

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**Sistema de detección de fallas en tuberías ferromagnéticas por
dispersión de flujo magnético**

**Trabajo de fin de carrera para optar el Título de Ingeniero
Mecatrónico que presenta el bachiller:**

Jhossep Augusto Popayán Ávila

ASESOR: Franco Hidalgo Herencia

Lima, Octubre del 2013

Índice

Resumen.....3

Capítulo 1 - Presentación de la problemática4

Capítulo 2 - Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto ..5

 2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico.....5

 Requerimientos mecánicos:5

 Requerimientos eléctricos-electrónicos:5

 Control del sistema:5

 2.2 Concepto de la solución6

Capítulo 3 - Sistema mecatrónico17

 3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico.....17

 3.2 Diagrama de funcionamiento de los circuitos del sistema mecatrónico18

 3.2 Sensores y actuadores.....20

 3.2.1 Actuadores20

 3.2.2 Sensores21

 3.2.3 Componentes adicionales26

 3.3 Planos del sistema mecatrónico.....35

 3.3.1 Planos Mecánicos35

 3.3.2 Planos eléctricos45

 3.4 Diagrama de flujo del programa de control57

Capítulo 4 - Simulaciones y resultados63

 4.1 Marco teórico63

 Ecuaciones de Maxwell63

 Calculo de campo magnético64

 4.2 Resultados de simulaciones.65

 Fisuras externas66

 Fisura interna71

 Corrosión73

Capítulo 5 - Presupuesto.....76

Capítulo 6 - Conclusiones78

Bibliografía79

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño mecatrónico de un sistema automático para la detección de fallas en tuberías ferromagnéticas de un diámetro de 18 pulgadas. El diseño del sistema permite identificar distintos tipos de fallas tales como corrosión y fisuras superficiales e internas. El método que usa el sistema para la detección de fallas en tuberías ferromagnéticas es la “Dispersión de flujo magnético” o “*Magnetic flux leakage*”. La dispersión de las líneas de flujo magnético se debe a las fallas antes mencionadas las cuales generan un aumento en la lectura de los sensores de efecto Hall.

El sistema diseñado trabaja desplazándose a través de la tubería y a la vez sensa constantemente diferentes parámetros, como corriente en los motores y sensores que permiten la geo localización del sistema, para asegurar su correcto funcionamiento. En el momento en el que el sistema detecta una falla en la tubería, basada en algoritmos que se explican en este trabajo, este se encarga de almacenar tanto las lecturas de los sensores de efecto Hall, imágenes de la falla y la localización de la falla para su posterior análisis.

El trabajo abarca la selección de sensores y actuadores; diseño de planos mecánicos, eléctricos, diagramas de flujo. Por último se concluye con el desarrollo del marco teórico necesario para el desarrollo del sistema y simulaciones que muestran los resultados que el sistema obtendría al detectar una falla dentro de las tuberías.

Capítulo 1

Presentación de la problemática

En la actualidad las industrias de petróleo y gas natural son un sector de gran importancia en muchos países, incluyendo al Perú. Los oleoductos y gasoductos son los principales medios para el transporte de petróleo y gas respectivamente. Uno de los principales problemas para dichas industrias es poder asegurar que las líneas de transporte estén siempre operativas, para lo cual continuamente se realiza mantenimiento predictivo para así evitar posibles fallas en la infraestructura de las líneas de transmisión, las cuales podrían originar daños a la infraestructura como explosiones debido al adelgazamiento de las paredes de las tuberías debido a la corrosión, serios daños al medio ambiente e incluso la muerte de personas que estén expuesta a dichas fallas.

Las principales fallas que se pueden detectar en este tipo de tuberías son corrosión y fallas por fatiga, originando estas un adelgazamiento en el espesor de la tubería y fracturas respectivamente.

Asimismo las fallas no necesariamente son siempre superficiales, pueden existir fallas internas que quizás ya hayan venido de fábrica.

Hoy en día existen diversos métodos para la identificación de las fallas antes mencionadas. Sin embargo, muchas de ellas solo pueden determinar algún tipo de falla, mas no los distintos tipo que existen y tampoco caracterizarla. Se profundizará un poco más este tema en un capítulo siguiente.



Figura 1.1: Oleoducto norperuano

Para el transporte de fluidos a altas presiones normalmente se usan tuberías de acero en un amplio rango de dimensiones. Estas tuberías para las industrias de gas y petróleo están normalizadas. Uno de los estándares más usados es el del “*American Petroleum Institute*” o API por sus siglas en inglés. Las tuberías de acero pueden variar, según los estándares API, entre 0.405 pulgadas y 82 pulgadas de diámetro externo.

Capítulo 2

Requerimientos del sistema mecatrónico y presentación del concepto

2.1 Requerimientos del sistema mecatrónico

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un sistema que sea capaz de poder desplazarse a lo largo de un tramo de tubería y poder detectar fallas a lo largo de la misma. El sistema además tiene que almacenar dicha información junto con la localización de las fallas.

Requerimientos mecánicos:

- El sistema debe poder inspeccionar tuberías de 18" de diámetro que cumplan con las normas API
- El sistema debe poder desplazarse a través de la tubería con una pendiente de hasta 30°
- El sistema debe poder desplazarse de manera autónoma a lo largo de la tubería
- La sección de sensado del sistema podrá adaptarse a variaciones dentro de la tubería que se rijan por las normas API
- El sistema es capaz de atravesar uniones tipo codo de hasta 90°

Requerimientos eléctricos-electrónicos:

- El sistema será alimentado únicamente con baterías DC
- El sistema asegura un tiempo de servicio mínimo de 5 horas y máximo de 10 horas
- El sistema será capaz de recibir, procesar y almacenar las señales necesarias para un buen informe sobre los resultados hallados.

Control del sistema:

- Para el control del sistema se cuenta con la realimentación de los actuadores y algunos sensores para garantizar un correcto desplazamiento a través de la tubería.

2.2 Concepto de la solución

Para que el sistema pueda cumplir con los requerimientos de poder detectar fallas en tuberías ferromagnéticas de 18" se decidió emplear el método denominado "Pérdidas de flujo magnético" o "*Magnetic flux leakage*" en inglés. Este método se basa en que cuando existen fallas el flujo se dispersa. La dispersión del flujo magnético se encuentra directamente relacionada con que tan cerca de la saturación magnética se encuentra la tubería [1]. Cuando la tubería se encuentra muy lejos de la saturación la dispersión de flujo magnético en las inmediaciones de las fallas son muy débiles y por ende las variaciones también lo son. Algo parecido sucede cuando la tubería se encuentra sobresaturada ya que si bien es cierto que la dispersión del flujo es bastante mayor cuando hay fallas, el campo en las inmediaciones de la tubería cuando no hay fallas también es elevado por lo que las variaciones, al igual que el caso anterior, son débiles. Para obtener variaciones de densidad de flujo magnético que sean útiles en el análisis se debe de magnetizar la tubería hasta el punto de saturación magnética o estar cerca de ella [1].

Después de saturar la tubería con una fuente de flujo magnético las líneas de flujo magnético empiezan a dispersarse en las inmediaciones de la falla. Dicha dispersión de flujo de campo magnético (\emptyset) se mide con sensores de efecto Hall los cuales no miden flujo magnético, sino densidad de campo magnético (B). La intensidad de la variación de densidad de campo magnético es dependiente de las dimensiones de la falla. El sistema cuenta con sensores de efecto Hall alrededor de todo el diámetro de la tubería, dicho arreglo de sensores es capaz de medir fallas corrosión y fisuras radiales.

Para el diseño del sistema mecatrónico se alcanzó una magnetización de 1,4T aproximadamente cuando la saturación se logra a 1.8T aproximadamente, El valor de magnetización se encuentra las cercanías de la región de saturación. Para observar el efecto de dicha magnetización para distintos tipos de falla se hizo uso del software Ansoft Maxwell 14. Después de realizar las simulaciones se ve que el valor de magnetización permite tener dispersiones de flujo aceptables para el análisis de fallas. Los resultados simulados del análisis se encuentran detallados en el capítulo 4.

En la figura 2.1 se muestra la vista isométrica del sistema de magnetización de la tubería

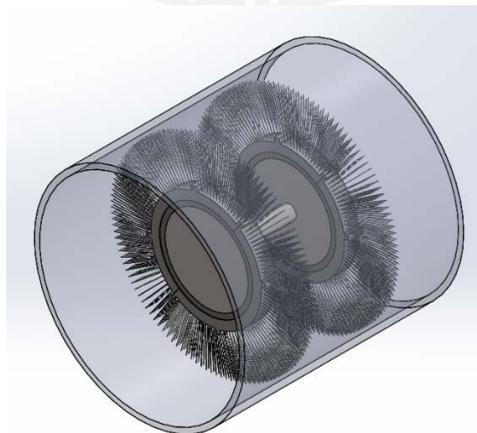


Figura 2.1 Vista isométrica sistema de magnetización de la tubería.

En la figura 2.2 se muestra la sección transversal del sistema de magnetización de la tubería.

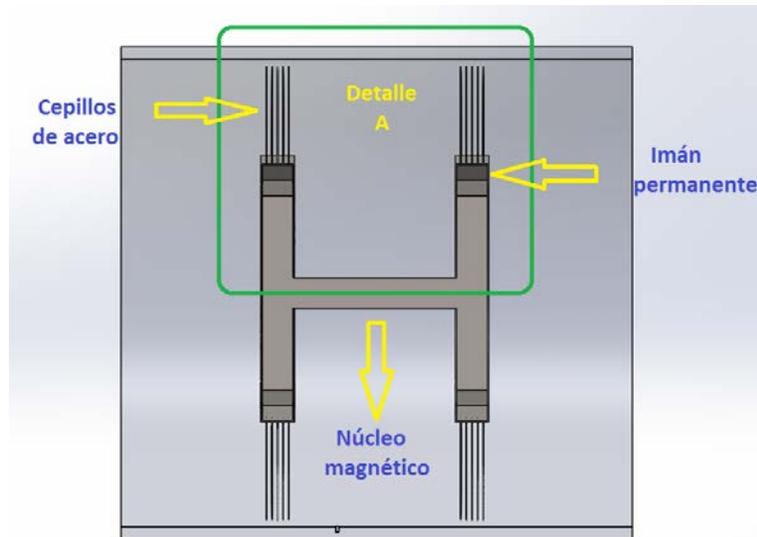


Figura 2.2 Sección transversal sistema de magnetización.

En la figura 2.3 se muestra la disposición de los elementos para el análisis magnético. Esta imagen es la representación del detalle A de la figura 2.2.

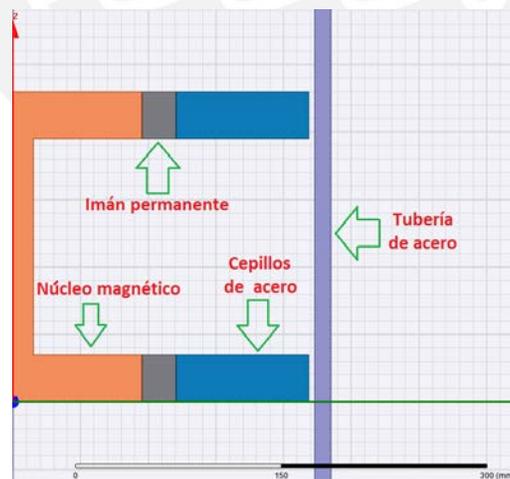
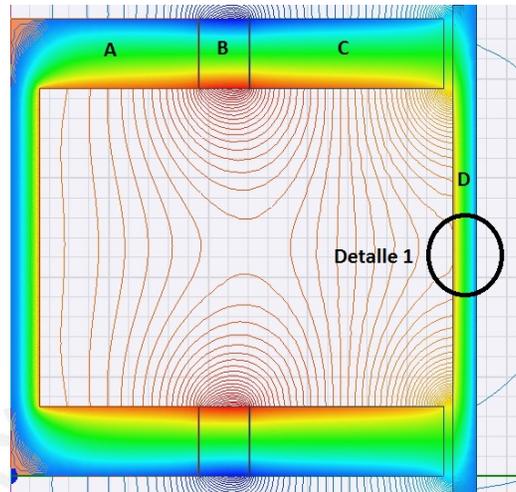


Figura 2.3 Distribución de elementos para análisis magnético

En la figura 2.4 se muestra el comportamiento de las líneas de flujo magnético cuando no existe falla.

