datos digitales, donde el teorema de Nyquist-Shannon toma un importante papel.

Desarrollado por H. Nyquist, quien afirmaba que una señal analógica puede ser reconstruida, sin error, de muestras tomadas en iguales intervalos de tiempo. La razón de muestreo debe ser igual, o mayor, al doble de su ancho de banda de la señal analógica.

La teoría del muestreo define que, para una señal de ancho de banda limitado, la frecuencia de muestreo, f_m , debe ser mayor que dos veces su ancho de banda (B) medida en Hertz [Hz]. $f_m > 2 \cdot B$.

La frecuencia $2 \cdot B$ es llamada la razón de muestreo de Nyquist. La mitad de su valor es llamada algunas veces la frecuencia de Nyquist. El teorema de muestreo fue desarrollado en 1928 por Nyquist y probado matemáticamente por Claude Shannon en 1949.

4.8. MEMs [15]

La tecnología utilizada por el sensor magnético implementado es MEMs, por lo que se explica un poco el funcionamiento de estos sensores.

Los MEMs (Micro Electro Mechanical systems, por sus siglas en inglés) son un tipo de dispositivos distinguidos por su tamaño pequeño y por la manera en la que están fabricados.

Están hechos por componentes de entre 1 y 100 micras. Los MEMs pueden estar hechos de estructuras simples o múltiples partes móviles controladas por microelectrónica integrada.

Generalmente los MEMs consisten en microestructuras mecánicas, microactuadores, microsensores y microelectrónica en un empaquetado (figura 11).

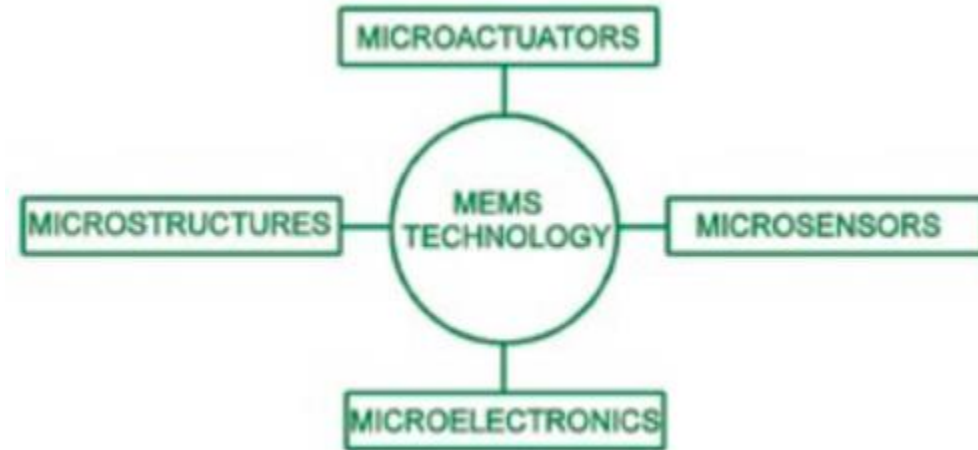


Figura 11: Tipo de tecnología MEMs, obtenido de [15].

Un ejemplo de estos dispositivos son las IMU, que son utilizadas para tener mediciones en sistemas de navegación y de geolocalización.

4.9. Ruido y fuentes de ruido en componentes electrónicos

Ruido térmico o de Johnson

Es un ruido presente en todos los elementos resistivos y es causado por la vibración microscópica de los electrones (o huecos en el caso de semiconductores) debido a la temperatura.

El ruido térmico se puede modelar como una fuente de voltaje en serie con una resistencia que para su análisis no genera ruido.

El espectro de la señal de ruido térmico es de tipo blanco, y tiene una densidad de potencia ($\frac{1}{\sqrt{\text{Hz}}}$).

$$e_{nT}^2 = 4kTR \quad i_{nT}^2 = \frac{4kT}{R} \quad (35)$$

Donde k es la constante de Boltzmann:

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{^\circ K}$$

T es la temperatura en grados Kelvin y R la resistencia de análisis:

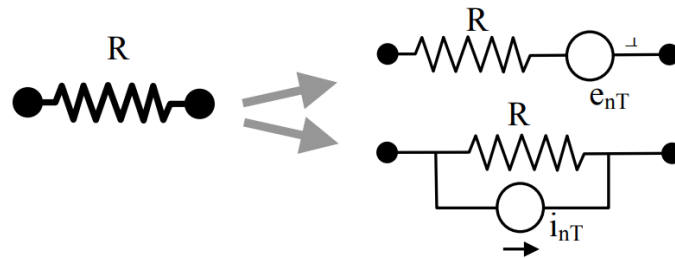


Figura 12: Modelo de análisis de ruido térmico, obtenido de [16].

En la figura 12 se muestran las resistencias equivalentes para poder realizar un análisis de una resistencia como fuente de ruido en voltaje y en corriente.

Dado que la medición de la magnitud del campo magnético está definida en el sensor comercial a utilizar por el efecto magnetoresistivo, este tipo de ruido afecta directamente la medición. Para ello la IMU tiene una corrección digital de temperatura, esta corrección es interna por lo que sólo se habilita mediante un registro de memoria.

Ruido de fluctuación (Flicker Noise)

Este ruido se presenta en todos los dispositivos electrónicos, es de tipo rosa ($1/f$) y se caracteriza por ser función de la intensidad de corriente que atraviesa el dispositivo.

$$i_{nft} = K \frac{I^\alpha}{f} \quad (36)$$

Donde K es una constante que depende del dispositivo, α es una constante propia del dispositivo y varía entre $0.5 < \alpha < 2$.

Este ruido tiene diferentes naturalezas según el tipo de elemento:

- En transistores BJT, está relacionado con el movimiento de los electrones y los huecos en las fronteras o secciones de recombinación del semiconductor.
- En las resistencias, particularmente en las de carbón, aparece como un exceso del ruido térmico, y dependen de la corriente que fluye a través de ellas.

Shot Noise

Este ruido es generado por una corriente que atraviesa un potencial y es consecuencia discreta de las cargas. Un ejemplo de este ruido es la corriente de base en los transistores BJT.

El espectro de este ruido es de tipo blanco y su densidad de potencia está dado por:

$$i_{nsh}^2 = 2eI \quad (37)$$

El valor rms del ruido para un ancho de banda BW (por sus siglas en inglés, Band Width) es:

$$I_{nsh\ rms} = \sqrt{2eIBW} \quad (38)$$

Dada la frecuencia de muestreo de la IMU se considera un ancho de banda de 80Hz definida como la máxima frecuencia de muestreo por el fabricante.

SNR

La Razón Señal a Ruido SNR (por sus siglas en inglés, Signal-to-Noise Ratio) nos ayuda a cuantificar el ruido que se presenta en una señal.

La SNR puede expresarse como:

$$SNR = \frac{\text{Potencia señal}}{\text{Potencia del ruido}} \quad (39)$$

Para obtener una SNR en decibeles se debe considerar la siguiente ecuación:

$$SNR_{dB} = 10 \log \frac{P_{medida}}{P_{ruido}} \quad (40)$$

Para el caso de tener tensiones o corrientes se pueden aplicar las siguientes ecuaciones:

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{V_{rms\ señal}}{V_{rms\ ruido}} \right)^2 = 20 \log \frac{V_{rms\ señal}}{V_{rms\ ruido}} \quad (41)$$

$$SNR_{dB} = 10 \log \left(\frac{I_{rms\ señal}}{I_{rms\ ruido}} \right)^2 = 20 \log \frac{I_{rms\ señal}}{I_{rms\ ruido}} \quad (42)$$

Ruido magnético

El ruido magnético de Barkhausen (RMB) surge cuando un material ferromagnético como el acero es sometido a un campo magnético variable. Este ruido es producido por el movimiento discreto de las paredes de los dominios magnéticos. Estos movimientos discretos o saltos generan pulsos magnéticos que pueden ser monitoreados por una bobina lectora colocada en la superficie del material. Cambios producidos en la microestructura afectan considerablemente el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, y consecuentemente las características del RMB [17].

Campo magnético de la Luna

La luna presenta un núcleo de hierro, pero para que se presente algún campo magnético debe de existir corriente dentro del cuerpo, lo cual no está comprobado que exista. Se tiene una magnetización asociada a el campo magnético de la Tierra. La figura 13 nos da una idea de las magnitudes del campo magnético en las diferentes zonas geográficas de la luna.

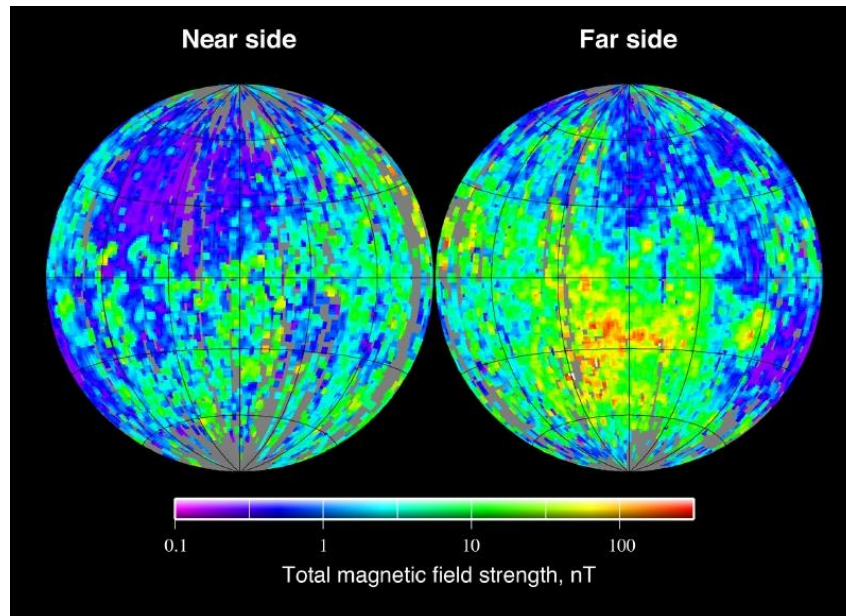


Figura 13: Campo magnético de la Luna, obtenido de [18].

Abordados los principios teóricos se puede entender el funcionamiento de las partes a continuación descritas en el capítulo siguiente.

5. Definición

En este capítulo se describen las partes del sistema, la bobina emisora y el sensor receptor, también se discuten las características de diseño, así como las consideraciones tomadas para optimizar el funcionamiento del sistema.

5.1. Objetivos y requerimientos

Al pertenecer a un sistema conformado por varios subsistemas, el sistema de detección magnético tiene requerimientos dados por la naturaleza de la misión, así como por la interacción con los demás subsistemas.

Se presenta la Tabla 1 con los requerimientos para este subsistema:

Tabla 1: Requerimientos del sistema de detección de cercanía.

Requerimiento	Valor	Unidad
Temperatura de operación	0 a 80	°C
Temperatura de almacenamiento	-100 a 100	°C
Peso	2	gramos
Energía disponible	165	mW
Presión	0	kPa
Radiación Total	60	kRads
Aceleración	8	g (aceleración)
Distancia de detección	4	cm

A partir de los requerimientos de la Tabla 1 podemos definir los objetivos como:

- Diseñar e implementar un sistema magnético capaz de detectar a otros iguales a una distancia de al menos 4 cm.
- Comprobar teórica y experimentalmente la funcionalidad del sistema.
- Implementar el sistema en el robot lunar de acuerdo con los requerimientos.

Como propuesta para los objetivos de este trabajo, se planteó un sistema conformado por un sensor magnético comercial y una bobina que funcionaron como emisor y detector para poder cumplir estos objetivos.

5.2. Sensor Magnético

5.2.1. IMU

La IMU (por sus siglas en inglés, Inertial Measurement Unit) es un módulo de medición de 3 sensores con 9 grados de medición:

- Acelerómetro (G_x, G_y, G_z)
- Giróscopo ($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$)
- Magnetómetro (M_x, M_y, M_z)

La IMU utilizada en este sistema es un módulo comercial elegido por su rango, resolución, integración de los 3 sensores antes mencionados y su temperatura de operación. El modelo de la IMU es LSM9DS1, fabricado por ST microelectronics con tecnología MEMS (por sus siglas en inglés, Micro Electro Mechanical System), utiliza la magneto-resistencia para la medición de la magnitud del flujo magnético.

Para efectos de este trabajo sólo se consideraron los 3 grados de medición del magnetómetro. Este sensor trabaja bajo la detección de efectos de la fuerza de Lorentz: cambios en el voltaje y corriente en la medición (efecto magneto resistivo), que se utiliza comúnmente en sensores MEMs como la IMU utilizada para este trabajo (figura 14).



Figura 14: IMU en tarjeta de desarrollo.

5.2.2. Resolución y rango dinámico

De la hoja de datos del fabricante de la IMU se puede escoger entre las siguientes características del magnetómetro:

Tabla 2: Resolución y rango dinámico en Gauss.

Rango dinámico	Unidad	Resolución	Unidad
±4	gauss	0.14	mgauss/LSB
±8	gauss	0.29	mgauss/LSB
±12	gauss	0.43	mgauss/LSB
±16	gauss	0.58	mgauss/LSB

Tabla 3: Resolución y rango dinámico en Teslas.

Rango dinámico	Unidad	Resolución	Unidad
±0.4	mteslas	14	nteslas/LSB
±0.8	mteslas	29	nteslas/LSB
±0.12	mteslas	43	nteslas/LSB
±0.16	mteslas	58	nteslas/LSB

Donde LSB (por sus siglas en inglés, Least Significant Bit).

Los datos enviados por el magnetómetro están en bits, por lo que es necesario multiplicar los datos enviados por la resolución asociada al rango dinámico escogido para la medición. En este trabajo se programó un rango de ± 4 gauss que corresponde a una resolución de 0.14 mgauss/LSB.

5.2.3. Velocidad de Medición

Al tener un sistema de emisión y de detección del campo magnético, se estableció que, al tener un campo magnético conmutado, la detección de los robots se podría simplificar a una detección de frecuencia en donde la señal detectada es el campo magnético y el procesamiento de estos datos se realiza a partir de la frecuencia de esta señal, dando como resultado una detección de los robots a partir de una detección en frecuencia.

La frecuencia de conmutación del campo magnético depende de:

- Velocidad de movimiento del robot:
 $1(\text{m}/\text{min}) = 5/3 \approx 1.67 (\text{cm}/\text{seg})$
- Distancia de detección óptima:
Radio/2 es la distancia de diseño del sistema, al tener 8cm de diámetro el robot, la detección se tiene que hacer a 4 cm de borde a borde de robots.
- Frecuencia de detección máxima del sensor:
De la hoja de datos de la IMU obtenemos que la frecuencia máxima de medición para el magnetómetro es de 80 Hz, y por el teorema de muestreo de Nyquist Shannon la frecuencia máxima del campo tiene que ser menor o igual a 40 Hz.
- Tiempo de procesamiento de fase y amplitud del microcontrolador:
Al tratarse de una señal digital se tiene que realizar un procesamiento de amplitud mediante software para poder medir la fase en la que se está detectando el campo magnético. Para esto se aplica un algoritmo de transformada de Fourier que tiene un tiempo de procesamiento de 200 milisegundos (1/5 segundos).

Bajo estos parámetros y dado que el procesamiento de datos los realizará un microprocesador, se definió una frecuencia de conmutación de 20 Hz, esta frecuencia cumple con el teorema de Nyquist-Shannon y no está en las frecuencias del ruido magnético, lo que facilita el procesamiento y la detección de los robots.

5.2.4. Esquemático de sensor

A continuación, se presenta el diagrama a bloques del magnetómetro y el diagrama eléctrico de la IMU implementado en este sistema, tomados de la hoja de datos del fabricante (figuras 15 y 16).

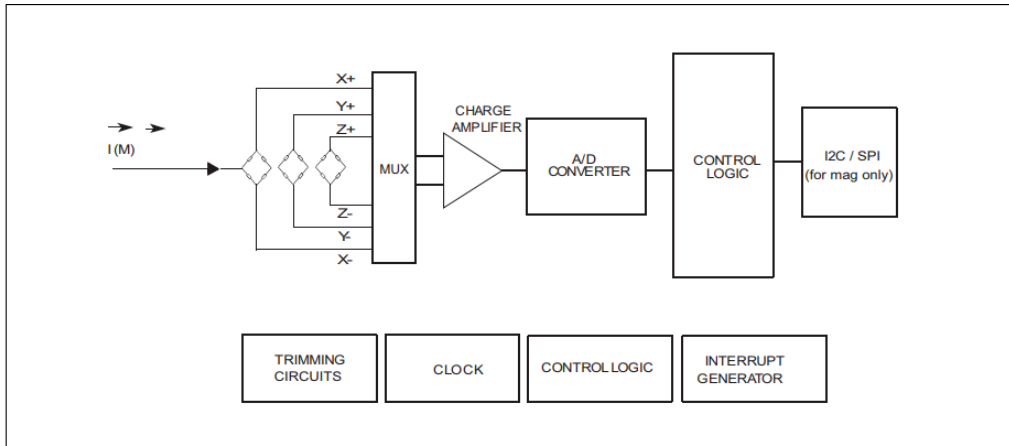


Figura 15: Sistema a bloques del magnetómetro dentro de la IMU, obtenido de [19].

De acuerdo con el fabricante, la medición del campo magnético es realizada a través de electrodos positivos y negativos para cada eje de medición (X, Y y Z) que funcionan bajo el principio de un electroimán, el cual tiene una relación entre intensidad de campo magnético y potencia eléctrica, descrita por la fuerza de Lorentz.

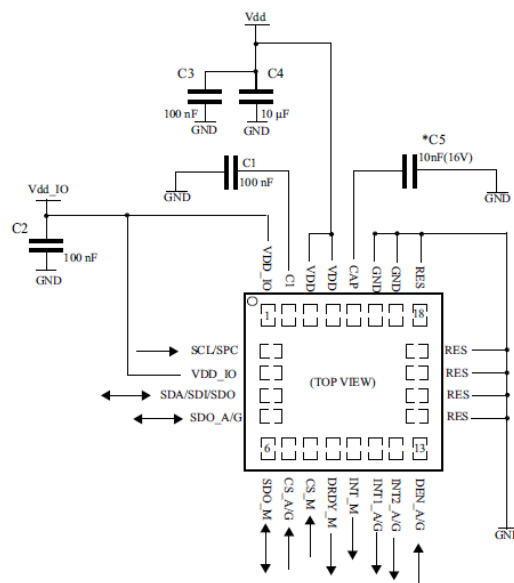


Figura 16: Diagrama eléctrico de IMU LSM9DS1, obtenido de [19].

5.3. Bobina

La naturaleza para generar un campo magnético debido a una corriente eléctrica es aprovechada en este trabajo pudiendo utilizar una geometría dinámica a través de un conductor. Para este trabajo se propuso utilizar una bobina con el fin de tener una distribución de campo magnético omnidireccional en el perímetro de los robots con forma de disco. La dirección de las líneas del campo magnético en una bobina puesta sobre el mismo plano en el que se encuentran los robots nos ayuda para que sea detectado por cualquier otro robot en la cercanía sin tener restricciones en la orientación en la cual se encuentre tanto el emisor como el receptor.

Se diseñó e implementó una bobina de N espiras de alambre magneto (cobre) para ser embebida en el cuerpo del robot con el objetivo de cumplir las especificaciones de peso y volumen destinado para el sistema de detección y tener el máximo campo magnético con la potencia eléctrica disponible.

Las espiras implementadas fueron probadas para que, al tener una corriente a través del embobinado, se tiene un flujo de campo magnético que puede ser detectado por la IMU a cierta distancia. Estas bobinas son de los primeros prototipos del sistema.

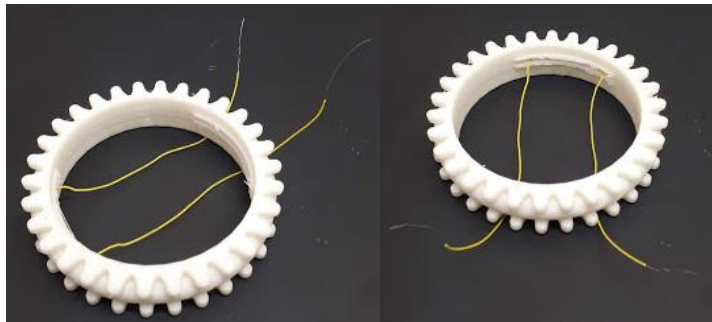


Figura 18: Prototipo de bobina embebida en estructura de robot.

En la figura 18 se muestran los prototipos de las bobinas embebidas en el cuerpo de los robots con ayuda de la manufactura aditiva propuesta para el cuerpo de los robots entre otras partes mecánicas de estos.

Como parte de la etapa de emisor (bobina), se implementó un opto-MOSFET (figura 19) con el fin de aislar eléctricamente la corriente que circula a través de la bobina y la señal auxiliar proveniente del microcontrolador, una señal PWM (por sus siglas en inglés, Pulse Width Modulation) a 50% de ciclo de trabajo o duty cycle que hace que el campo oscile con la forma de una onda cuadrada.

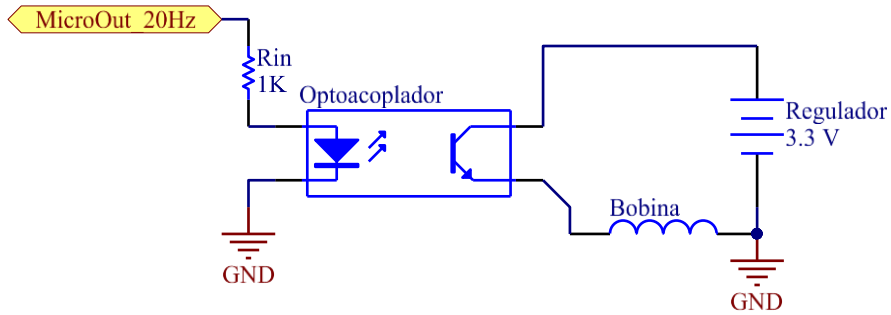


Figura 19: Diagrama del circuito eléctrico de bobina.

5.4. Fuente de energía

La fuente principal de energía para este sistema y para los robots es un arreglo de celdas solares fotovoltaicas (figura 20) que poseen una eficiencia del 22% (mayor a la eficiencia de las celdas comerciales). Este arreglo de celdas nos da como resultado un panel solar con una potencia nominal de 625.5 mW. Esta potencia presenta restricciones debido a la temperatura de operación, la latitud estimada de alunizaje y la eficiencia del regulador de voltaje (90%), dándonos como resultado una potencia estimada de 459.73 mW para alimentar todo el robot.

Dado que la operación del robot requiere tener un microcontrolador encendido y sensores activos, la potencia que se calcula que consumirá el sistema es considerando el uso de estos recursos.

Esta potencia máxima está estimada en condiciones de máxima radiación sobre el panel, lo cual es un escenario ideal.

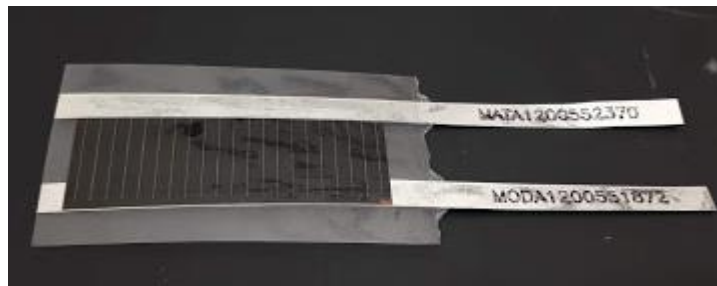


Figura 20: Celda fotovoltaica de alimentación del robot.

6. Implementación

En este capítulo se caracterizan los parámetros de cada parte del sistema conjuntando todas las partes antes analizadas e implementadas en un único sistema implementado en los robots.

6.1. Corriente, resistencia, peso y número de vueltas

Tal como se muestra en la Tabla 1, se tienen 2 gramos disponibles para el sistema de detección, por lo que partiendo de este requerimiento, se analizaron 4 calibres diferentes de alambre magneto y se obtuvo el número de espiras máximas para cada calibre.

Tabla 4: Relación de número de vueltas máxima debido al peso del cobre.

Calibre AWG	Densidad del cobre (g/cm ³)	Área transversal (cm ²)	Perímetro de la espira (cm)	Numero de vueltas máximas
#37	8.96	10x10 ⁻⁵	(363/50) π	97.9 ~ 98
#38		8x10 ⁻⁵		123.9 ~ 124
#39		6 x10 ⁻⁵		155.3 ~ 155
#40		5x10 ⁻⁵		195.7 ~196

La tabla 4 nos da la relación del número máximo de espiras según el calibre del alambre y el peso máximo permitido para la bobina.

A partir del número máximo de vueltas se calcula el número máximo de vueltas que se obtiene de la potencia disponible para el sistema.

- Diámetro de la bobina = 363/50 cm
- Perímetro de la bobina = longitud de una vuelta de la bobina = diámetro *π = 363/5000*π

La resistividad de la bobina total está constituida por la siguiente fórmula:

$$R(\tau) = R_0(1 + \alpha(\tau - \tau_0)) \quad (43)$$

R_0 es la resistividad del material a 20°C = 1/56

Donde α es la constante de proporción propia del material, para el cobre, es $\alpha = 0.00393$

τ es la temperatura de operación (dados los requerimientos de la misión se consideran 80°C)

τ_0 es la temperatura de $R_0 = 20^\circ\text{C}$.

De acuerdo con la fórmula (43) se establece el valor de resistividad para el cobre y se calcula la resistencia de una espira con diámetro 363/50 cm:

Tabla 5: Resistencia del cobre en relación con el calibre del alambre.

Calibre AWG	Sección transversal en mm ²	Resistividad en Ω por metro	Resistencia en Ω a 80°C por vuelta
37	0.010	2.207	0.503
38	0.008	2.793	0.637
39	0.006	3.503	0.799
40	0.005	4.414	1.007

Al tener una potencia máxima de operación de 459.73 mW para todo el sistema, se considera la potencia de operación del microcontrolador que opera el sistema, así como la eficiencia del regulador que nos da un consumo de 95.46 mW, dejando al resto de los subsistemas con una potencia máxima de 364.27 mW.