Condiciones de simulación: Magnetización de la tubería = 1.8 T

Longitud A+B+C = 228 mm



Escala: Cada división de la cuadrícula equivale a 10 mm

Figura 2.4 Distribución de líneas de flujo magnético cuando no existe falla (A: Núcleo magnético B: Imán permanente C: Cepillos metálicos D: Tubería)

En la figura 2.5 se muestra de cerca como es el comportamiento de las líneas de flujo ante la ausencia de fallas. Se puede observar que la dirección de las líneas de flujo magnético se mantiene constante y las líneas de flujo son paralelas entre ellas en todo el tramo de la tubería.

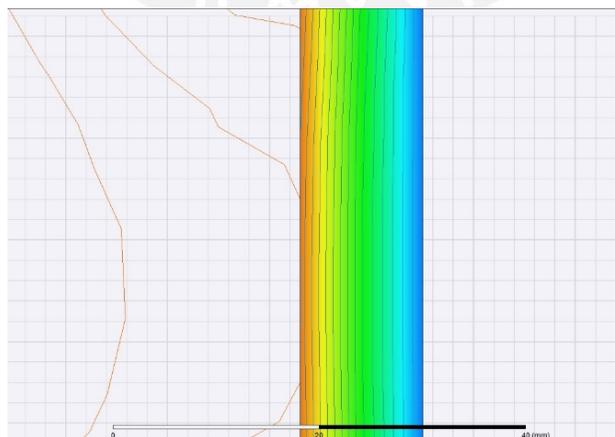
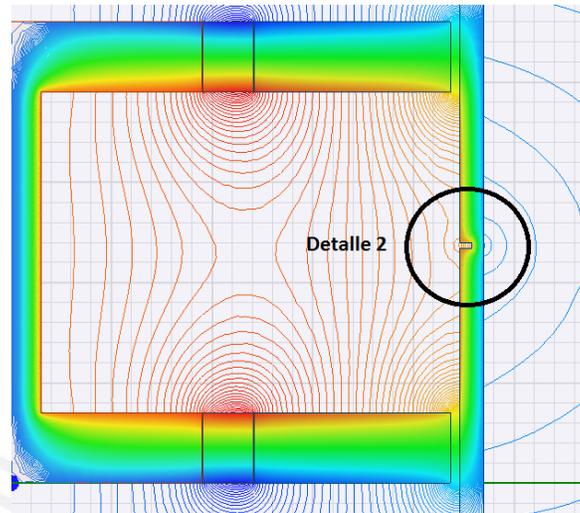


Figura 2.5 Detalle distribución de líneas de flujo magnético (Detalle 1)

En la figura 2.6 se muestra el comportamiento de las líneas de flujo magnético cuando existe falla.

Condiciones de simulación: Magnetización de la tubería = 1.8 T

Longitud A+B+C = 228 mm



Escala: Cada división de la cuadrícula equivale a 10 mm

Figura 2.6 Distribución de líneas de flujo magnético cuando existe falla

En la figura 2.7 se muestra de cerca como es el comportamiento de las líneas de flujo ante la ausencia de fallas. Se observa la dispersión de flujo magnético. Se puede observar que las líneas de flujo magnético empiezan a dispersarse por el exterior de la tubería debido a que esta ya se encuentra saturada magnéticamente.

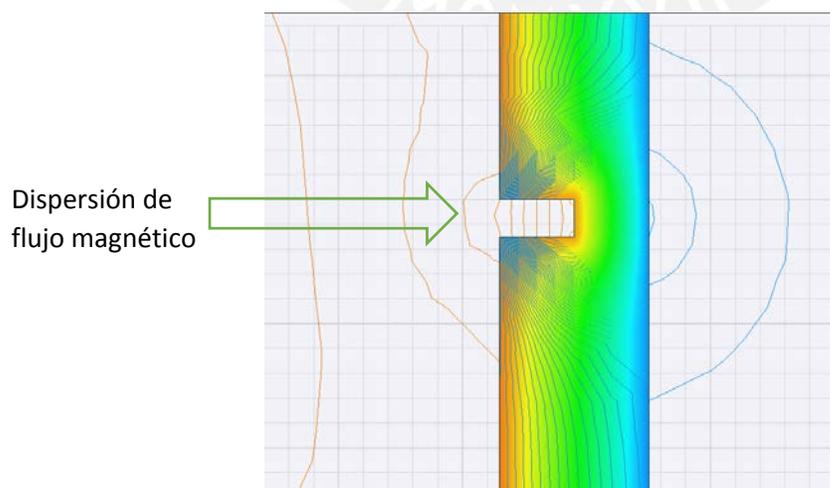


Figura 2.7 Detalle distribución de líneas de flujo magnético (Detalle 2)

Todo el proceso previamente explicado se integra a un sistema móvil que permite hacer un análisis de la tubería en un determinado tramo. Dicho sistema móvil se encargará de transportar distintos dispositivos que permitirán tanto la recepción de señales, procesamiento y almacenamiento de las señales de los sensores de efecto Hall como dispositivos para registrar la trayectoria de movimiento del móvil y así poder determinar en que lugares se encontraron las posibles fallas, también se encargará de transportar baterías para su funcionamiento autónomo.

En las figuras 2.8 – 2.11 se muestran las vistas del sistema completo.

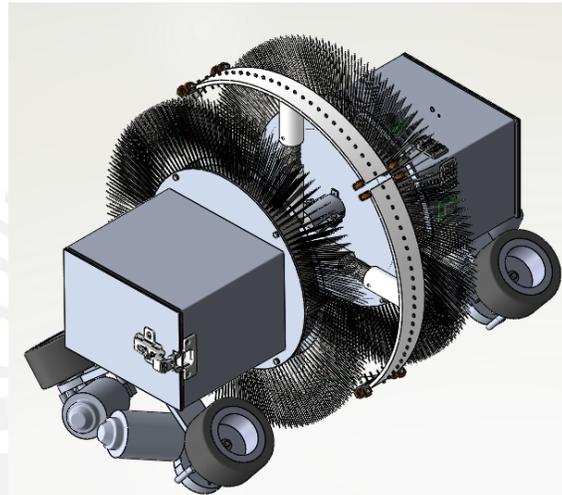


Figura 2.8 Vista isométrica del sistema

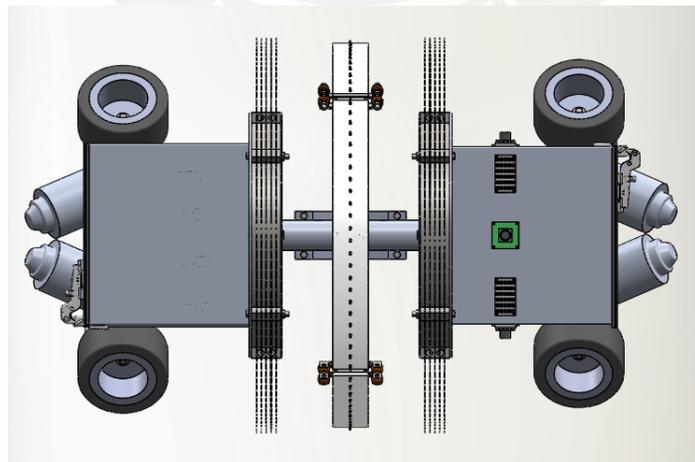


Figura 2.9 Vista superior del sistema

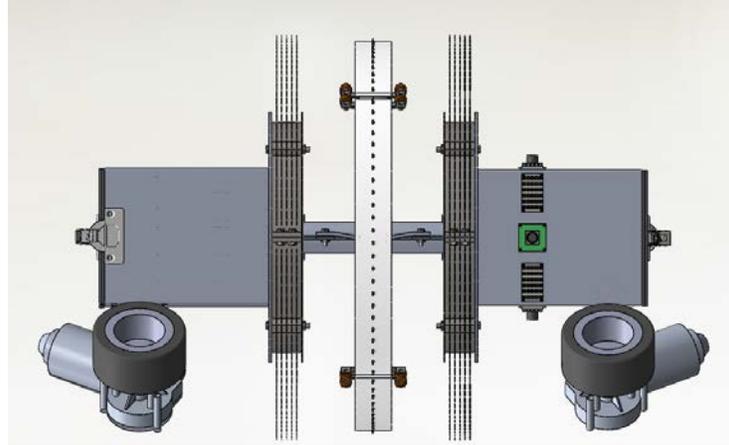


Figura 2.10 Vista lateral del sistema

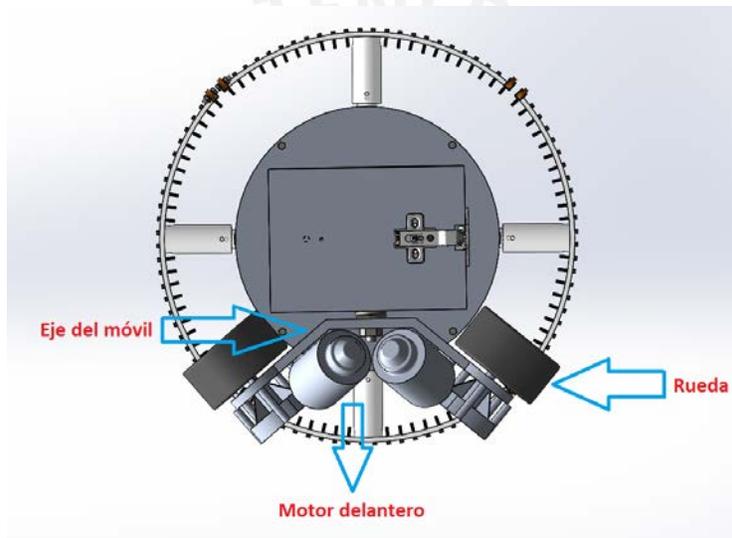


Figura 2.11 Vista frontal del sistema

El sistema cuenta con 2 motores delanteros y 2 posteriores para su desplazamiento dentro de la tubería, los cuales se encuentran unidos a sus respectivas ruedas y a la vez a un eje que puede rotar (eje del móvil) cuya utilidad se ve al momento de girar y también en los tramos en los que la tubería no se encuentra completamente recta, sino que puede encontrarse ligeramente doblada, lo cual hasta cierto rango es permitido por la API (*American Petroleum Institute*). Este movimiento está limitado por un resorte de torsión (Figura 2.13), cuyo objetivo es que el eje del móvil no gire libremente. El elemento de unión que permite un giro fluido entre el eje del móvil y el móvil es un rodamiento axial (Figura 2.13). Para que el sistema pueda girar a través de las distintas uniones que se pueden encontrar a lo largo de un determinado tramo de tubería no basta con que el eje del sistema pueda girar, sino que además también se tiene que desplazar para que el plano en el que se encuentran las cuatro llantas del sistema se mantenga horizontal y así poder evitar posibles estancamientos y sobre todo variaciones considerables en la lectura de los sensores de efecto Hall.

En la figura 2.12 se muestra la disposición que tendría que tener el eje del móvil (color verde) para poder girar en una unión codo 90°. El eje del móvil tiene que girar 22° con respecto al móvil (color negro) y desplazarse a través de la ranura (color rojo) 4 cm para poder lograr girar en una unión codo 90° con 24" de radio de curvatura.

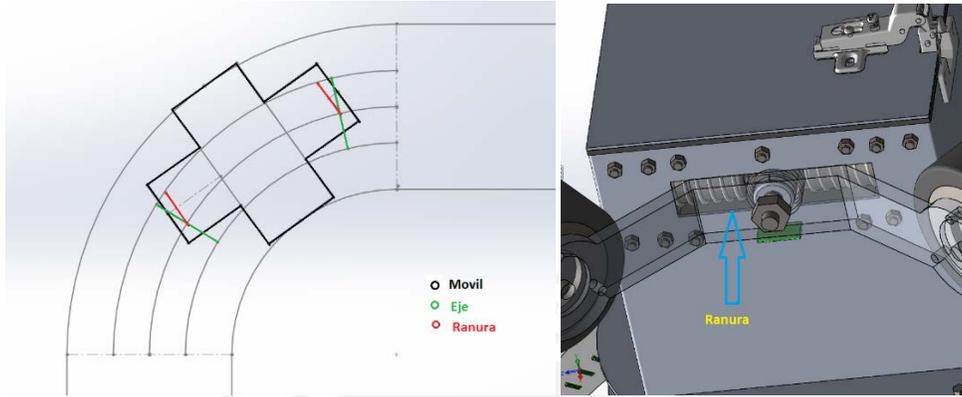


Figura 2.12 Disposición del eje al momento de girar en una unión codo 90°

Para solucionar el problema de que el eje tiene que desplazarse para mantener la orientación del móvil constante y no afectar la lectura de los sensores se diseñó y calculó un mecanismo para permitirle al eje desplazarse a lo largo de una ranura, pero el desplazamiento no puede ser libre, ya que pone en riesgo la estabilidad del móvil. Para ello mecanismo consta de dos resortes de compresión (Figura 2.13), cuya constante de elasticidad y dimensiones fueron calculadas para que el móvil pueda girar en las curvas sin inconvenientes y además que su desplazamiento no sea libre. Los cálculos se muestran en el anexo A

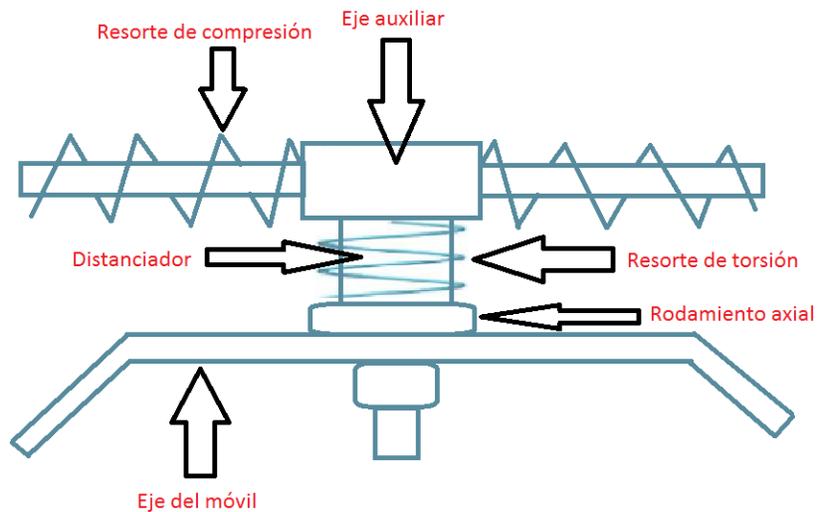


Figura 2.13 Mecanismo para desplazamiento del eje del móvil

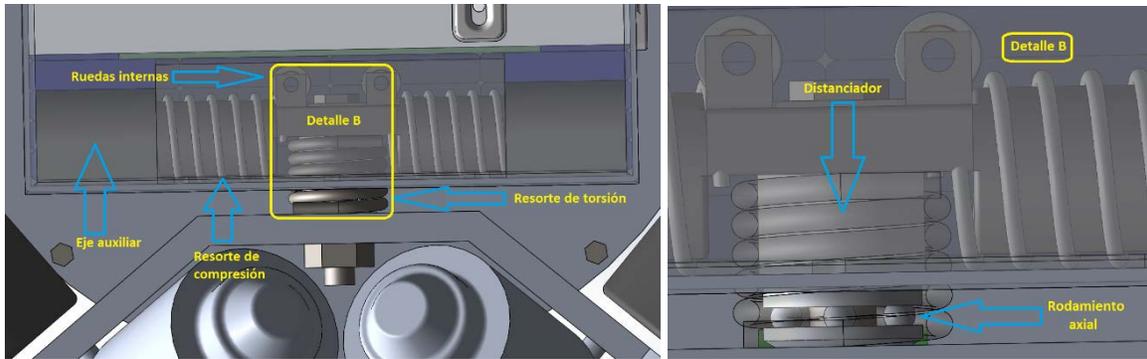


Figura 2.13 Mecanismo para desplazamiento del eje del móvil (continuación)

Para evitar que el eje de los motores tenga que soportar la carga que resulta de la interacción entre la rueda y la tubería se hace uso de rodamientos radiales.

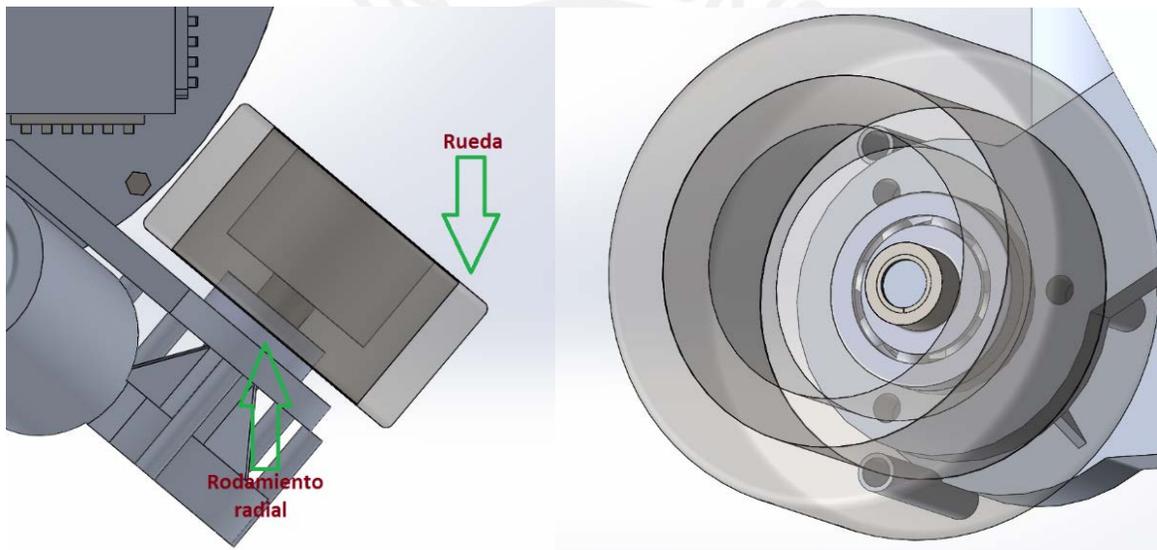


Figura 2.14 Disposición rodamiento radial

El sistema cuenta con una etapa de recepción, procesamiento y almacenamiento de las señales de los sensores de efecto Hall, dicho proceso lo lleva a cabo un controlador de la familia National Instruments, este dispositivo además se encarga de enviar los comandos a las cámaras, que se encuentran en el exterior del sistema (Figura 2.15), para capturar imágenes de las posibles fallas.

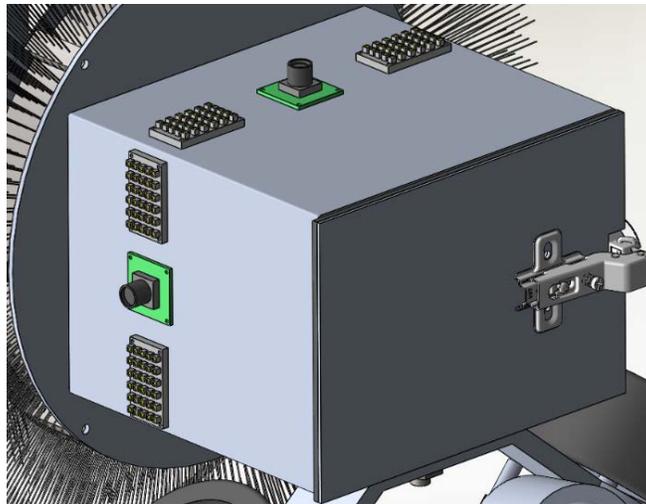


Figura 2.15 Disposición de cámaras y lámparas del sistema

Además dicho controlador se mantiene comunicado con un controlador Arduino, el cual está encargado de encender las lámparas de iluminación para cuando se tenga que capturar imágenes de las posibles fallas, también se encarga de controlar los motores recibiendo como señales de control la corriente que circula por cada uno de los motores y también el ángulo relativo que existe entre el eje del móvil y el “cuerpo” del sistema para así poder determinar si existe algún tipo de anomalía en el funcionamiento de los motores.

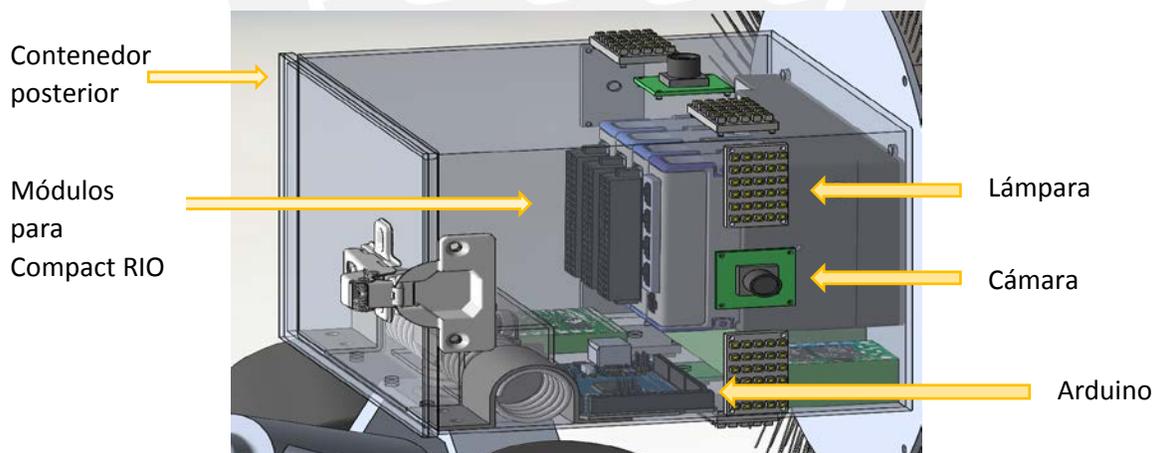


Figura 2.16 Disposición de controladores y tarjetas adicionales

Por último se encarga de la recepción, procesamiento y almacenamiento de las señales que provienen del sistema de geo localización, compuesto por un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, para su posterior sincronización con las posibles fallas encontradas durante el transcurso del análisis.

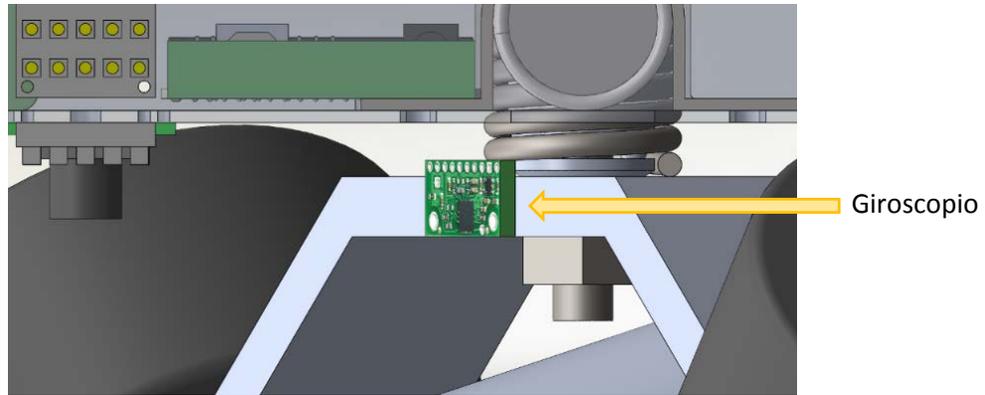


Figura 2.17 Disposición de giroscopio para control de motor

El mecanismo que se encarga de mantener los sensores de efecto Hall a distancia constante determinada consta de tres partes (Figura 2.18). La primera es una parte fija que va unida al eje del núcleo magnético. La segunda es una parte móvil que va unida a la parte fija por medio de un resorte de compresión, el cual asegura una distancia constante entre el arreglo de sensores y la pared de la tubería, y a la vez se desliza sobre la parte fija. Por último se cuenta con unas pequeñas ruedas que permiten el desplazamiento de la parte móvil del mecanismo sobre la pared de la tubería (Figura 2.19).