De la Tabla 1 de requerimientos se tiene que el subsistema tiene una potencia límite de 165 mW para lo que se establece una corriente límite de operación de:

$$\frac{165 \text{ mW}}{3.3 \text{ V}} = 50 \text{ mA}$$

Al tener una corriente límite, se establece el número de vueltas óptimo para cada calibre:

$$I = \frac{V}{R_{\text{espira}} * N} \quad (44)$$

Tabla 6: Factor máximo de N*I.

Calibre AWG	Resistencia en Ω a 80°C por vuelta	Factor de Corriente por Vueltas N*I máximo
37	0.503	6.56
38	0.637	5.18
39	0.799	4.13
40	1.007	3.27

El factor N*I nos da el factor máximo con el que se multiplica la integral como se explicó en la fórmula (22), en donde el número de vueltas de la bobina multiplica directamente el campo magnético. Este factor es obtenido dada la fórmula (44) donde se considera la resistencia de cada vuelta, por lo que a cierto número de vueltas se tiene una resistencia que limita el paso de la corriente y decrece de 50 mA.

Con la Tabla 5 y Tabla 6 se obtiene el número de vueltas y el calibre del alambre con el cual se fabricará la bobina.

Tabla 7: Corriente de operación para vueltas máximas.

Calibre AWG	Número máximo de vueltas por peso	Corriente en bobina Debido al factor N*I mA	Factor N*I Para 50 mA
37	97.9	67	4.895
38	123.9	42	5.18
39	155.3	27	4.13
40	195.7	17	3.27

De la Tabla 7 se observa que el calibre 38 AWG cumple los requerimientos de masa y corriente del sistema y posee un factor de multiplicación N*I máximo para el campo magnético.

6.2. Energía consumida por el sistema

Dada la tabla 1 de requerimientos, se estableció un nivel de energía (165 mW) que no es mayor a la potencia máxima entregada por los paneles solares (459.73 mW), ni cumple con una potencia crítica que comprometa el estado general del robot en operación.

La energía necesaria para el sensor magnético proviene del sistema de potencia propuesto: las celdas solares fotovoltaicas como fuente principal del sistema y un súper capacitor (figura 21) implementado como reserva de energía para casos críticos donde la energía entregada por los paneles no sea suficiente para saciar las necesidades del sistema.

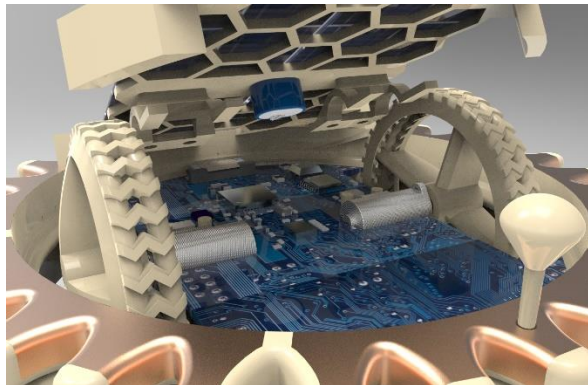


Figura 21: Localización esperada de la reserva temporal de energía obtenida de LINX [1].

6.3. Fabricación y ensamblado de bobina

La bobina antes descrita fue construida con alambre magneto de calibre 38 AWG (por sus siglas en inglés, American Wire Gauge) que está constituido por cobre en su totalidad, recubierto con un esmalte aislante para poder producir un embobinado sin perder la trayectoria deseada de la corriente. Se eligió el alambre magneto por sus características de conductividad y resistividad similares a las propiedades del cobre.

Para darle la forma y volumen de la cavidad interna del cuerpo del robot, se utilizó manufactura aditiva (impresión de polímero en 3D) para generar un molde (figura 22) en donde se enrolla manualmente la bobina para después ser montada en el cuerpo del robot.



Figura 22: Molde de montaje de bobina.

Terminado el embobinado del alambre sobre el molde, se soldaron en las terminales de la bobina 2, alambres con recubrimiento plástico de calibre 28 con el fin de reforzar las puntas de la bobina que salen del cuerpo del robot hacia la conexión con la PCB. Para poder desmoldar la bobina y no perder la forma del molde se utiliza un esmalte adicional para embobinados, que se coloca al tener la bobina sobre el molde, después de haberle colocado el alambre en las puntas de la bobina. Teniendo el embobinado rígido, se desmolda y se monta sobre el cuerpo del robot (figura 23) a media manufactura, para después terminar con la impresión del cuerpo y tener la bobina encapsulada dentro del cuerpo del robot (figura 24).

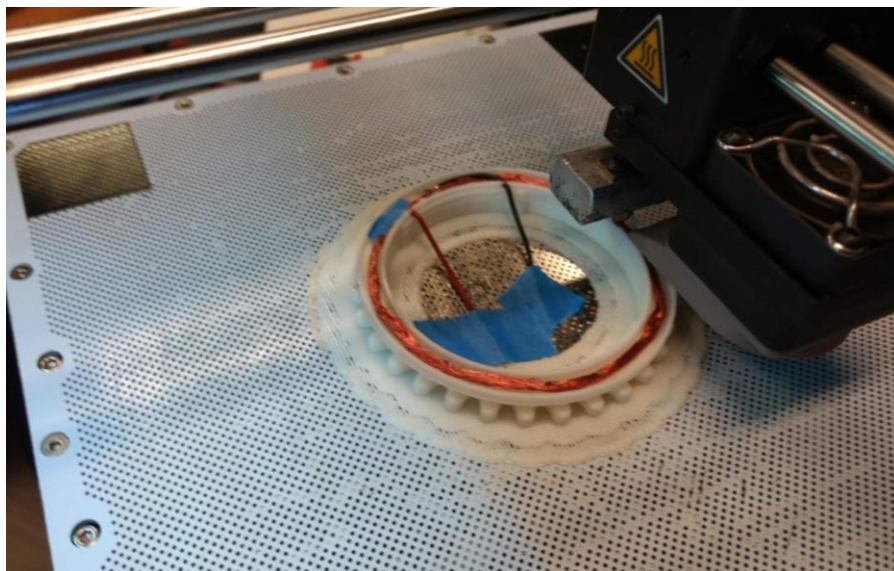


Figura 23: Montado de la bobina sobre cavidad del cuerpo del robot.

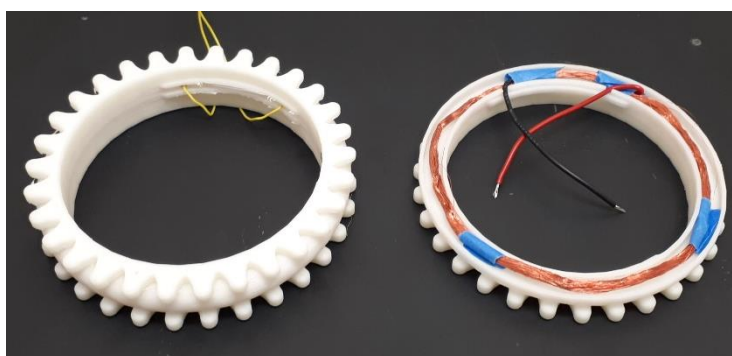
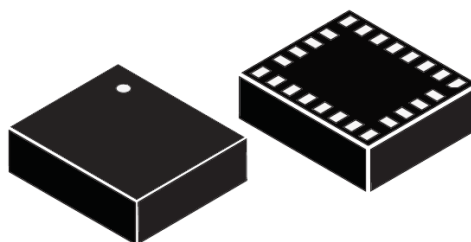


Figura 24: Cuerpo del robot con bobina embebida.

6.4. Montaje del sensor magnético

El circuito integrado en el cual está embebido el sensor magnético está definido como IMU, que tiene la apariencia y las medidas de la Figura 25.



LGA-24L (3.5x3x1.0 mm)

Figura 25: Unidad de Medida Inercial (IMU) obtenido de la hoja de datos [19].

Para su implementación se consideró el diagrama eléctrico de la Figura 16 y se siguieron las recomendaciones de soldado a la PCB de acuerdo a su hoja de datos [19], el ensamble del circuito integrado a la PCB así como sus componentes descritos en el diagrama eléctrico fueron soldados a mano para realizarle pruebas de compatibilidad, posteriormente se utilizará una línea de manufactura de PCB disponible en el laboratorio para su montaje y soldado.

A continuación, se muestra en la figura 26 el circuito impreso en la PCB correspondiente al circuito de la IMU así como la misma soldada sobre la PCB y sus componentes asociados (Figura 27).

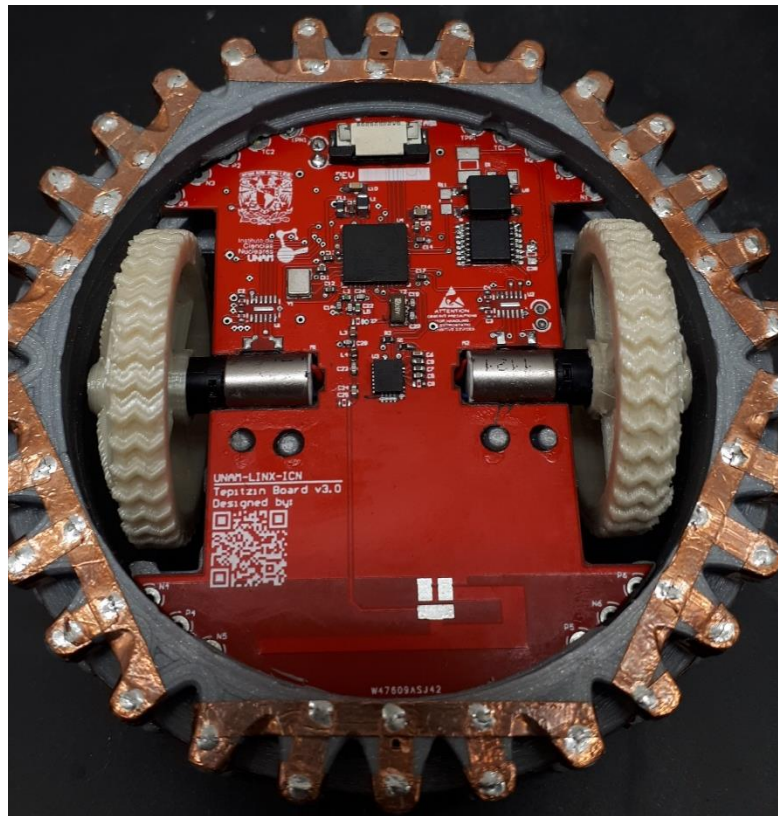


Figura 26: PCB con IMU.

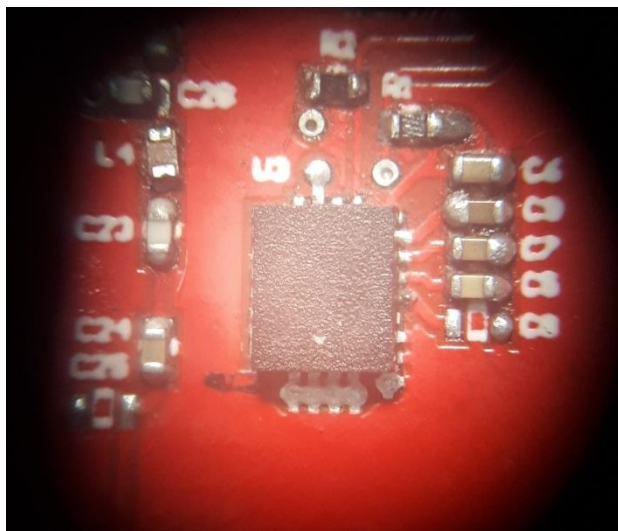


Figura 27: IMU montada sobre placa vista al microscopio.

Al tener montada la PCB sobre la estructura del robot, se soldaron las terminales de la bobina en las hendiduras correspondientes de la PCB para finalizar el ensamblado de sistema de detección en el robot.

6.5. Algoritmo de detección

Al tratarse de una señal digital, se tiene que realizar un procesamiento de la magnitud del campo magnético conmutado detectado mediante software para poder medir la fase a la que se está conmutando el campo magnético. Para esto se aplica un algoritmo de transformada de Fourier con el fin de obtener la componente fundamental en frecuencia y compararla con la frecuencia de conmutación del campo magnético, el cual es conocido dado que se programa en todos los robots la misma frecuencia. Este algoritmo fue implementado por Manuel Andrés Herrera Juárez como parte de su servicio social. La misión, así como los subsistemas están integrados por varios alumnos que trabajamos en conjunto para poder realizar una operación óptima de los robots.

6.5.1. Conmutación del campo magnético

Dada la velocidad de medición necesaria para poder detectar un robot antes de una colisión, se establece una frecuencia de 20 Hz para la oscilación del campo generado por la bobina. La señal auxiliar proveniente del microcontrolador es de forma cuadrada con una frecuencia de 20 Hz y un ciclo de trabajo de 50%. Esta frecuencia está dentro de los parámetros de diseño establecidos y no genera ningún tipo de interferencia con algún otro subsistema del robot.

Se programó una frecuencia de medición de 80 Hz, que es la frecuencia máxima que el magnetómetro puede operar de acuerdo con la hoja de datos. Esta frecuencia nos da 80 muestras por segundo y dado el tiempo de procesamiento de los datos, el tiempo que tardará el robot en detectar un robot cercano es de 1.2 s, si está en movimiento tendrá una distancia, antes de la colisión, de 2 centímetros.