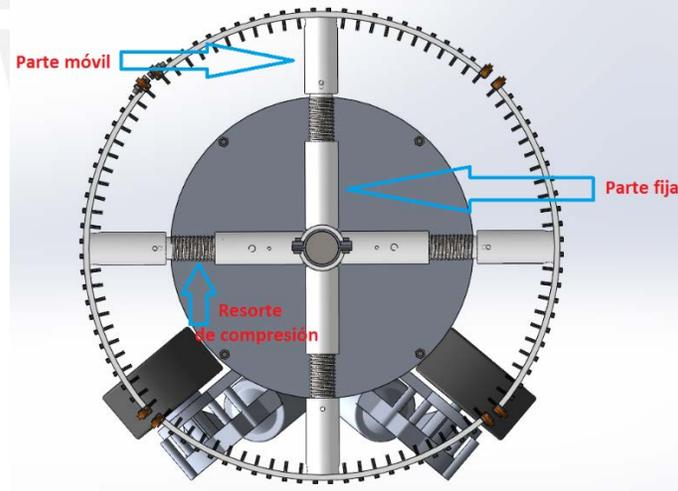


Figura 2.18 Mecanismo para soporte de sensores de efecto Hall

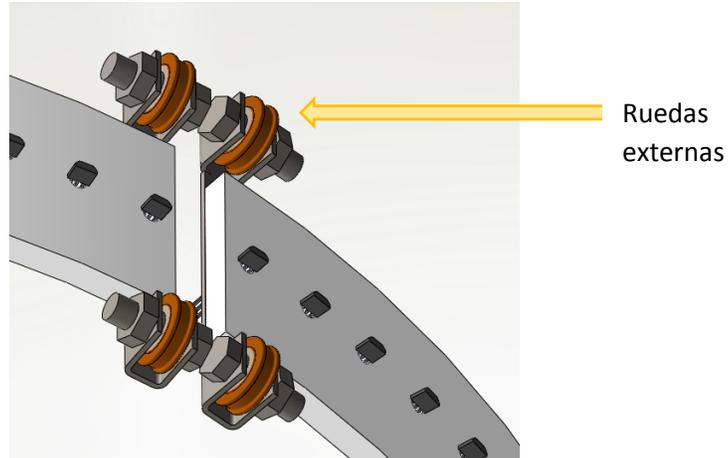


Figura 2.19 Mecanismo para soporte se sensores de efecto Hall y disposición de sensores

Otra parte importante del sistema es la que se encarga de saturar magnéticamente la tubería, para lograr dicho objetivo se hace uso de 3 elementos principales (Figura 2.20). El primero es un imán permanente en forma de anillo, el cual debe de poseer la energía necesaria para poder saturar la tubería. El segundo elemento es el núcleo magnético, cuyo objetivo es el de guiar a las líneas de flujo magnético a través de un camino cerrado (crea un circuito magnético). Por último los cepillos de acero (*steel brushes*) al igual que el núcleo magnético permiten cerrar el circuito y al ser relativamente flexibles permiten que el sistema pueda girar en las uniones reduciendo el riesgo de que el sistema se quede estancado. Para evitar que el campo magnético generado por los imanes interfiera con la electrónica del sistema se hace uso de un aislante magnético conocido como MU-metal, el cual tiene una permeabilidad magnética relativa de 80 000.

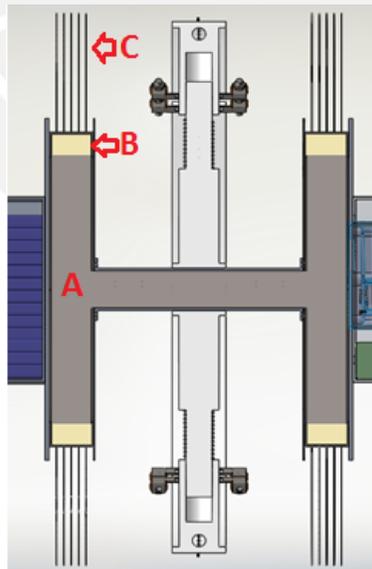
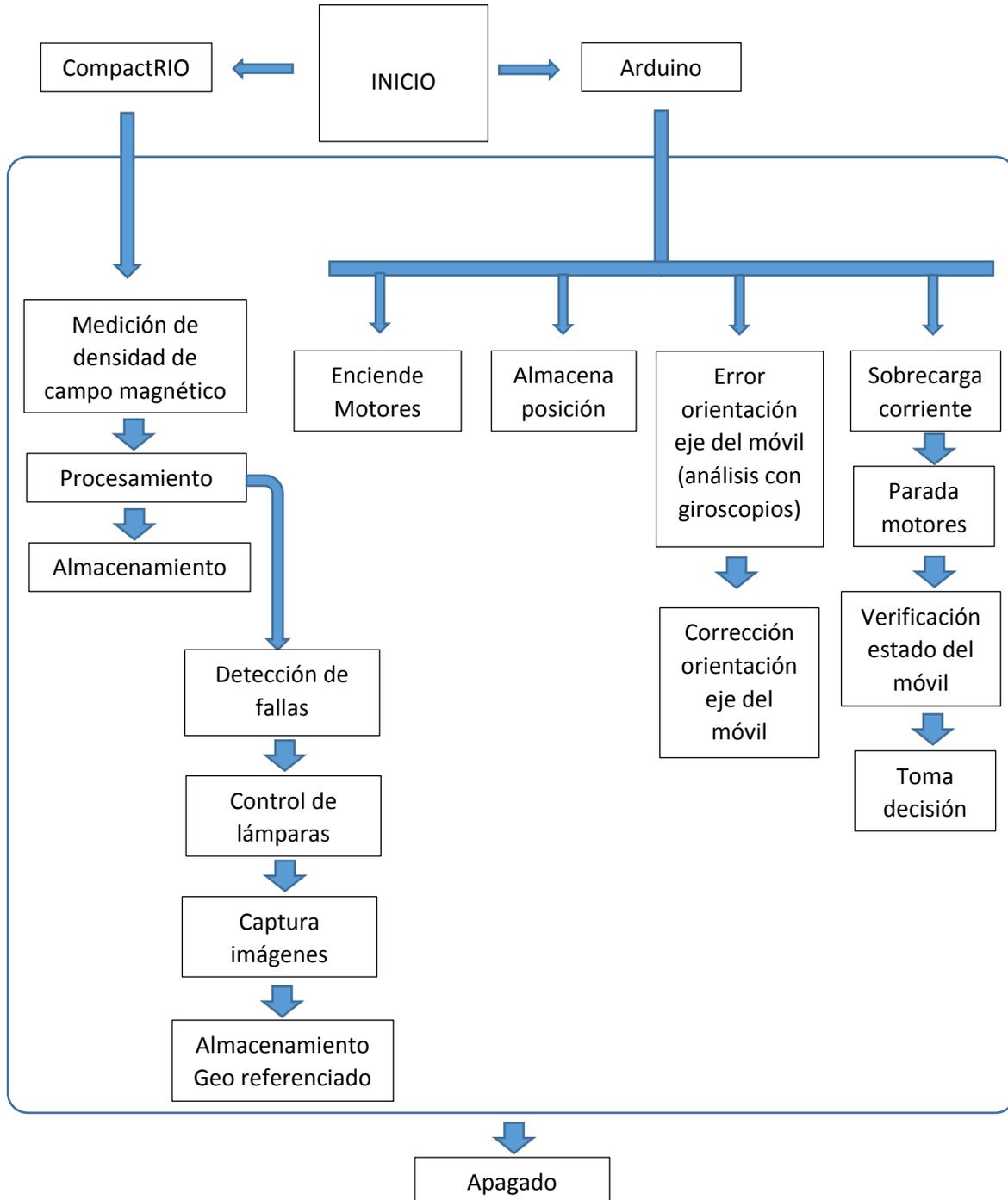


Figura 2.20 Esquema disposición elementos para saturación de tubería (A: Núcleo magnético B: Imán permanente C: Cepillos de acero)

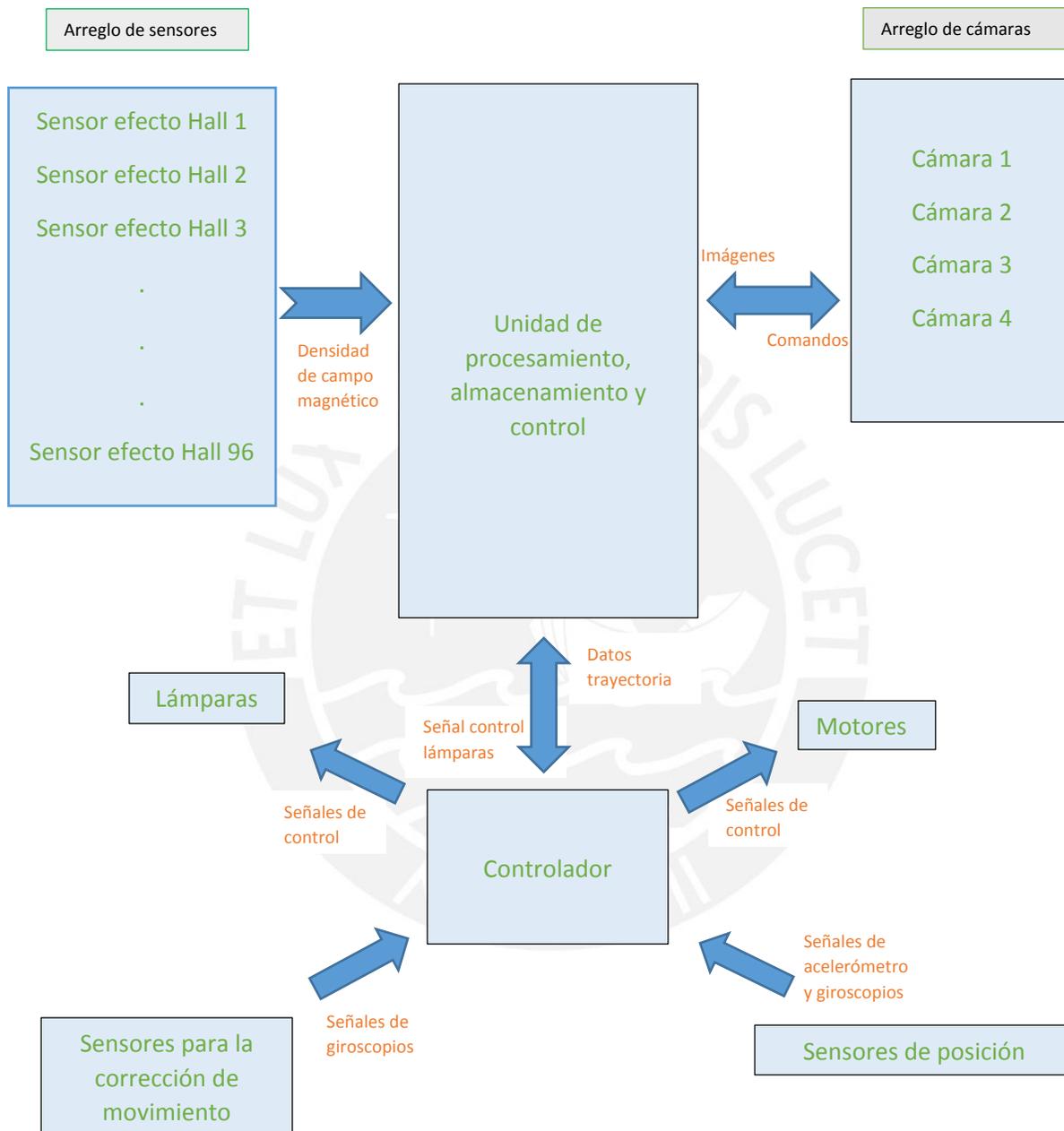
Capítulo 3

Sistema mecatrónico

3.1 Diagrama de funcionamiento del sistema mecatrónico



3.2 Diagrama de funcionamiento de los circuitos del sistema mecatrónico



El sistema inicia, después de haber sido activado por el usuario, con el encendido de los motores y al mismo tiempo también se empieza a realizar la lectura de los dispositivos de ubicación para almacenar el punto inicial de referencia para el desplazamiento del móvil, también se almacena la información de los giroscopios de 2 ejes para definir el ángulo inicial de referencia para luego poder hacer la realimentación de dicho sensor con el controlador y verificar si el sistema sufre algún fallo.

Después de haber almacenado las variables iniciales para el control y seguimiento del sistema se empieza a leer las señales de los sensores de efecto Hall, se hace un pre-procesamiento antes de hacer la conversión a valores de densidad de campo magnético (B) y se va almacenando los datos previamente procesados.