6.5.2. Filtro de los datos de entrada

Al tener una medición a una frecuencia de 80 Hz y en un ambiente con ruido magnético (campo magnético terrestre, cuerpos ferromagnéticos entre otros) es natural pensar en aplicar un filtro a la señal adquirida para poder obtener la información deseada de la señal, discriminando algunas componentes no deseadas inmersas en la medición.

En la teoría de filtros digitales se utilizan filtros FIR (por sus siglas en inglés, Finite-Impulse-Response) para sistemas en los cuales su respuesta al impulso tenga un número finito de entradas distintas de cero. Este filtro tiene como propiedad el considerar un “promedio” de los datos anteriores al actual, lo cual genera una ponderación al nuevo dato, lo que nos genera un filtro con memoria de acuerdo con los datos analizados. Dado que el sistema de prevención de colisión mencionado en este trabajo cumple con las condiciones de ser un sistema con un número finito de entradas distintas de cero se puede aplicar un filtro FIR para su aplicación [20].

Un ejemplo de este tipo de filtros es el filtro de promedio variable exponencial EMA, obtenido de [21], (por sus siglas en inglés, Exponential Moving Average) el cual cumple la siguiente ecuación:

$$A_n = \alpha M + (1 - \alpha)A_{n-1}, \quad (45)$$

Donde:

- A_n es el valor filtrado.
- α es una constante entre 1 y 0.
- M es el valor nuevo o valor por filtrar.
- A_{n-1} es el valor anterior.

La constante α condiciona el comportamiento del filtro relacionada con la frecuencia de corte. Esta constante puede tomar valores entre:

$\alpha = 1$ donde la señal filtrada es igual a la señal de entrada y no hay efecto del valor anterior.

$\alpha = 0$ donde la señal filtrada es igual a cero ya que ya no se agrega valor a la medición anterior.

Se determinó utilizar un filtro EMA dados los resultados favorables experimentales que nos arrojó la implementación de este filtro (figuras 28 y 29). Se implementó por igual un filtro de promedio variable obteniendo resultados no favorables para la detección de la fase en el procesamiento de las mediciones realizadas por la IMU.

6.5.3. Filosofía de algoritmo

Inicialmente el algoritmo propuesto para este sistema constaba de adquirir datos en una ventana de tiempo determinada por la frecuencia de muestreo y la cantidad de datos a analizar. Estos datos eran filtrados por el filtro EMA y se obtuvo un valor promedio, al hacer un barrido de los datos almacenados, se contaba el número de datos que hacen cruce por el promedio para así poder definir una frecuencia fundamental de la señal analizada. Este algoritmo fue sustituido por un algoritmo de transformada de Fourier ya que lleva a una mejora en el tiempo de procesamiento y un menor espacio en la memoria. Es importante mencionar que el algoritmo de detección también cuenta con restricciones dadas por los algoritmos de los demás subsistemas, así como la naturaleza de la misión y el objetivo principal de esta. Los resultados de estas mediciones, así como el despliegue de datos del microcontrolador se muestran en la sección 6.2 de los resultados.

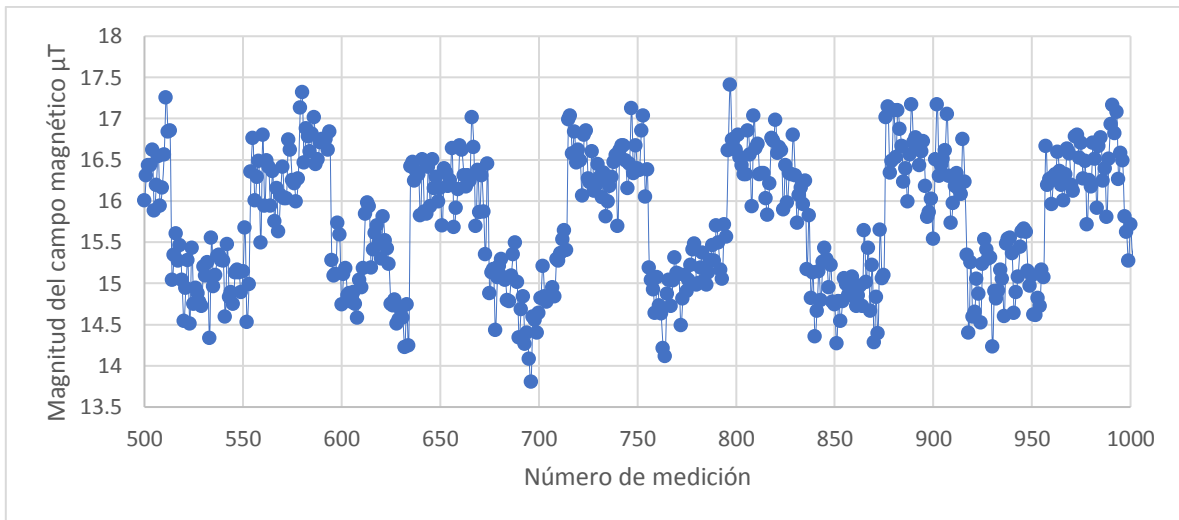


Figura 28: Señal sin filtro a 1 cm de distancia de robot a robot.

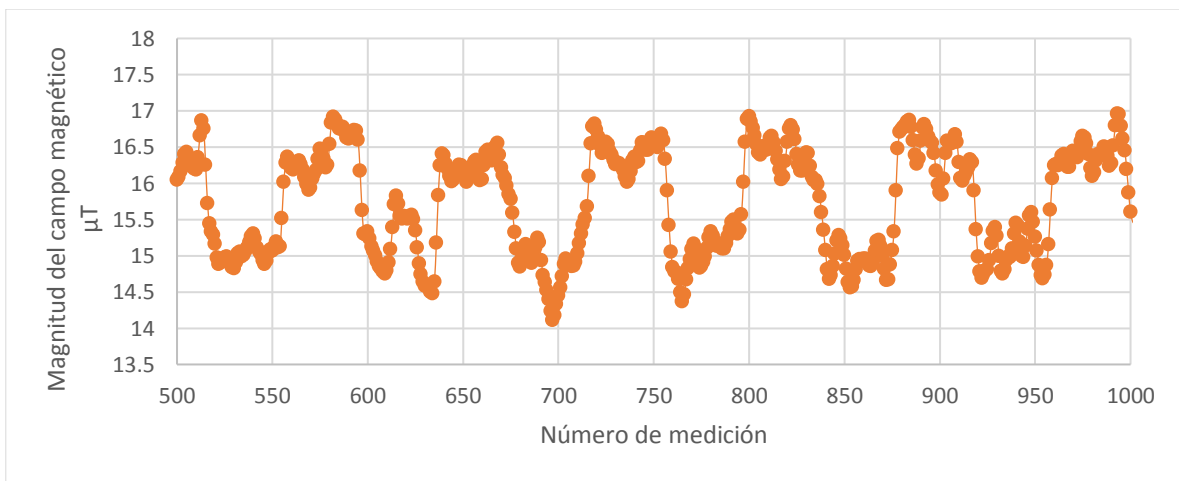


Figura 29: Señal con filtro a 1 cm de distancia de robot a robot.

De acuerdo con la fórmula (46), de forma experimental se estableció una α de 0.65 para el diseño del filtro EMA.

En la Figura 30 se describe el algoritmo de detección en un diagrama a bloques, donde se adquiere la señal, se filtra a través de un filtro EMA, se obtiene el promedio de la señal, se realiza la transformada de Fourier para obtener la frecuencia fundamental y se compara esta frecuencia con la programada en los robots, de ser igual se valida la presencia de uno o varios robots, si no es igual se continúa con la rutina del robot.

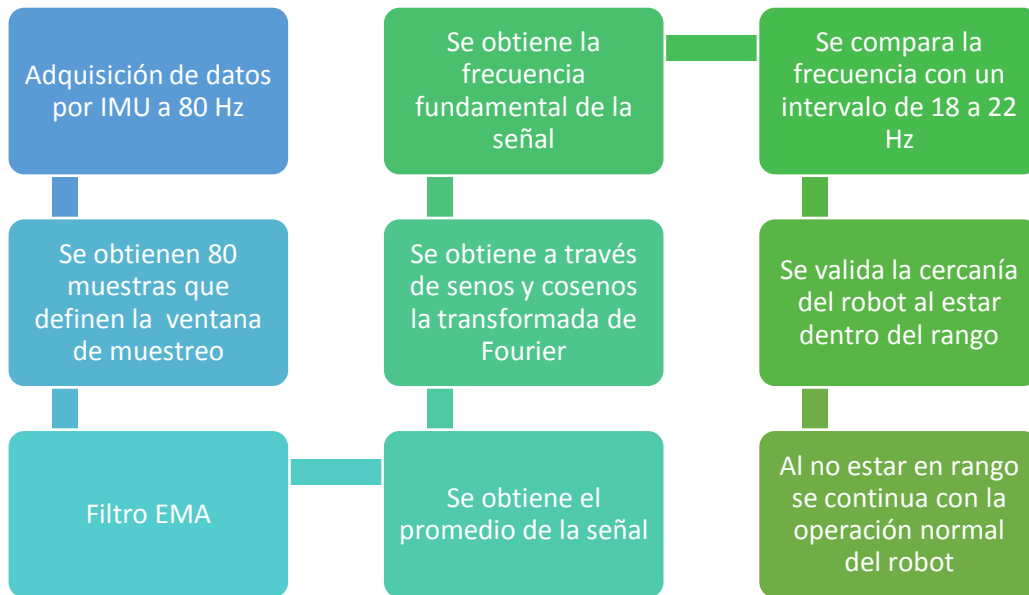


Figura 30: Diagrama de flujo del algoritmo de detección, creado por [22].

6.5.4. Calibración

Al tener un sensor montado en una PCB diseñada para este robot, se tiene que realizar una calibración del sensor debido a su exposición a alta temperatura de soldado y al manejo de la PCB para ensamblar los demás componentes que conforman el robot.

El fabricante garantiza una calibración al comprar el sensor, pero no conserva esta calibración al ser manipulado para su montaje, transporte, etc.

Se planteó una calibración mediante matrices que son programadas dentro del software, mediante la transformación de las lecturas para poder tener lecturas lo más cercanas a el valor real. Esta calibración funciona muy bien en Tierra ya que se pueden tener referencias de los valores leídos por la IMU y se puede modificar la matriz a medida que se vayan realizando mediciones y pruebas con el robot, caso contrario de la luna, donde no se tienen referencias reales de los valores medidos y la calibración está programada desde Tierra, siendo este un punto de error en las mediciones.

Para efectos de este trabajo se consideró únicamente la calibración dada por el fabricante y se consideraron los valores leídos por el magnetómetro como valores relativos sin afectar el funcionamiento del sensor de proximidad.

6.5.5. Ruido del sistema

A partir de las figuras 29 y 30 y de la operación magneto resistiva del sensor, se definen los ruidos presentes en la medición. Es importante mencionar que la corriente para el cálculo de los diferentes ruidos internos del sensor son las inducidas por el campo de la bobina a una distancia de 4 cm del sensor y las corrientes para componentes electrónicos del sensor serán consideradas como la consumida por el circuito integrado, teniendo habilitado únicamente el magnetómetro.

Ruido térmico

De la fórmula (37) tenemos que:

$$e_{nT}^2 = 4kTR \quad i_{nT}^2 = \frac{4kT}{R}$$

Donde $k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{^\circ K}$

Y R es la resistencia del arreglo descrito en la figura 15

$$i_{nT}^2 = \frac{4kT}{R} = \frac{4(1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{^\circ K})(353.15 \text{ } ^\circ K)}{R}$$
$$i_{nT}^2 = \frac{1.9494 \times 10^{-20} J}{R}$$

Ruido Shot Noise

De la fórmula (40) tenemos que:

$$I_{nsh \text{ rms}} = \sqrt{2eIBW}$$

Donde e es la carga del electrón $e = -1.6 \times 10^{-19} C$

BW es el ancho de banda de trabajo $BW = 20 \text{ Hz}$

$$I_{nsh \text{ rms}} = \sqrt{2eIBW} = \sqrt{2(-1.6 \times 10^{-19} C)(1 \times 10^{-3} A)(80 \text{ Hz})}$$
$$I_{nsh \text{ rms}} = 0.16 \times 10^{-9} A$$

Gracias a estos resultados, se observó que las magnitudes de los ruidos debido a las corrientes no son representativas para las magnitudes de corrientes en las que opera el sistema (de 1 mA a 42 mA). Existen otros ruidos como los magnéticos o los propios de la medición que sí son representativos y se trataron de mitigar mediante software como se describe en la sección 5.5 de la Instrumentación.

Al definir y profundizar en las partes del sistema, se puede continuar en los resultados obtenidos como se mostrarán en el siguiente capítulo.

7. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la interacción de varios sistemas, así como la comprobación de los objetivos propuestos. También se discuten los resultados realizados en diversas pruebas al interactuar varios sistemas similares.

7.1. Resultados experimentales

7.1.1. Sistemas interactuando

Se construyeron 4 sistemas de sensor con bobina que a través de la conmutación del campo magnético, se pueden detectar uno a otro a través de frecuencia a una distancia de 4 centímetros de borde a borde de los robots.

Con el objetivo de probar los sistemas interactuando, se realizó la prueba de detección con 2 y 3 sistemas en el perímetro de 4 cm y se validó la detección de estos como se muestra en la figura 31.

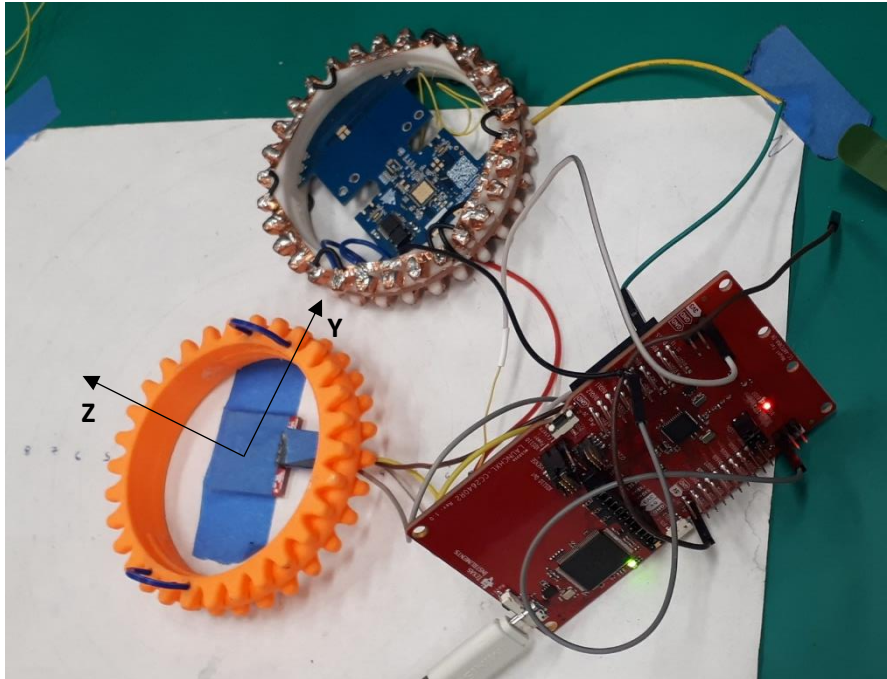


Figura 31: Sistema de emisión y detección por microcontrolador.

Este sistema fue probado mediante el movimiento manual de los robots y se realizaron mediciones del campo magnético de los motores disponibles, los cuales no generaban ningún tipo de interferencia con la detección del campo magnético producido por la espira.

7.1.2. Comparación con el modelo teórico

A través de la ley de Biot-Savart y la fórmula (22), se calcularon las magnitudes del campo magnético que se producen con la bobina descrita anteriormente. Al tener implementado el sistema de detección de proximidad conformados por el sensor magnético y la bobina,

se realizaron mediciones variando la distancia entre los robots y se superpusieron con los resultados obtenidos de los cálculos de la magnitud del campo magnético, figura 32. Estas mediciones se realizaron como prueba de repetibilidad bajo las mismas condiciones en el laboratorio para obtener un rango de resolución de la distancia de detección a partir de la cual calculamos el tiempo mínimo de respuesta del sistema.

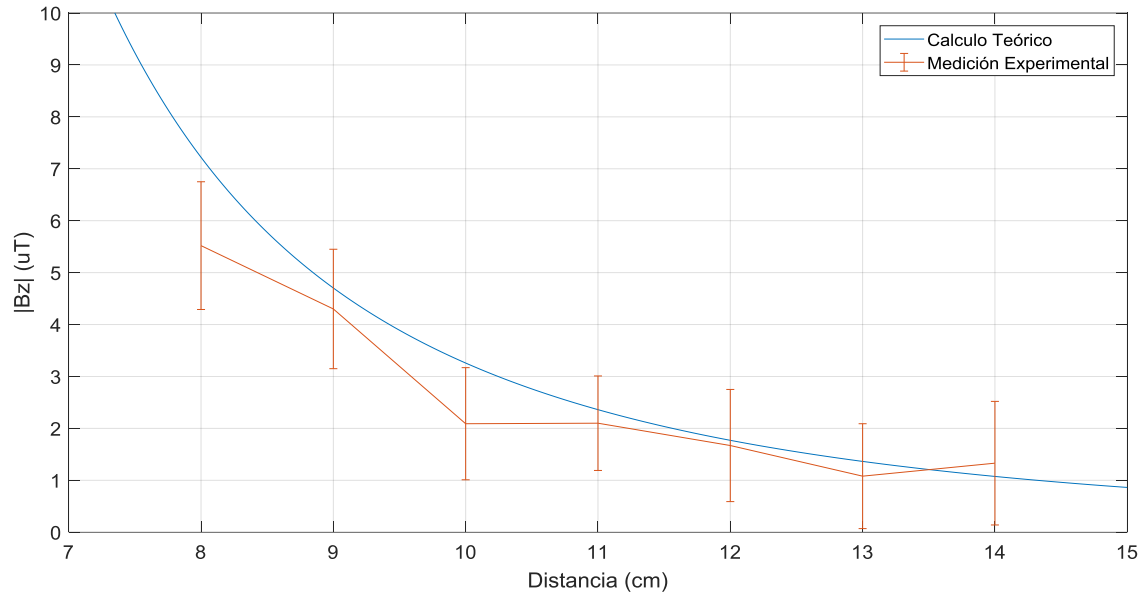


Figura 32: Magnitud de campo magnético teórico contra medido.

De la gráfica de la figura 33 se observa la magnitud de campo magnético en el eje z calculado a través del modelo del campo magnético de una espira, utilizando la fórmula (22) programada en el software Matlab. Superpuestas están las mediciones con incertidumbre realizadas con la espira embebida en el cuerpo del robot y el sensor magnético, esto, separando un sistema del otro a las distancias descritas. La distancia está considerada del centro de la espira al centro de otro robot como se muestra en la figura 31 y la magnitud del campo magnético está expresado en micro Teslas (1×10^{-6}). De esta gráfica se obtuvo que tanto en el modelo teórico como en el experimental, para el rango de medición requerido de 4cm medidos del borde de un robot al borde de otro robot, ambas curvas cumplen con esta condición de distancia siendo un campo detectable con el sensor propuesto. Es importante remarcar que la detección de los robots se hace mediante el campo magnético detectado por el sensor, pero en el procesamiento la validación de la detección se hace mediante la obtención de la frecuencia con la cual conmuta el campo magnético.

Análisis del ruido en el sistema

De la fórmula (41) tenemos que:

$$SNR = \frac{\text{Potencia señal}}{\text{Potencia del ruido}} = \frac{|Bz|}{|Bzn|}, \quad (39)$$

Donde $|Bz|$ es la magnitud del campo medido y $|Bzn|$ la magnitud del ruido en la medición.

Esta relación se obtuvo para cada medición obtenida experimentalmente expresada en la figura 33 y mostradas en la Tabla 8.

Tabla 8: SNR para 2 robots a diferentes distancias.

Distancia	Magnitud del campo $ Bz $ en μT	Magnitud del ruido $ Bzn $ en μT	SNR
8 cm	5.52	1.23	4.49
9 cm	4.3	1.15	3.74
10 cm	2.09	1.08	1.94
11 cm	2.1	0.91	2.31
12 cm	1.67	1.08	1.55
13 cm	1.08	1.01	1.07
14 cm	1.33	1.19	1.12

De acuerdo con la Tabla 8, se aprecia que la detección del campo generado por el robot es verificable hasta los 12 cm donde la relación SNR cumple con un valor mayor a 1.5.

7.1.3. Desempeño del sistema de detección de presencia en el entorno

En la Tabla 9 se muestra un resumen de los requerimientos de la misión con las partes implementadas y probadas para cada requerimiento.

Tabla 9: Comparación de requerimientos logrados.

Requerimiento	Establecido	Implementado	Probado	Unidad
Temperatura de operación	0 a 80	-40 a 85	-	°C
Temperatura de almacenamiento	-100 a 100	-40 a 125	-	°C
Peso	2	2	2	gramos
Energía disponible	364.27	140.58	139.59	mW
Radiación Total	60	-	72	kRads
Distancia de detección	4	6	5	cm

El sistema está diseñado para poder soportar las condiciones a las que se someterán los robots, por lo que faltan hacer pruebas de termo vacío y de esfuerzo mecánico para poder validar su funcionamiento.

Se implementó el sistema dentro de la estructura y el espacio disponible en los robots y se logró una correcta operación una vez implementado dentro de los robots (Figura 33).



Figura 33: Modelos de ingeniería de robots con subsistemas implementados.

Al ser un sistema que interactúa con otros subsistemas y que involucra estrategias de navegación, así como de energía disponible, el sistema se adaptó para ser operado cuando el sistema esté en movimiento y cuando esté en reposo, de modo que, el robot, al tener movimiento, detecta los campos magnéticos cercanos a él y en modo reposo el sistema genera el campo magnético para poder ser detectado y así evitar una colisión entre robots.

Pruebas de radiación

Al tener requerimientos en radiación, se sometieron 10 sensores magnéticos a radiación total de ionización con una radiación total de 60 krads y se verificó su funcionamiento con un sensor patrón sometiendo las muestras radiadas y el sensor patrón a un campo magnético similar al de la bobina del robot para los tres ejes del sensor (Figura 34), obteniendo una medición similar en los 10 sensores radiados y el sensor patrón. Como medida para validar el funcionamiento de los sensores a 60 krads establecido en los requerimientos, se sometieron los mismos 10 sensores a 72 krads totales y se obtuvieron mediciones similares entre los 10 sensores radiados y el sensor patrón.

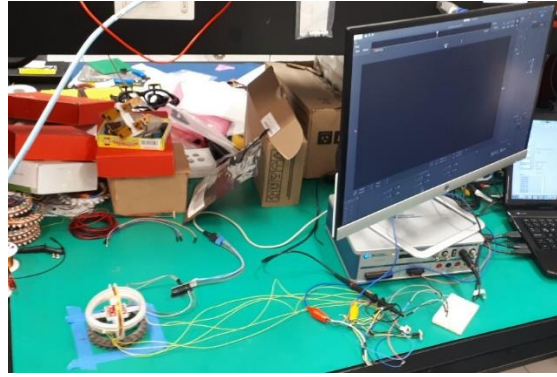


Figura 34: Medición del campo magnético en 3 ejes.

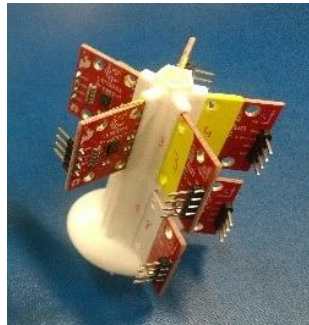


Figura 35: Tarjetas de IMU en arreglo para radiación.

7.2. Detección de los robots

A partir del sistema de generación y detección del campo magnético y del algoritmo de detección implementado, se logró tener una detección de uno o más robots sin discernir entre el número de robots cercanos a una distancia desde los 5 cm como se muestra en la Figura 37, donde se tiene el sensor puesto en el centro de un cuerpo y 2 robots generando campo magnético a distancias de 0.5 cm y de 3 cm respectivamente.

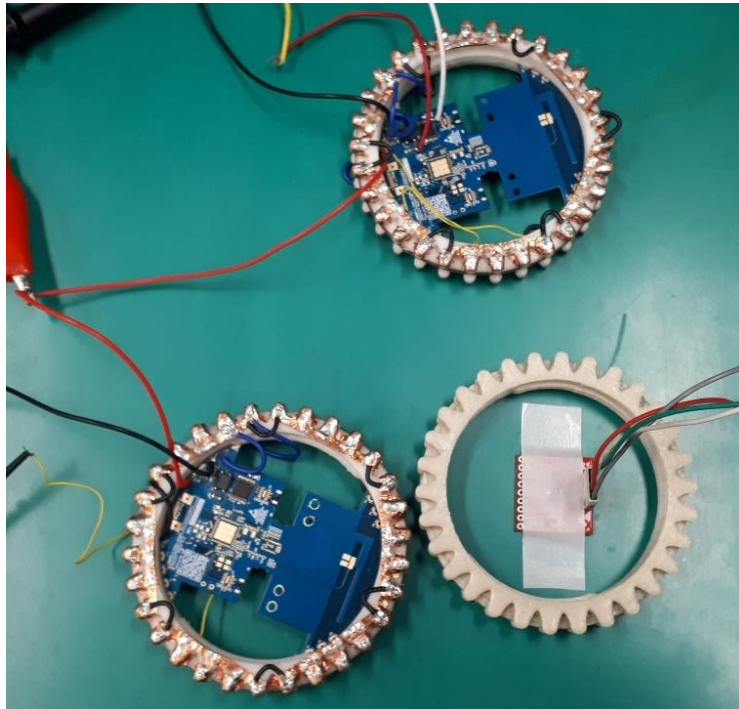


Figura 36: Arreglo con 2 sistemas.