En la tarjeta del controlador Arduino se realiza la lectura de la corriente que circula a través de cada uno de los motores y con dicha señal se hace una realimentación para el control y protección de los motores. En caso de que el motor exija corriente en exceso, este será desenergizado y se hará un análisis para intentar determinar cuál fue la causa y en base a eso tomar una decisión. Dichas decisiones se explican en la sección 3.5

La tarjeta del controlador Arduino también está encargada de sensar periódicamente el ángulo relativo que existe entre el “cuerpo” del sistema y el eje del móvil, esta señal también es usada como realimentación para el control del sistema.

Por último la tarjeta del controlador Arduino se encarga de la lectura del posicionamiento del móvil con un periodo definido para luego sincronizar esta información con los datos de fallas que se obtienen de la lectura de los sensores de efecto Hall.

Durante toda la inspección de la tubería se realiza los procesos antes mencionados constantemente ya que dicha información es importante ya sea para el control del sistema o para hacer el informe del análisis de la inspección. Si mientras el móvil se está desplazando a través de la tubería detecta un incremento significativo en la lectura de los sensores de efecto Hall entonces el sistema asumirá que dicho incremento de densidad de campo magnético se debe a una falla en la tubería ya sea por una fisura o corrosión (problemas más típicos).

La acción que se tomará inmediatamente después de haber detectado la posible falla será posicionar al móvil de tal manera que al encender las lámparas y capturar imágenes de la tubería se pueda apreciar con claridad las fallas que previamente se detectaron en un análisis después de que el móvil haya terminado su recorrido.

Nota: El valor de las frecuencias de muestreo de los distintos sensores se encuentran detallados en el anexo A-6.

3.2 Sensores y actuadores

3.2.1 Actuadores

3.2.1.1 Motores para traslación del sistema dentro de la tubería.

Motores DC de 24 VDC para traslación del sistema dentro de la tubería.

Según los cálculos para determinar el torque necesario para poder desplazar el móvil a través de la tubería se determinó que dicho torque variaría entre 0.2 N.m – 4.5 N.m a condiciones nominales y cumpliendo con los requerimientos del sistema. Dichos cálculos se muestran en el anexo A-1.

Se eligió un motor de 5 N.m ya que este cumple con el requerimiento de torque y el excedente de torque es por protección, ya que el móvil además es propenso, bajo condiciones no óptimas de la tubería, a quedar atascado. Es entonces cuando el excedente de torque tiene utilidad, ya que podría ayudar al móvil a salir de dicha condición.



Figura 3.1 Motor DC

TABLA 3.1 Características del motor DC

Marca	Doga
Modelo	111.3761.30.00E
Voltaje	24 VDC
Torque	5 N.m
Grado de protección	IP53

En la figura 3.2 se puede apreciar la distribución delantera de los motores DC para el movimiento del móvil dentro de la tubería.

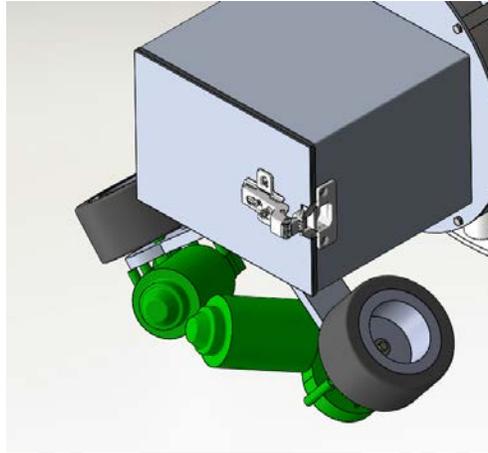


Figura 3.2 Ubicación motores DC

3.2.2 Sensores

3.2.2.1 Sensor de efecto Hall

Para poder escoger el sensor de efecto Hall adecuado lo más importante es determinar el rango de valores a los que estará expuesto el sensor. Se determinó que el rango al que estará expuesto el sensor será hasta 780 Gauss aproximadamente, esto se determinó en base a simulaciones magnéticas que se muestran en el capítulo 4. Cumpliendo este sensor con el rango de valores de exposición a lo largo de la trayectoria del móvil.



Figura 3.3 Sensor de efecto Hall

TABLA 3.2 Características sensor de efecto Hall

Marca	Honeywell
Modelo	SS496A
Voltaje	5 VDC
Sensibilidad	2.5 mV/G
Rango	-840 G a 840 G

En la figura 3.4 se muestra la disposición de los sensores de efecto Hall unidos al mecanismo que los mantiene a una distancia constante de la tubería a inspeccionar.

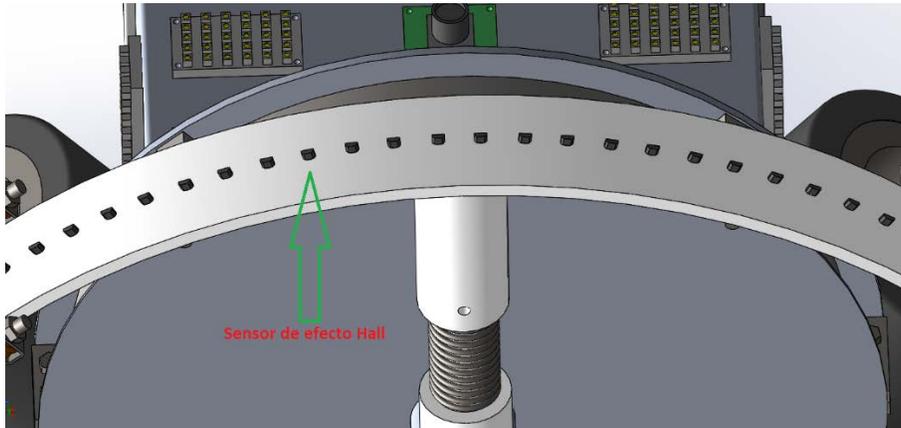


Figura 3.4 Ubicación sensores de efecto Hall

3.2.2.2 Acelerómetro analógico 3 ejes

Este dispositivo es usado para que en conjunto con un giroscopio de 3 ejes se pueda determinar la ubicación del móvil en un determinado instante. Debido a que el móvil a condiciones normales no se verá afectado por grandes aceleraciones, ya que su velocidad de movimiento no supera los 0.2 m/s, se selecciona el acelerómetro MMA7361L de la marca Freescale Semiconductor ya que cumple con los requerimientos.

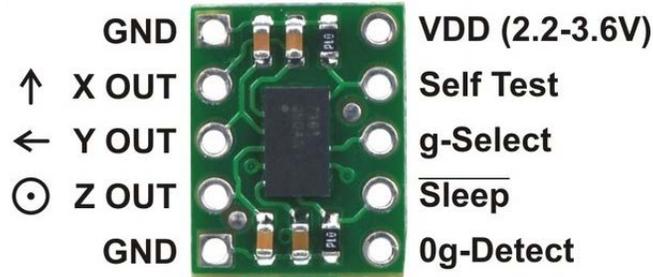


Figura 3.5 Acelerómetro analógico 3 ejes

TABLA 3.3 Características acelerómetro analógico 3 ejes

Marca	Freescale Semiconductor
Modelo	MMA7361L
Voltaje	3,3 VDC
Sensibilidad	800 mV/g
Rango	$\pm 1.5g, \pm 6g$

En la figura 3.6 se observa la disposición del acelerómetro analógico de 3 ejes en la parte delantera del móvil.

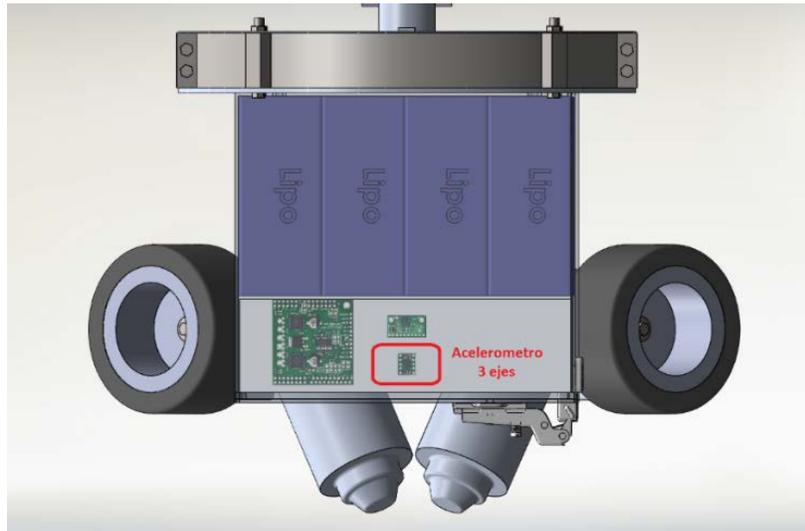


Figura 3.6 Ubicación acelerómetro analógico 3 ejes

3.2.2.3 Giroscopio digital 3 ejes

Este dispositivo es usado para que en conjunto con un acelerómetro de 3 ejes se pueda determinar la ubicación del móvil en un determinado instante. Debido a que el móvil a condiciones normales no se verá afectado por grandes aceleraciones ni velocidades angulares, ya que su velocidad de movimiento no supera los 0.2 m/s, entonces el giroscopio elegido cumple con las exigencias del sistema.

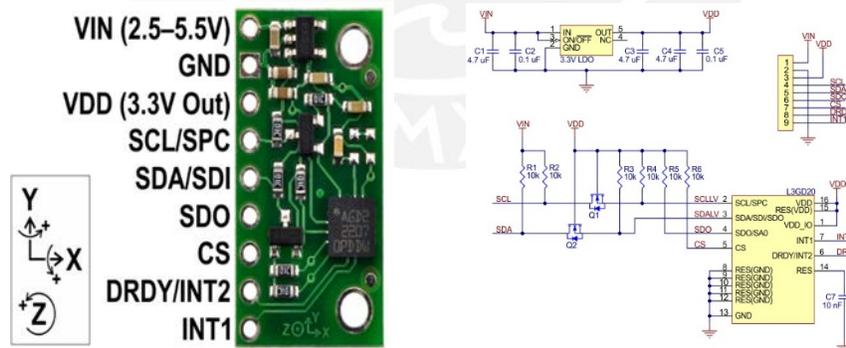


Figura 3.7 Giroscopio digital 3 ejes y esquema de conexión

TABLA 3.4 Características giroscopio digital 3 ejes

Marca	STMicroelectronics
Modelo	L3GD20
Voltaje	3,3 VDC
Sensibilidad	8.75, 17.5 y 70 mdps/digit
Rango	$\pm 250^{\circ}/s$, $\pm 500^{\circ}/s$ y $\pm 2000^{\circ}/s$
Data output rate	95/190/380/760 Hz

En la figura 3.8 se observa la disposición del giroscopio digital de 3 ejes en la parte delantera del móvil.



Figura 3.8 Ubicación giroscopio digital 3 ejes

3.2.2.4 Giroscopio analógico 2 ejes

Este dispositivo se usa para medir periódicamente cual es el ángulo existente entre el eje del móvil y el “cuerpo” del móvil. Dicha señal es usada para verificar el estado del móvil y en caso de que exista un fallo tomar decisiones para superar dicha falla en base a los datos que se obtengan de las señales de realimentación. Como se mencionó previamente para el giroscopio digital de 3 ejes el rango de valores que se pueden medir con este sensor cumple con los requerimientos del sistema.

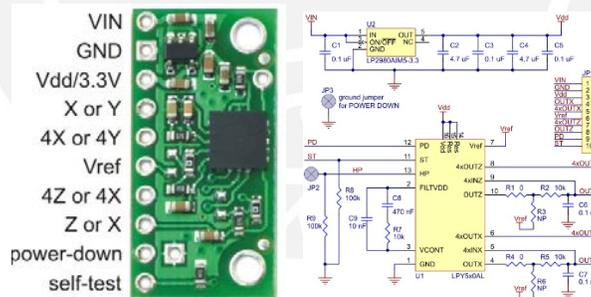


Figura 3.9 Giroscopio analógico 2 ejes y esquema de conexión

TABLA 3.5 Características giroscopio analógico 2 ejes

Marca	STMicroelectronics
Modelo	L3GD20
Voltaje	3 VDC
Sensibilidad	2 mV/°/s y 0.5 mV/°/s
Rango	±500°/s y ±2000°/s

En la figura 3.10 se muestra la disposición de los sensores analógicos 2 ejes ubicados en los ejes delantero y posterior del móvil.