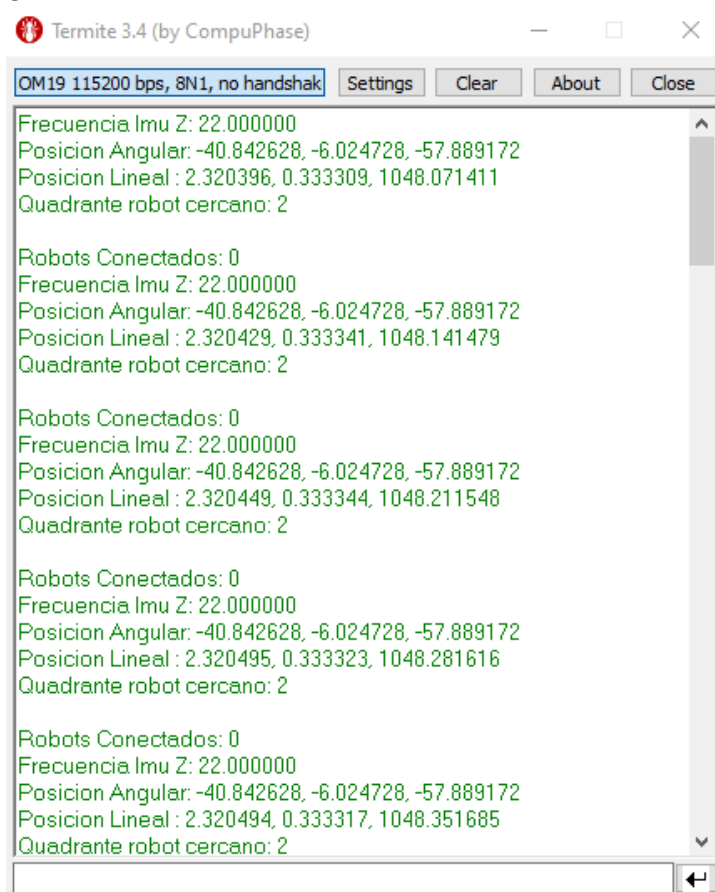


Figura 37: Mediciones realizadas por el microcontrolador.

La impresión de las lecturas del robot describe la detección de uno o más robots cercanos desplegado en la “Frecuencia Imu z:”. Esta medición se realizó para el arreglo mostrado en la figura 36 con 2 robots a 0.5cm y a 3 cm del robot de detección. Se muestra 22 como valor de la frecuencia detectada dado que la frecuencia fundamental detectada por el sistema está definida por múltiplos de 2, lo cual genera una incertidumbre en la medición de la frecuencia de 2 Hz. El algoritmo de detección puede ser ajustado para una detección más precisa de la frecuencia, pero para fines del trabajo y de los objetivos del sistema, no es necesario ya que se detecta la cercanía de uno o más robots, lo cual generará un cambio en la rutina de los robots y cumple con el objetivo del sistema de detección.

7.3. Sistema de potencia

El consumo del sistema en su totalidad, así como el sistema de almacenamiento de energía fueron probados y validados en su operación. En la tabla 10 se resume el consumo y tiempo de respaldo medido para las partes de la bobina y de la IMU.

Tabla 10: Consumo de sistemas con respaldo de super capacitor.

Sistema	Consumo En mW	Tiempo de respaldo por Super capacitor
IMU	124.63	280.8
Bobina	234.06	132.5

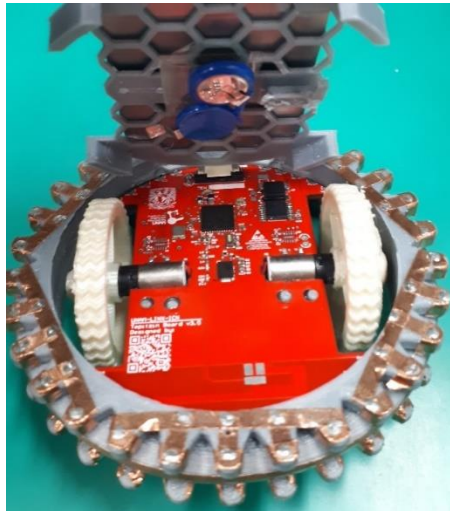


Figura 38: Localización de super capacitor.

De este capítulo se concluye que el sistema no sólo fue capaz de implementarse dentro de las especificaciones dadas por los requerimientos, si no que su desempeño y su modo de operación facilitó su implementación tanto en hardware como en software. Estos resultados muestran que el diseño del sistema fue satisfactorio dado que no interfiere con ningún otro sistema del robot y que su operación es óptima para la navegación del robot y poder evitar así la colisión de un robot con otro.

8. Conclusiones

Se diseñó e implementó un sistema con el cual los robots pueden detectar a otros iguales a una distancia de 4 centímetros de distancia, de forma omnidireccional y sin tener que estar orientados o alineados de alguna forma. Este sistema cumple con los requerimientos de diseño: potencia no mayor a 165mW (138.6 mW), masa menor a 2 gramos (2 gramos del sistema), volumen capaz de ser embebido en el cuerpo de los robots (validado y optimizado) y radiación total de ionización de 60 krads con lo que su validación para operar en el espacio es parcial.

Se cumplieron los objetivos planteados, justificando la viabilidad del sistema teórica y experimentalmente, así como su manufactura y su repetibilidad de una forma fácil y con herramientas al alcance del laboratorio.

Se caracterizó la bobina generadora de campo magnético con lo que se pudieron ajustar los parámetros de diseño para poder cumplir con los requerimientos antes mencionados.

Se eligió y caracterizó un sensor magnético comercial para uso específico del sistema, así como la implementación del sensor en la placa de los robots para un funcionamiento óptimo de la detección.

El sistema cumple con las necesidades de navegación de los robots a corta distancia, lo que ayudará a que los robots puedan conectarse eléctricamente al estar cerca uno del otro.

Al ser el objetivo de la misión aglomerarse y compartir potencia, este sistema no sólo ayuda al éxito de la misión, también facilita el aglomerado de los robots al detectar la cercanía de los demás y así evitar colisiones y desconexiones entre los robots ya agrupados y conectados.

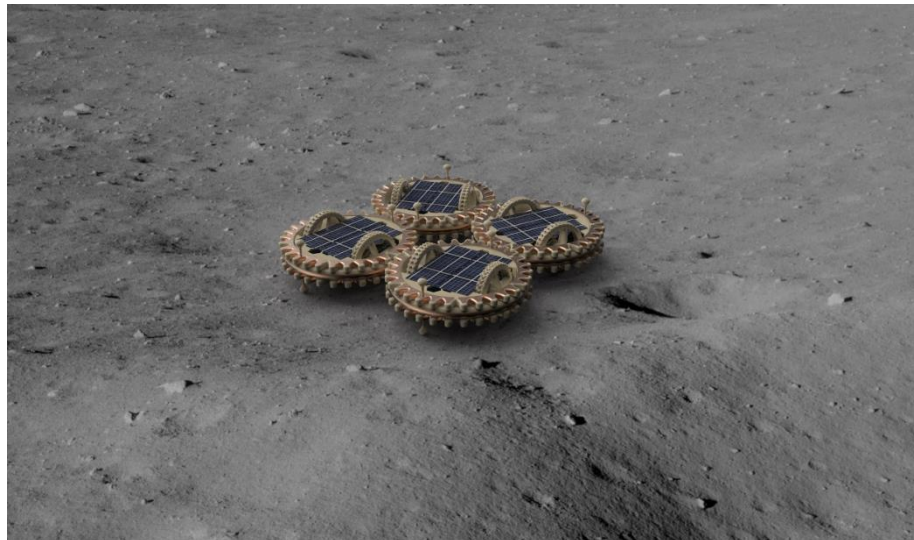


Figura 39: Robots en suelo lunar, obtenido de LINX [1].

9. Trabajo Futuro

- Implementar un puente H en el sistema de conmutación del campo para poder elegir el sentido en el que se desea que gire el campo, esto debido a que no se tiene control sobre la orientación con la cual el robot va a alunizar. Al tener una distribución del campo magnético que entra y sale del centro de la espira, es calculado el campo para vacío, en donde se tiene que respetar el sentido de la corriente que fluye a través de la bobina para que las líneas del campo magnético “salgan” del robot de la parte superior y sean detectadas al “entrar” a los robots cercanos.

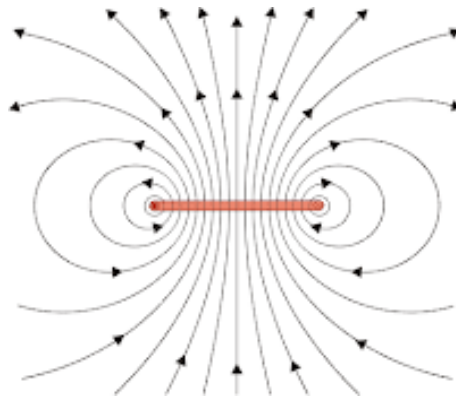


Figura 40: Distribución de las líneas de campo debido a una espira obtenida de [23].

El puente H es ideal para poder cambiar el sentido de la bobina dado que está diseñado para embobinados y tienen un arreglo de transistores y diodos para hacer que la corriente tenga un flujo correcto dentro de la bobina. Al tener una señal de conmutación del campo proveniente del microcontrolador, se tendría que habilitar otra señal para poder tener control sobre el giro. La orientación del robot estará definida por el panel solar con mayor potencia de salida, dado que el sistema cuenta con sensores en ambos paneles solares.

- Caracterizar el campo magnético para los materiales finales con los que se fabricará el robot, así como para los componentes que en conjunto conforman los diferentes subsistemas (motores, celda solar, super capacitor, antena).
- Analizar el campo magnético detectado para poder tener una distancia aproximada del o los robots cercanos.
- Analizar y caracterizar la distribución del campo magnético generado por la bobina para tener una detección de los robots más precisa y poder estimar la distancia a la que se encuentran los robots.
- Realizar pruebas térmicas y vacío en el robot ensamblado para validar los requerimientos de temperatura y presión de operación del sistema en el robot.
- Analizar las componentes X y Y del campo para poder obtener una orientación real de los robots cercanos.

Bibliografía

[1] Obtenido del trabajo realizado dentro del Laboratorio de Instrumentación Espacial LINX, ICN, UNAM.

[2] Obtenido de la página web “Wikipedia”, con URL:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Estados_sensor_inductivo.jpg

Autor: Massón, José C., 9 de octubre del 2006.

[3] Obtenido de la página web “Keyence”, de la “Guía de sensores de fábricas clasificados por principio: proximidad inductivos”, con URL:
<https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/classification/>

[4] Obtenido de la página web “Arrow”, de “Sensor magneto resistivo”, con URL:

<https://www.arrow.com/es-mx/categories/sensors/magneto-resistive-sensors>

[5] Obtenido de la página web “Hella”, de “Sensor ABS”, con URL:

<https://www.hella.com/techworld/es/Informacion-Tecnica/Sensores-y-actuadores/Sensor-ABS-4074/>

[6] Robert Triggs. (Junio 2018). What is NFC & how does it work? 26 de febrero del 2019, de Android Authority Con URL : <https://www.androidauthority.com/what-is-nfc-270730/>

[7] Zhao, Yi & Smith, Joshua & Sample, Alanson. (2015). NFC-WISP: A sensing and computationally enhanced near-field RFID platform. 2015 IEEE International Conference on RFID, RFID 2015. p.p.174-1811

[8] Obtenido de la página web “Green Facts”, de Campo magnético, con URL:

<https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/campo-magnetico.htm>

[9] Obtenido de la página web “Hyper Physics”, de Campo magnético, con URL:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/magfie.html>

[10] Obtenido de la página web “Hyper Physics”, de Campo magnético de la Tierra, con URL:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/MagEarth.html>

[11] Obtenido de la página web “Universidad del País Vasco”, de La Espira, con URL:

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_magnetico/espira/espira.html

[12] R H Good. (15 de noviembre del 2000). Elliptic integrals, the forgotten functions. European Journal of Physics, 22, 119-126.

[13] Hayt, William H. Teoría electromagnética, séptima edición, 2006. Mc Graw Hill.

[14] Obtenido de la página web “UDABOL, Plataforma de Educación Virtual” de la Universidad de Aquino, Bolivia. Con URL:

http://virtual.udabol.edu.bo/pluginfile.php/175231/mod_resource/content/1/syllabus%20generico.pdf

[15] Obtenido de la página web, “Electronics Foru”, ¿What are MEMs sensors?, con URL:

<https://electronicsforu.com/resources/learn-electronics/mems-sensors-available-market>

[16] Obtenido del curso “5° Curso de ingeniería de Telecomunicación”, “Ruidos e Interferencias: Técnicas de reducción”, DRAKE Moyano. José Maria, Santander 2005.

[17] Serna Giraldo, Claudia Patricia. Ruido magnético de Barkhausen. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

[18] Obtenido de la página web “Wikipedia”. Wieczorek, Mark A., 16 de noviembre del 2006, con URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moon_ER_magnetic_field.jpg

[19] Hoja de datos de IMU LSM9DS1, ST Microelectronics. 2015.

[20] Chi-Tsong Chen. (2001). Design of FIR Filters. En Digital Signal Processing (198-296). New York, EUA: Oxford University Press.

[21] Obtenido de la página web “Luis Llamas”. “Filtro paso bajo y paso alto (EMA) en arduino”, Llamas, Luis, 24 de marzo del 2017, con URL: <https://www.luisllamas.es/arduino-paso-bajo-exponencial/>

[22] Algoritmo diseñado e implementado por Manuel Andres Herrera Juarez como parte de su servicio social en el Laboratorio de instrumentación Espacial, dentro del Instituto de Ciencias Nucleares.