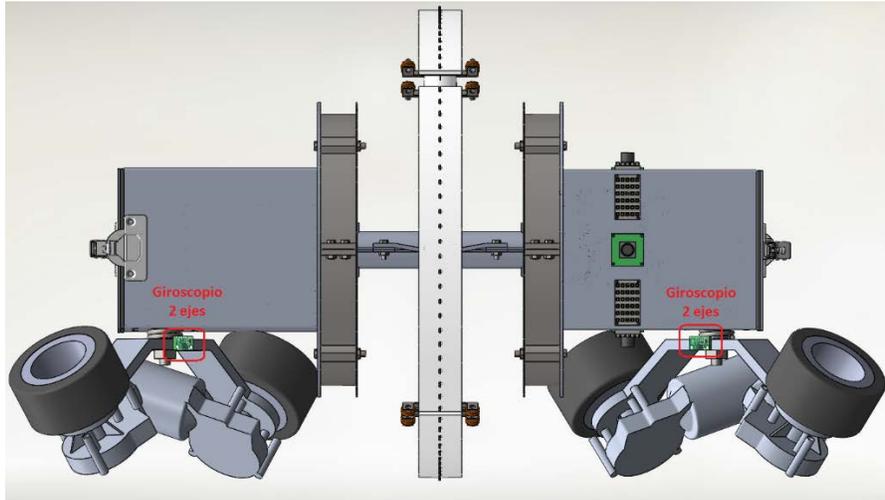


Figura 3.10 Ubicación de giroscopios analógicos 2 ejes

3.2.2.5 Baterías de polímero de ion-litio (*Lithium-ion polymer batteries*)

Se eligieron este tipo de batería ya que son capaces de entregar gran cantidad de corriente, ideal para los motores. Al ser de 3,7 V cada batería se pueden realizar distintas configuraciones para alcanzar los voltajes deseados dentro del sistema. Por último, sus dimensiones permiten que su distribución dentro del vehículo, lo cual no se podía realizar con baterías que cumplieran los requerimientos del sistema, pero tenían otras dimensiones, además tenían ventaja en cuanto a peso y precio.



Figura 3.11 Batería Lipo

TABLA 3.6 Características batería Lipo

Marca	Turnigy
Modelo	T5800.1S.25
Voltaje	3,7 VDC
Capacidad	5800 mAh
Descarga (C)	25

En la figura 3.12 se muestra cual es la ubicación de las baterías Lipo.

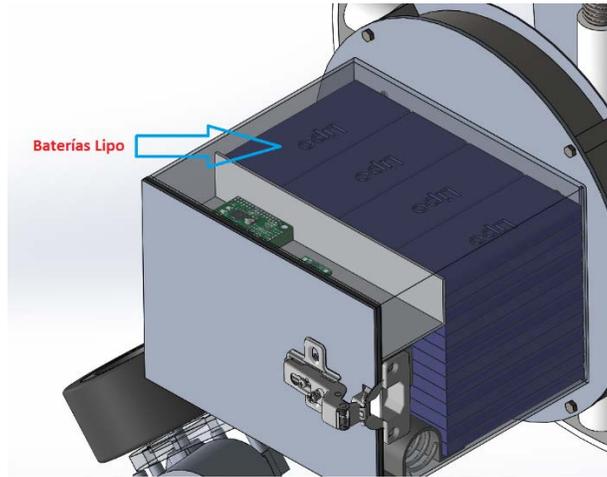


Figura 3.12 Disposición baterías Lipo en la parte delantera del móvil.

3.2.3 Componentes adicionales

3.2.3.1 Cámara

Cuando el sistema detecta una falla es necesario plasmarla en una imagen para poder apreciar la magnitud de la falla. Si bien los datos de los sensores de efecto Hall brindan cierta información de cómo son las fallas detectadas estas se aprecian mejor en una imagen. Se elige esta cámara por tener un consumo de energía bajo buen ángulo de visión y una resolución aceptable.

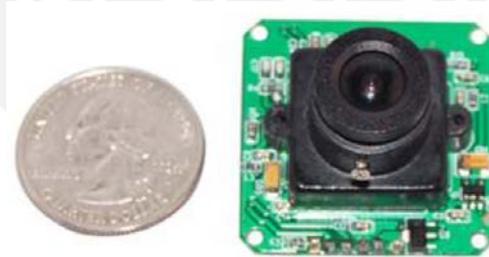


Figura 3.13 Cámara

TABLA 3.7 Características cámara

Marca	Linksprite
Modelo	LS-Y201
Voltaje	5 VDC
Resolución	640*480
Angulo de visión	60° - 120°
Comunicación	serial

En la figura 3.14 se muestra la disposición de las cámaras en la parte posterior del móvil.

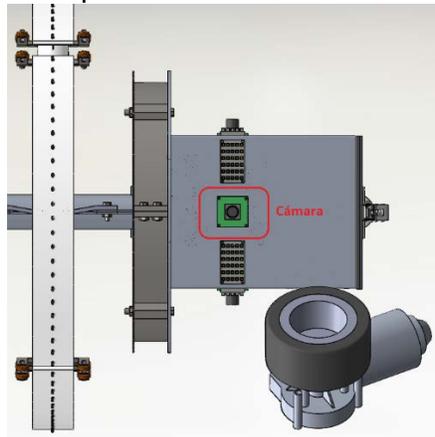


Figura 3.14 Ubicación de cámaras en el móvil

3.2.3.2 Lámpara

Para poder capturar las imágenes de las fallas detectadas es indispensable el uso de lámparas para la iluminación de la zona donde se capturará la imagen, ya que las cámaras usadas para la captura de imágenes no tienen mucha sensibilidad en la oscuridad. Se escoge este dispositivo ya que ofrece un gran ángulo de iluminación y un buen flujo luminoso. El flujo luminoso de esta lámpara se compara a un foco ahorrador de 10 W



Figura 3.15 Lámpara Festoon Base

TABLA 3.8 Características de lámpara Festoon Base

Marca	Festoon Base
Modelo	UPCB-CWHP30-FES
Voltaje	24 VDC
Flujo luminoso	150 lm
Angulo de iluminación	120°
Potencia	4.32 W

En la figura 3.16 se muestra la disposición de las cámaras en la parte posterior del móvil.

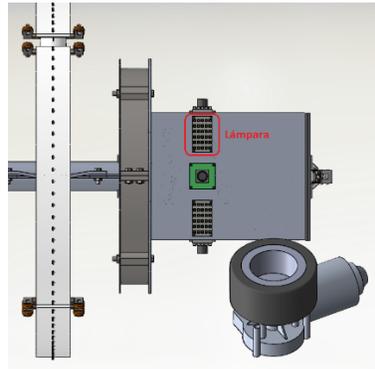


Figura 3.16 Ubicación de lámparas Festoon Base

3.2.3.3 Relay

En el sistema se hace uso de este dispositivo para activar las lámparas de iluminación y las lámparas de indicación de estado del sistema (funcionamiento - detenido). Se escoge este dispositivo ya que es capaz de soportar las cargas a las que estará conectado y el control de este es directo desde el controlador, no se necesita acondicionamiento de voltaje.



Figura 3.17 Relay 5VDC

TABLA 3.9 Características de relay 5VDC

Marca	Omron
Modelo	G5LE
Voltaje de control	5 VDC
Capacidad del contacto	10 A a 120 VAC; 8 A a 30 VDC
Potencia máxima	350W; 4000VA
Mínima carga permisible	100 mA a 5 VDC

En la figura 3.18 se observa la disposición del relay 5VDC en la parte posterior del móvil.

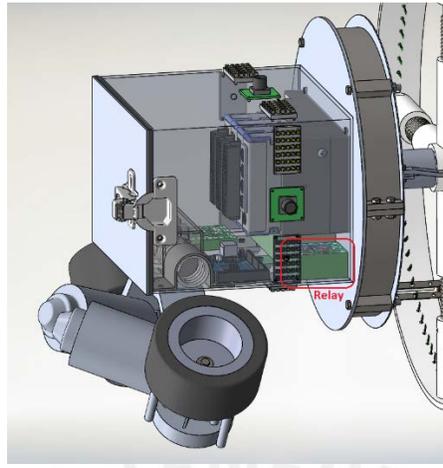


Figura 3.18 Ubicación Relay 5VDC

3.2.3.4 Driver

Se eligió este dispositivo debido a que es capaz de soportar hasta 5 A de corriente de salida continua por cada motor y además el dispositivo tiene una salida de corriente proporcional a la que consume el motor para la realimentación y control del sistema que se utiliza para determinar si el motor está bloqueado o está frente a un obstáculo que le impide continuar con su trayectoria

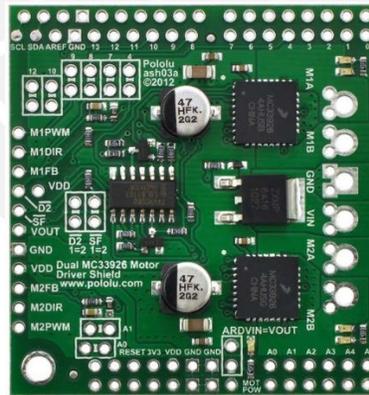


Figura 3.19 Driver para motores

TABLA 3.10 Características driver para motores

Marca	Freescale
Modelo	MC33926
Voltaje alimentación	5 VDC
Voltaje para motores	24VDC
Salida continua de corriente	Hasta 5 A
Realimentación corriente de salida	0.24% de corriente de salida

En la figura 3.20 se muestra la ubicación de los drivers para motores tanto en la parte delantera como posterior del móvil.

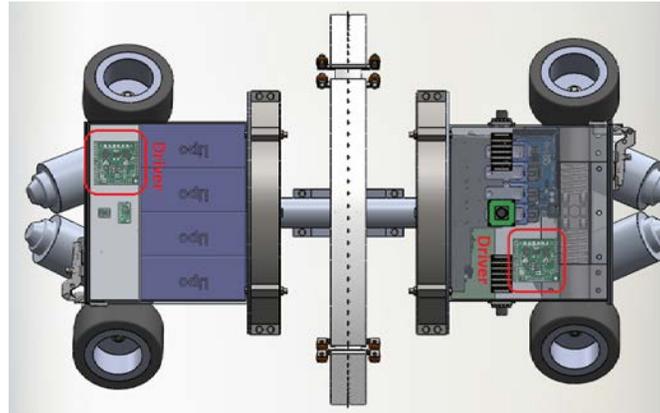


Figura 3.20 Ubicación drivers para motores

3.2.3.5 Módulos

Se eligió este dispositivo, ya que cumple con los requerimientos. Es decir posee la cantidad de entradas requeridas, resolución encima de la deseada debido que se necesita una resolución de 12 bits y en los módulos que ofrece National instruments con 32 canales solo hay resoluciones de 8 bits y 16 bits. Por último cumple con el rango de voltajes de entrada.



Figura 3.21 Módulo NI 9205

TABLA 3.11 Características módulo NI 9205

Marca	National Instruments
Modelo	NI 9205
Voltaje alimentación	Chasis Compact RIO
Entradas	32 entradas analógicas de una sola terminal o 16 diferenciales
Resolución	16 bits
Frecuencia de muestreo global	Hasta 250 kS/s
Rango	Programable de ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V y ± 10 V

Se escogió ese dispositivo ya que se necesitaban 4 conexiones seriales para poder controlar las cámaras ya que estas se comunican por este tipo de puertos. Asimismo su velocidad de transferencia es alta.



Figura 3.22 Módulo NI 9870

TABLA 3.12 Características módulo NI 9870

Marca	National Instruments
Modelo	NI 9870
Voltaje alimentación	24 VDC
Puertos	4 puertos seriales RS232
Velocidad	Baudios desde 14 b/s a 921.6 kb/s

En la figura 3.23 se observa la distribución de los módulos en la parte posterior del móvil.