[23] Obtenido de la página web “El Fisico Loco”, “Campo Magnético creado por una espira”. Con URL: <http://elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/campo-magnetico-creado-por-una-espira.html>

Otras referencias:

[25] Nave, C.R., Hyper Physics, Georgia State University, 2017

[26] Tong, David. The Quantum Hall Effect. Center for Mathematical Sciences. Cambridge. UK. Junio del 2016.

[27] Nave, C.R., Hyper Physics, Georgia State University, 2017

[28] Tong, David. The Quantum Hall Effect. Center for Mathematical Sciences. Cambridge. UK. Junio del 2016.

[29] Bolton, William. Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas. 1996, México. Alfaomega.

Anexos

Se incluyen los trabajos realizados como complementos de esta tesis.

El primero es un artículo publicado en la SOMI 33, presentado en modalidad de póster y escrita en el idioma inglés. Contiene resultados preliminares del diseño de la bobina, así como lecturas del sensor magnético del campo emitido por la bobina.

El segundo es un póster presentado en Cubesat Workshop 2019 como complemento del sistema que alimenta al sensor de proximidad, así como a todo el robot. Este contiene consideraciones sobre la potencia máxima utilizada por el sistema, así como el tiempo de respaldo otorgado por el supercapacitor.



Coil and magnetic sensor for application in proximity sensor for 2 robots on lunar surface

José Carlos Sánchez Cajal

Laboratorio de Instrumentación Espacial, Instituto de Ciencias Nucleares
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
carlospanca@comunidad.unam.mx

Gustavo Adolfo Medina Tanco

Laboratorio de Instrumentación Espacial, Instituto de Ciencias Nucleares
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México
gmtanco@nucleares.unam.mx, gmtanco@gmail.com

Abstract

A magnetic sensor for proximity application was implemented to be integrated into robots that would join as a cluster on the lunar surface. These sensors are used to prevent a collision between robots and to distinguish the presence of a robot from any other magnetized body. Due to the nature of the mission, acoustic sensors are not viable, as well as capacitive or optical ones because of the directional restrictions and strict requirements in mass of the mission. On the other hand, the geometry of the robot as the omnidirectionality of the required sensor are suitable for a magnetic sensor.

CUE WORDS: Coil, magnetic sensor, IMU, magnetic field, PCB.

1 INTRODUCTION

Detecting objects surrounding electronic devices either in relative or absolute motion with respect to them is a desirable function to avoid collisions or undesirable performance. As an example, aircraft in motion need this requirement to avoid collisions with the ground and other flying objects. Also, many, if not all, manufacturing processes need this function to automate production lines. More recently cars started used parking assistant and lock/unlock systems, when a solid object approaches the device must perform specific functions. As we can see, object detection plays a fundamental role in many areas. The current solution to perform this function are Proximity Sensors. There are different types of proximity sensors like acoustic, optical,



capacitive and magnetic sensors, to name a few, which are only fixed in one direction. As we need to apply a Proximity Sensor in an extraterrestrial surface, most of these sensors are not possible to be implemented. A magnetic sensor can be designed to work in multiple directions due to the principle of generating a magnetic field (a coil for example). A simple application of a directional magnetic sensor can be found in some cars that have an emitter-receiver configuration that generates a magnetic field and look for changes in the field to detect obstacles on its surrounding, they are broadly used, and its performance accomplish the detection function. A downside for this type of proximity sensors is the amount of energy required to perform the task, thus the space used by the emitter and the power source may represent a problem for the overall system. This group come to believe that the best alternative to proximity sensors for space application are magnetic sensors in a omni-directional function. They have two main components: *an emitter* which is a coil embedded in the toroidal body of the system, and a receiver with a 3-axis magnetometer integrated in a single chip coupled with an accelerometer and a gyroscope. This chip is an Inertial Measurement Unit (IMU) mounted on a Printed Circuit Board (PCB) located in the geometric center of the robot. Figures 1 and 2 show the above description.

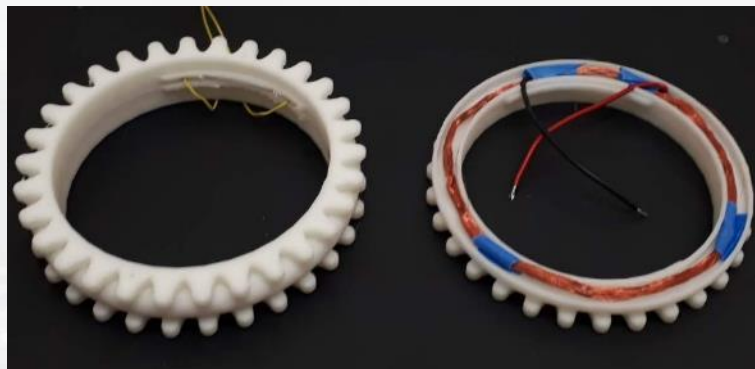


Figure 1. Coil embedded in the structure of the robot

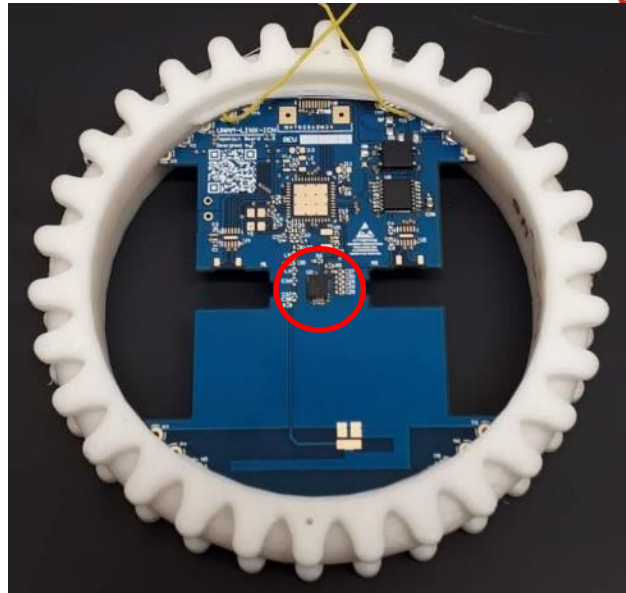


Figure 2. IMU mounted on the PCB.

The magnetic field produced by the coil is measured by the magnetometer located at the geometric center of the robot like shown in figure 2. The strength of the magnetic field can be fixed so the detection is only possible at a distance less than a predefined separation distance. In addition to this, the emitted field oscillates at a fixed frequency, which makes possible to distinguish between a robot and any other magnetized object in the environment.

The principal objective of the system is to generate an oscillating magnetic field with minimum current and mass, given the strong design requirements in both domains.

The navigation requirements involve the lack of collisions and the existence of a nearby region between two robots for an operational mode of approaching. Consequently, robots can only detect each other when their edges are at a distance less than a half of their radius (around 4 centimeters).

This system was designed under the following considerations:

- The power supply needs to be limited by the photovoltaic cell that supply energy to the system.
- The number of turns of the coil is limited by the available space inside the robot.
- The wire gauge is limited by the Maximum Permissible Weight (MPW) for the coil.



- The sensor is limited by its mass and available space on the PCB, as well as its technical characteristics of the sensor (dynamic range, sensitivity, resolution, etc.)

2 DESIGN

2.1 Magnetic Field Analysis

For the magnetic field analysis produced by a coil with N turns at a test point P outside the coil and on the xy -plane, where the coil is contained, the Biot-Savart's law was used. Figure 3 illustrates this set up.

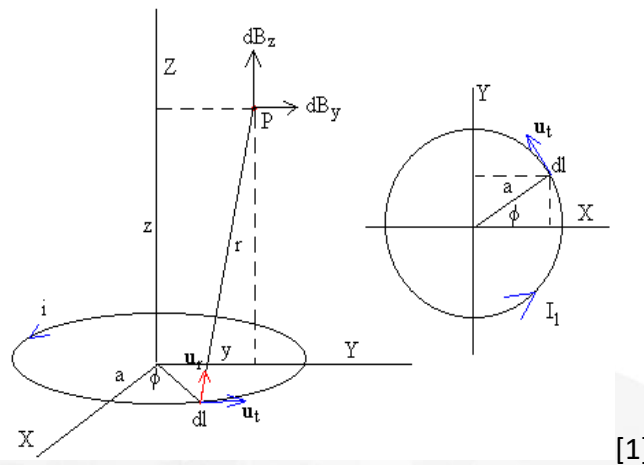


Figure 3. Reference for the coil with center in the origin and contained in XY plane.

From a geometrical analysis, we can determine the magnetic field \vec{B} of the coil, with radius a and current i as: (under the left-hand criterion), yields:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4 \pi} \oint \frac{\hat{u}_t \times \hat{u}_r}{r^2} d\vec{\ell} \quad (1)$$

Also, from Figure 3 we propose a change of variable according to:

$$r = \sqrt{a^2 + y^2 + z^2 - 2aysen\phi} \quad (2)$$



$$u_r = \frac{-a \cos \phi i + (y - a \sin \phi) j + zk}{r} \quad (3)$$

$$u_t = -\sin \phi i + \cos \phi j \quad (4)$$

Substituting these new variables in Equation 1, and due to the symmetry of the coil, we can change the integration limits to $-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$ and multiply by a constant.

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} a z \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \phi}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2ay \sin \phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \quad (5)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} a z \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \phi}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2ay \sin \phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \quad (6)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi} a \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{a - y \sin \phi}{(a^2 + y^2 + z^2 - 2ay \sin \phi)^{\frac{3}{2}}} d\phi \quad (7)$$

This allow us to determine the 3 axis components of the magnetic fields. Having a coil, we need to multiply each components of the magnetic field by the number of turns N of the coil.

2.2 Number of turns in the coil

As we have 4 grams as MPW for the coil, it is established that the maximum number of turns is determined by the wire gauge

Table 1. Characteristics of the wire for the coil.

AWG Caliber	Copper Density (g/cm ³)	Cross-section area (cm ²)	Perimeter of the coil (cm)	Maximum number of turns
#38	8.96	8.2x10 ⁻⁵	(363/50) π	238.70
#40	8.96	4.9x10 ⁻⁵	(363/50) π	399.46

The resistance of the coil is defined by

$$R = N\rho \cdot \text{perimeter} \quad (8)$$



Where ρ is the conductivity of the copper in function of the length

$$\rho = \frac{86}{41} \frac{\Omega}{m} \text{ for a 38 AWG caliber wire} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{172}{49} \frac{\Omega}{m} \text{ for a 40 AWG caliber wire} \quad (10)$$

Due to the input voltage for powering the coil of 3.3 V and a current of 40 mA, it is established the maximum number of turns with equations 8, 9 and 10 is defined by

$$N = \frac{R}{\rho \cdot \text{perímetro}} \quad (11)$$

Due to equation 11, it is calculated that for a 38 AWG wire we have a maximum number of turns of 172 turns and for a 40 AWG wire we have 103 turns. Both are in the MPW.

With the number of turn defined and the current established in 40 mA ^[2], the Current-Turns Ratio (CTR) can be calculated for each AWG caliber wire

$$CTR = i \cdot N \quad (12)$$

The CTR directly multiplies the axis component of the magnetic field.

For each caliber we have different CTR

$$38 \text{ AWG } CTR = 40mA \cdot 172 = 6.88 \quad (13)$$

$$40 \text{ AWG } CTR = 40mA \cdot 103 = 4.12 \quad (14)$$

From (13) and (14) it can be determined that the wire which have best CTR is de 38 AWG.

2.3 Magnetic Sensor

The magnetic sensor chosen is integrated with a gyroscope and a accelerometer in a single chip known as IMU.

Table 2 show the characteristics of the magnetic sensor. ^[3]



Table 2. Characteristics of magnetic sensor.

Dynamic range [mteslas]	Resolution [nteslas/LSB]
±0.4	14
±0.8	29
±0.12	43
±0.16	58

Where the resolution is given by the Least Significant Bit (LSB).

The IMU have an Analog to Digital Converter (ADC) which transfer the information from the magnetometer to any device with I²C communication protocol.

Due to the non-simplicity of the components of the magnetic field for each axis, a simulation has been set in MatLab software where *P* is place in the X axis and the Z axis is variable, having as result the magnitude of the magnetic field as shown in Figure 4. Note that the distance 0 is the center of the robot.