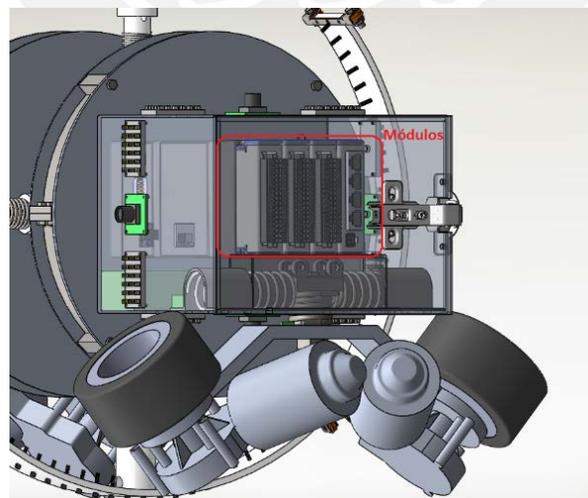


Figura 3.23 Ubicación módulos NI 9205 y NI 9870

3.2.3.6 Arduino Mega 2560

Se eligió este dispositivo porque cumple con los requerimientos de entradas analógicas deseadas, entradas y salidas digitales, salidas PWM para controlar los motores, soporta comunicación SPI y comunicación serial para la interacción con el compact RIO.

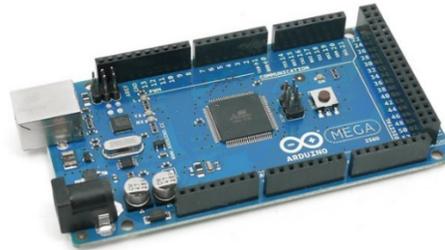


Figura 3.24 Arduino Mega 2560

TABLA 3.13 Características Arduino Mega 2560

Marca	Arduino
Modelo	Mega 2560
Voltaje alimentación (Vcc)	12 VDC
Entradas / Salidas analógicas	16 / 0
Resolución entradas analógicas	10 bits
Rango	0V - Vcc
Entradas / Salidas digitales	54
Salidas PWM	15

En la figura 3.25 se detalla la ubicación del controlador Arduino Mega 2560 en la parte posterior del móvil.

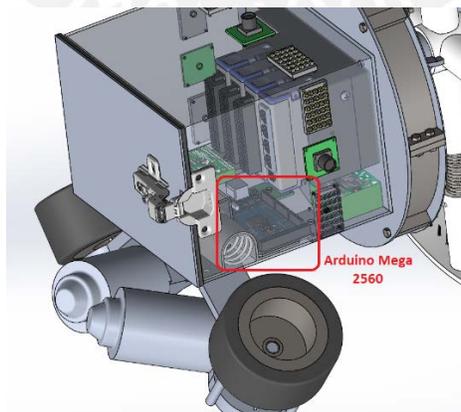


Figura 3.25 Ubicación Arduino Mega 2560

3.2.3.7 Compact RIO 9076

Se eligió este dispositivo por ser un sistema integrado dedicado a la adquisición de datos con capacidad de lectura, para este caso, de 96 canales analógicos de una sola terminación y además se conecta un módulo de entradas seriales para el control de cámaras. Los módulos de entradas analógicas son capaces de muestrear datos a altas frecuencias, por ejemplo si los 32 canales se encuentran conectados a sensores, entonces se podrá muestrear cada canal hasta una frecuencia de 7,8 kHz, lo cual es suficiente para cumplir los requerimientos del sistema.



Figura 3.26 Compact RIO 9076

TABLA 3.14 Características Compact RIO 9076

Marca	National Instruments
Modelo	Compact RIO 9076
Voltaje alimentación (Vcc)	24 VDC
Ranuras para temporización, control y procesamiento de E/S personalizados	4
Velocidad de procesador	400 MHz
Puertos para comunicación con periféricos	1 Puerto Ethernet, 1 puerto serial RS232 y 1 puerto USB

En la figura 3.27 se muestra la ubicación de controlador Compact RIO 9076 en el lado posterior del móvil.

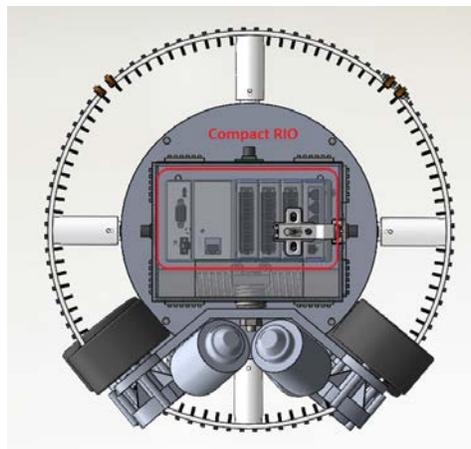
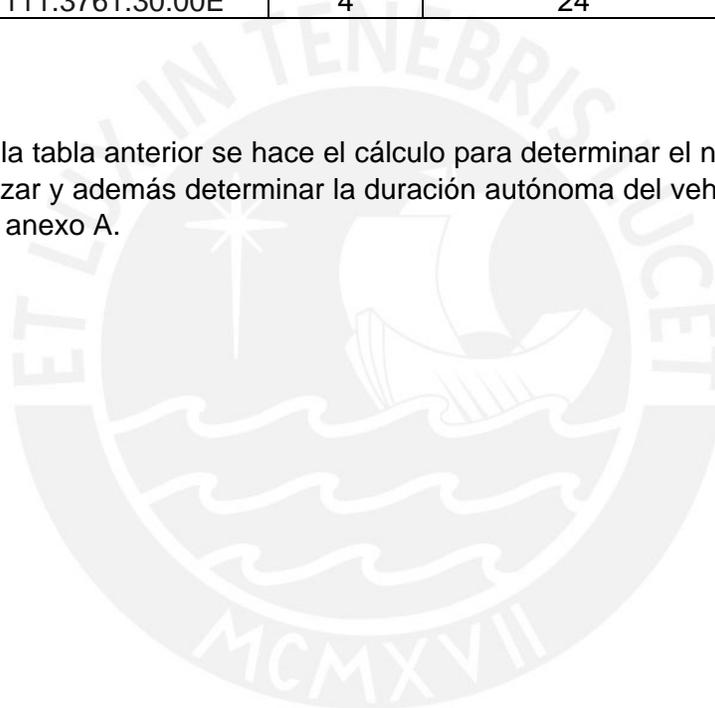


Figura 3.27 Ubicación compact RIO 9076

Tabla 3.15 Requerimiento de consumo máximo de energía eléctrica de dispositivos

Dispositivo	Cantidad	Voltaje Alimentación (V)	Corriente (mA)
Compact RIO 9075	1	24	625
Giroscopio 2 ejes LPY550AL	2	12	7
Giroscopio 3 ejes L3GD20	1	5	7
Acelerómetro 3 ejes MMA7361L	1	3,3	0.5
Arduino MEGA 2560	1	12	40
Relay G5LE	2	12	17
Lámpara 30x3528SMD	4	24	180
Driver MC33926	2	5	50
Camera LS-Y201	4	5	80
Sensor efecto Hall SS496A	96	5	7
Motor DOGA 111.3761.30.00E	4	24	1000 - 2000

Nota: En base a la tabla anterior se hace el cálculo para determinar el número de baterías necesarias a utilizar y además determinar la duración autónoma del vehículo. Este cálculo se muestra en el anexo A.



3.3 Planos del sistema mecatrónico

3.3.1 Planos Mecánicos

Todos los planos mecánicos se muestran a detalle en el anexo B

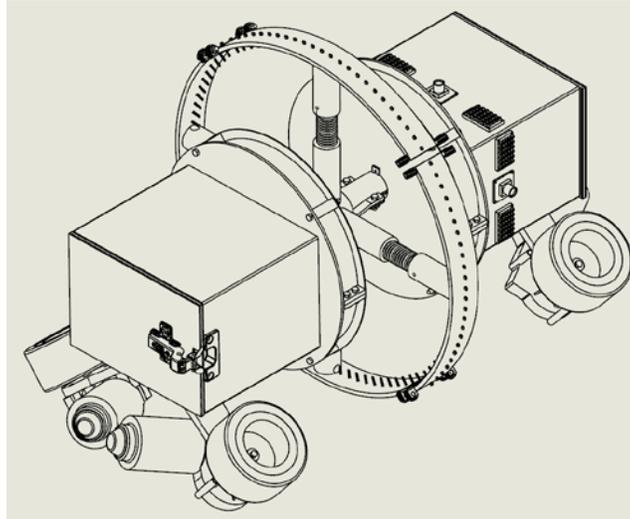


Figura 3.26 Plano sistema completo isométrico

En la figura 3.27 se observa la pieza cuerpo superior y su respectivo desarrollo, que es donde se sitúan algunos de los componentes electrónicos tales como como los controladores Arduino y Compact RIO además del driver del motor. En el desarrollo se pueden notar diversos agujeros, cuya utilidad es permitir la sujeción de las cámaras y lámparas mediante el uso de tornillos y tuercas.

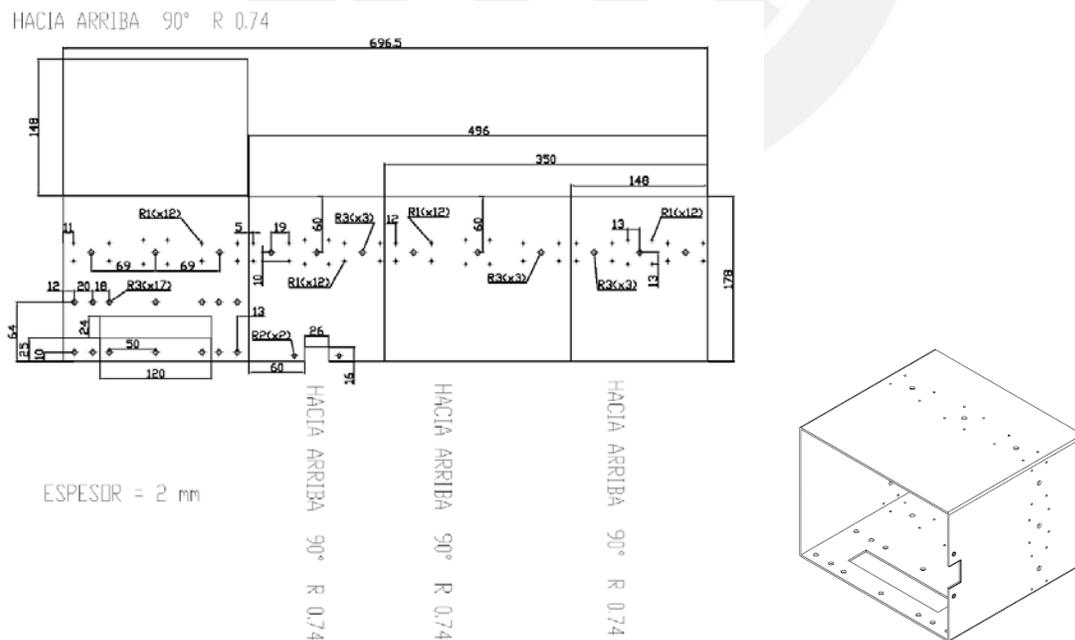


Figura 3.27 Plano cuerpo posterior, vista isométrica (derecha) y desarrollo (izquierda)

En la figura 3.28 se muestra la geometría y las dimensiones de las tapas delantera y posterior, las cuales van unidas al móvil mediante un mecanismo de bisagra el cual permite el acceso del usuario a los dispositivos internos para poder por ejemplo extraer el USB que contiene la información del análisis realizado o también conectar una pc por conexión Ethernet para poder acceder a la información antes mencionada.

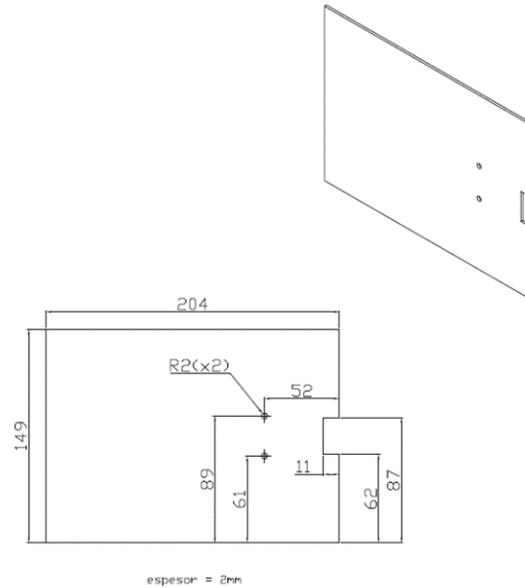


Figura 3.28 Plano tapa del móvil

En la figura 3.29 se muestra la tapa interna cuyo objetivo es proteger la cara interna del núcleo magnético y a la vez permitir la sujeción del cobertor del eje del núcleo magnético.