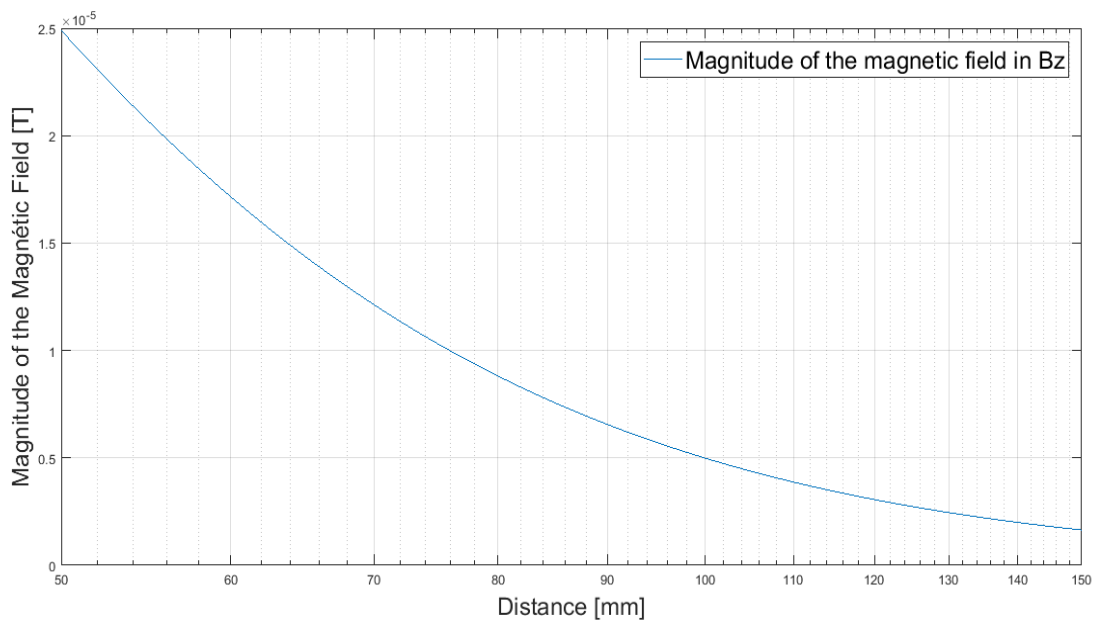


Figure 4. Calculation of the Bz magnitude of the magnetic field produced by a coil.



3 RESULTS

Given the characteristics table 2 and the simulations of the magnitude of the magnetic field from the Z axis of figure 4, it was theoretically assured that the robot can be detected at distances of the same magnitude as its radius and less.

It was possible to detect the magnetic field generated by a robot experimentally in an environment of magnetic noise (magnetic noise is considered due to the earth's magnetic field given the configuration of the sensor used and the magnitude of earth's magnetic field (from 0.3 to 0.6 Gauss or 30 to 60 micro Teslas) [4].

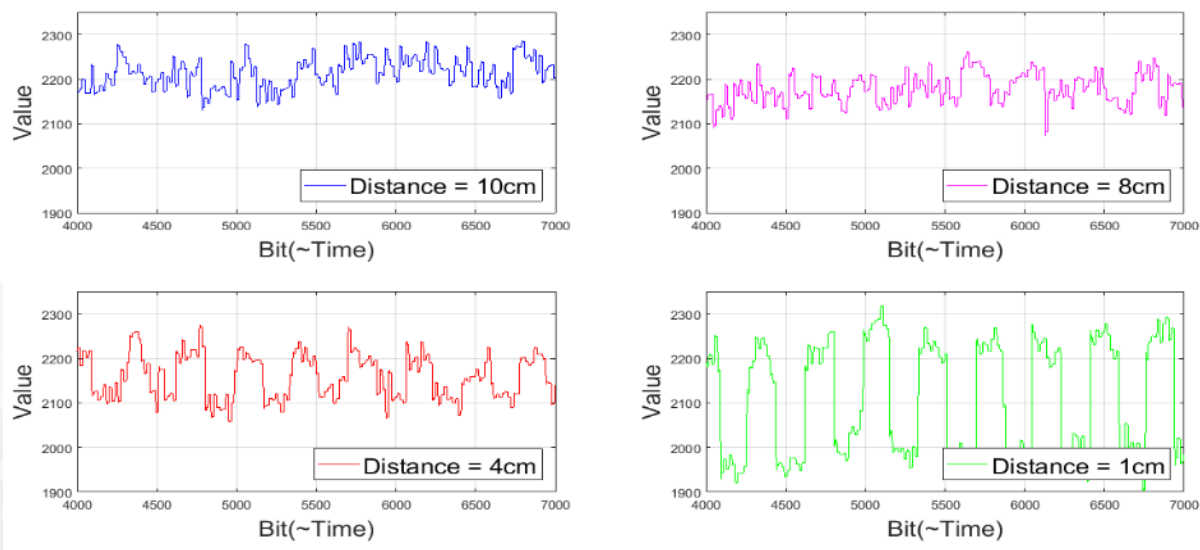


Figure 5. Lecture of the magnetometer from 5 to 8 cm of distance.

In figure 5 all the signals from different distances are pulsed in 1 Hz, a coil with 100 turns and a current of 60 mA (the CTR of the measurement is 6). The distance is measure from the border of one robot to the border of a second robot, this to avoid collision before detection. For the IMU a dynamic range of ± 0.4 mteslas was chosen to ensure the detection of the magnetic field. This measurement shows that the magnetic field pulsed at a fixed frequency can be detected by the IMU and therefore know that a robot is near and proceeds to another operational algorithm. The noisy part of the signal is meant to be filtered so the detection of the robot becomes easier to determine. Also it was proved that at a distance equal to the radius of the robot the detection is possible.



In table 3 is shown de Signal to Noise Ratio (SNR) from the signals in figure 5.

Table 3. SNR from the signal of the IMU.

Distance [cm]	Signal magnitude [bits]	Noise magnitude [bits]	SNR
1	325	89	3.65
2	280	99	2.83
3	226	117	1.93
4	148	56	2.64

As shown in figure 3 the SNR for most of the distances the ratio is bigger than 2. This is the minimum value to ensure that the sensor is measuring the desirable signal of the magnetic field and not measuring other environment components (measurement equipment near the measurement area, earth's magnetic field noise, etc).

3 CONCLUSIONS

A magnetic integrated system of emitter and sensor was implemented following the requirements of the mission like omni directionality, low power consumption and low weight.

It can be ensure that the magnetic field emitted from the coil could be detected in a distance of the half of the robot radius and identify if the magnetic field is from a robot and exclude any magnetized object.

4 GRETINGS

This research was possible thanks to the facilities of the Laboratorio de Instrumentación Espacial LINX, ICN-UNAM, and the economic support of the PAPIIT 103217, sectorial funds CONACYT-SEP 239660 and CONACyT-AEM 247856 y 262843.



REFERENCES

- [1] Universidad del País Vasco. Departamento de Física: La espira. Available in http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_magnetico/espira/espira.html (Searched in February the 11 of 2018).
- [2] Sanchez, Jose Carlos. Implementation of a power system based on a flexible photovoltaic cell for application in lunar robotics. Published in Congreso de Instrumentación SOMI XXXIII. <http://somi.ccadet.unam.mx/somi33/>
- [3] ST Microelectronics. iNEMO inertial module. (Searched in February the of 2018).
- [4] Georgia State University. Departamento Física y Astronomía: Campo magnético de la Tierra. Available in <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/MagEarth.html> (Searched in January the 14 of 2018).

EPS based in flexible solar cell and super capacitor for lunar rover

J. Carlos Sanchez-Cajal
Jose L. Guerrero Morales, Gustavo Medina-Tanco

Space Instrumentation Laboratory
Nuclear Science Institute
National Autonomous University of Mexico UNAM
Mexico City, Mexico
cariossanc@comunidad.unam.mx

Introduction

In the aerospace technology for small spacecrafts (satellites, rovers, stratospheric balloons, etc.), the solar panels are the main source of electric power, obtained from the radiation of the sun. This energy is, most of the time, available for storage and use in the electric and electronic devices that make up the systems. This technology has many variants from efficiency, from 16% like the commercial cells up to 30% in the new junction technology which are only available for some applications. In this work we describe an EPS with solar cells with 23% and 25% efficiency as the only source of energy for a rover that has the purpose to group all together in a big structure (for this work they would group as a big solar cell), adding a supercapacitor for temporal backup for low radiation in the solar cells or low power conditions due to the topology of the ground.

COLMENA

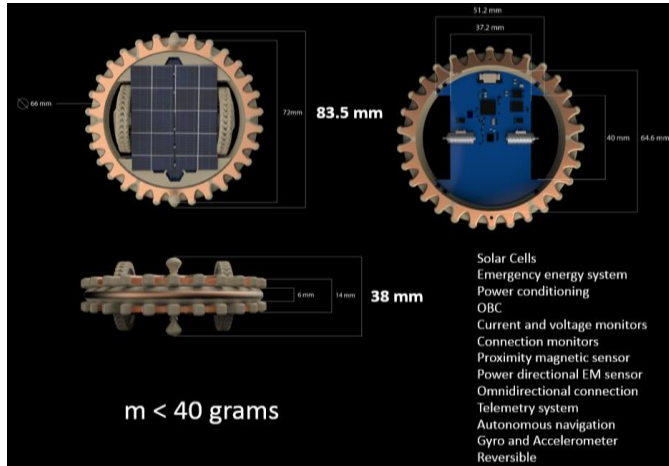


Figure 1: COLMENA Rover.

COLMENA have many sub-systems as well as requirements for this mission, figure 1 shows all the subsystems involved on the rover, also the dimensions and the mass requirement. The available area on the top of our rover is 29.57 cm^2 . This area is also limited by the wheels, so the effective area for solar cells arrangement is 24.54 cm^2 . In this area we need to obtain the maximum electric power for all the rover. The power density per meter in the space is 1366 W/m^2 , this leave us with the maximum power of 3.35 W . This value is based in a 100% efficiency solar cells, but this is only theoretical. With the solar cells we have been working with, the efficiencies of the solar arrangement are 22.7% and 25.25%, depending in the technology of the arrangement. The maximum power available for the rover leave us with limited options for navigation solutions. For this rover we have consider the location on the moon where the mission will take place, the shadow that the wheels produce on the solar cell arrangement, the degradation and temperature losses.

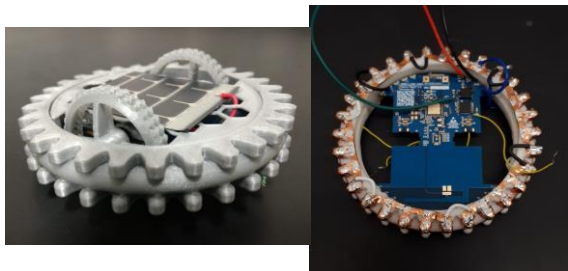


Figure 2: Engineering models of the rover.

Abstract

A no battery power supply system was implemented for a robot that would join as a cluster on the lunar surface. The sub system is composed by a flexible solar cell: that is the only energy supply for the whole system, and a super capacitor: which gives temporal backup for critical solar radiation incidence on the solar cell. The system was tested for each subsystem and can provide the robot the enough energy for an optimal operation.

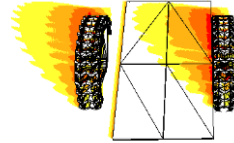


Figure 3: Shade analysis.

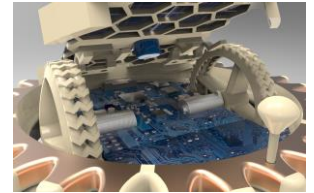
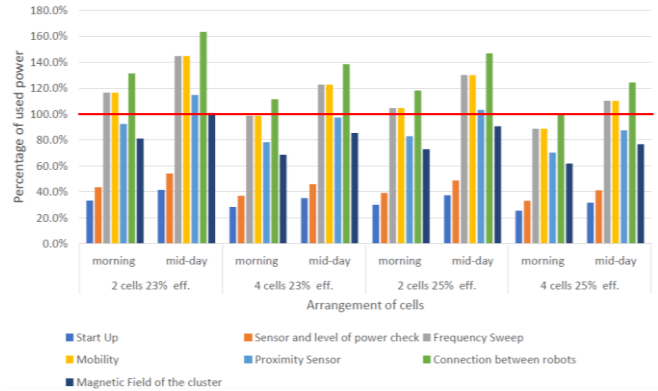


Figure 4: Power back-up.

With all the factors mentioned above, we have studied 4 scenarios with different technologies and arrangements of different solar cells for all the actions that our rover would need to perform during the mission. Graphic 1 show us the power consumptions for each action (involving 2 or more sub-systems) with maximum shadow projection in the morning and at mid-day where the mission is pretend to occur.



Graph 1: Power consumptions for each action.

Graphic 1 shows that in any scenario, we will need extra electric power for cases where the shadow or the ground leave us with low power. The robot have no battery, so, to find a solution to this temporal electrical back-up needed, we have studied and implemented a super capacitor that fulfill our power needs. We evaluate the time each sub-system can operate only with the super capacitor with it's lowest energy storage.

Sub system	Time in seconds
Star up	366.6
Sensor and level of power check	280.8
Frequency sweep	105.1
Mobility	105.1
Proximity Sensor	132.5
Connection	93.1

Table 1: Time for each action to survive with energy back-up.

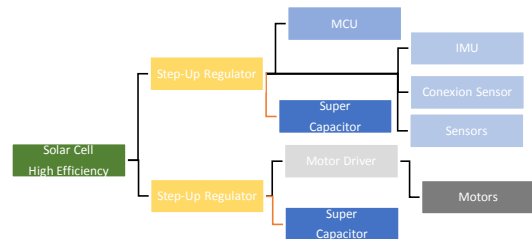


Figure 5: Block Diagram of the EPS.

Conclusions

And EPS for a no battery rover was design and validated for our mission requirements. This with low available area for solar cells and a temporal energy back-up with high energy density for our strong mass requirement. This system was also proven that can support low o cero energy from the solar cells and be capable to return to a "save" power parameters and continue or change the direction.