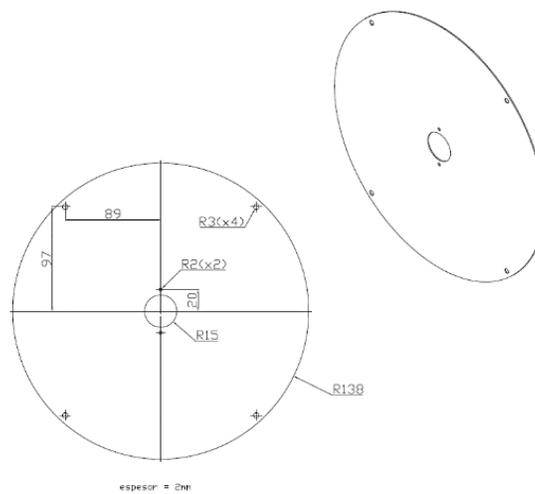


Figura 3.29 Plano tapa interna

En la figura 3.32 se ve la geometría y dimensiones de la plancha que sirve tanto para proteger la cara externa del núcleo magnético como para servir de soporte al cuerpo posterior y delantero

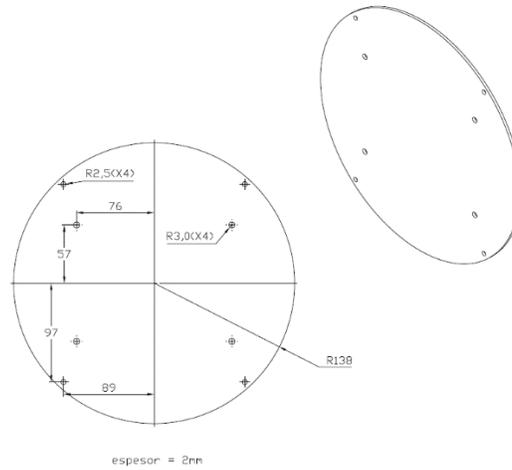


Figura 3.32 Plano soporte cuerpo posterior y delantero

En la figura 3.33 se muestra la pieza que sirve como riel para las ruedas internas del sistema cuyo objetivo es permitir que el eje auxiliar pueda desplazarse y así permitir que el sistema pueda girar en uniones tipo codo de 90°.

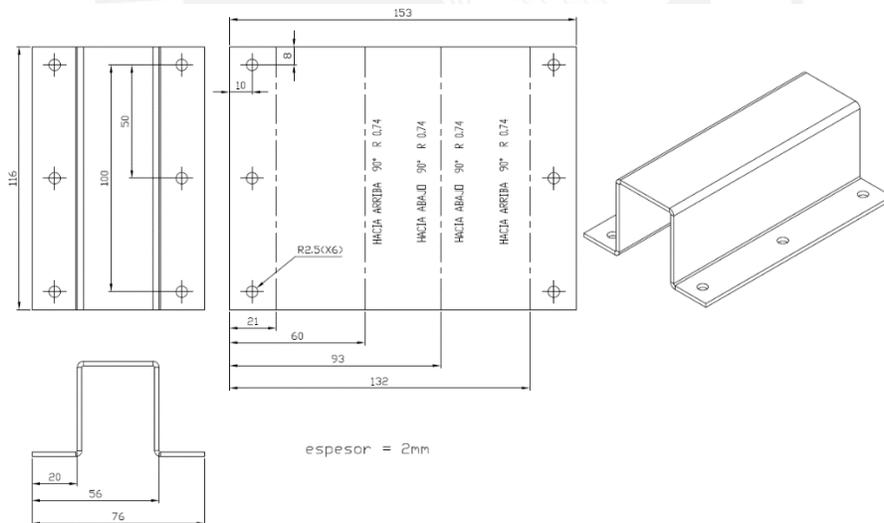


Figura 3.33 Plano riel para ruedas internas

En la figura 3.34 se muestra en cobertor de los resortes internos sobre los cuales se desliza el eje auxiliar. Esta pieza limita el desplazamiento del eje auxiliar en una sola dirección. Esta pieza va unida directamente tanto al cuerpo delantero como posterior.

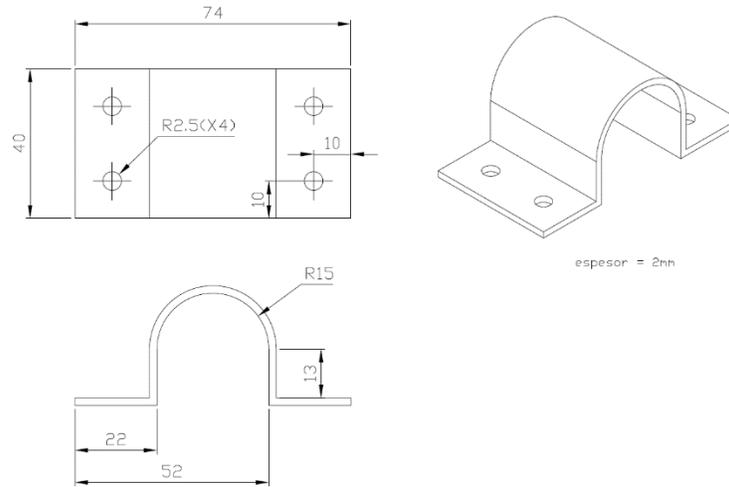


Figura 3.34 Plano cobertor resorte interno

En la figura 3.35 se muestra la pieza, cuya única utilidad es hacer una separación geométrica entre el eje auxiliar y la rodadura axial para evitar interferencias entre las piezas del sistema.

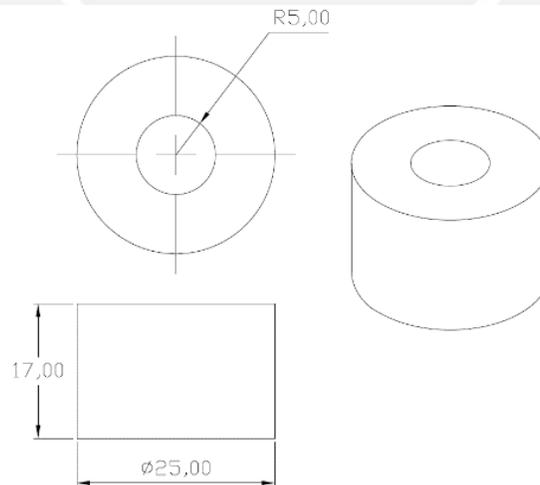


Figura 3.35 Plano distanciador

En la figura 3.36 se muestra una pieza cuya utilidad es aislar las baterías que energizan el sistema de las tarjetas electrónicas que se encuentran situadas en el cuerpo delantero.

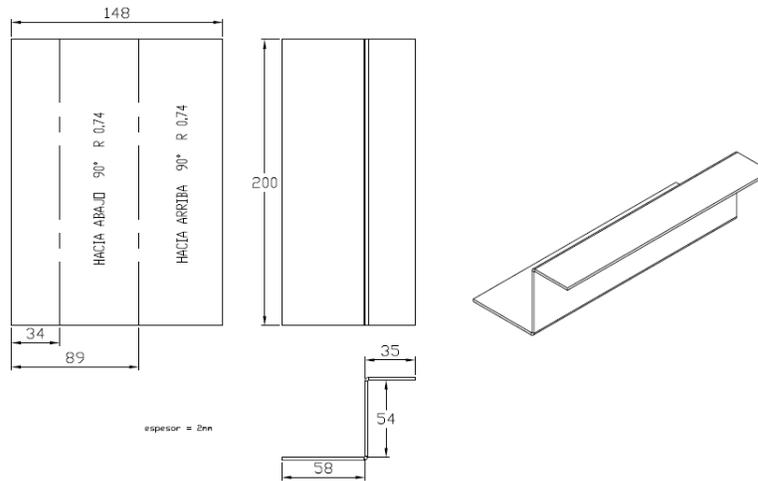


Figura 3.36 Plano separador de batería

En la figura 3.37 se muestra una pieza cuya función en el sistema es restringir el movimiento del soporte fijo sensores. Esta pieza restringe el giro del soporte fijo de sensores porque hay 2 de estas piezas ubicadas diametralmente opuestas que permiten lograr dicho objetivo. La traslación sobre el eje del núcleo magnético se bloquea de forma geométrica ya que hay una pendiente que impide el avance del soporte fijo de sensores.

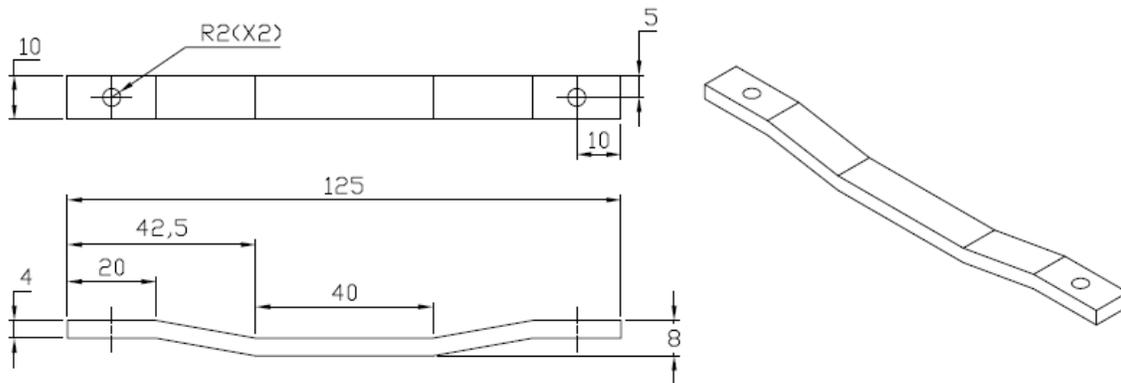


Figura 3.37 Plano limitador geométrico

En la figura 3.38 se muestra el imán permanente de neodimio (NdFe35), el cual es el encargado de magnetizar la tubería ferromagnética. Va unido directamente al núcleo magnético.

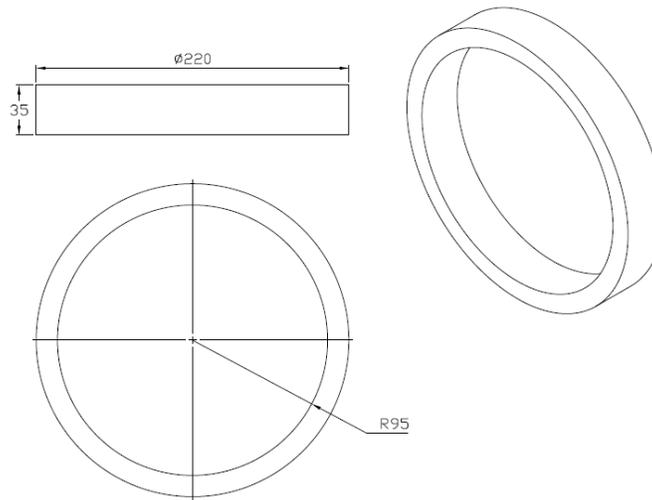


Figura 3.38 Plano imán permanente

En la figura 3.39 se muestra el núcleo magnético que cumple la función de direccionar las líneas de flujo magnético para tratar de mantener dichas líneas en un bucle y así mantener la sección de tubería analizada saturada.

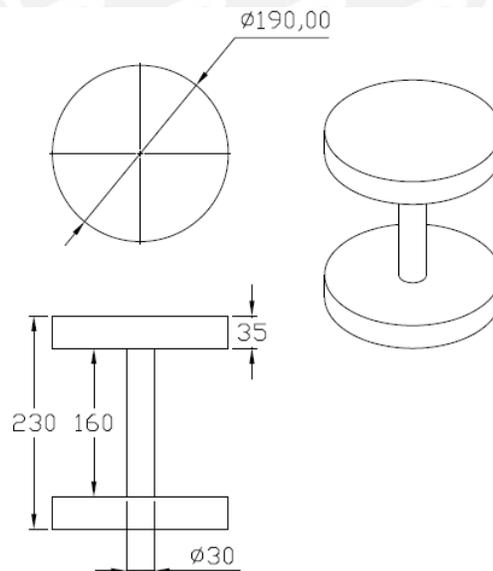


Figura 3.39 Plano núcleo magnético

En la figura 3.40 se observa el cobertor del eje del núcleo magnético funciona como protección para el eje del núcleo magnético y además permite la sujeción del limitador geométrico por medio de torinillos y pernos.

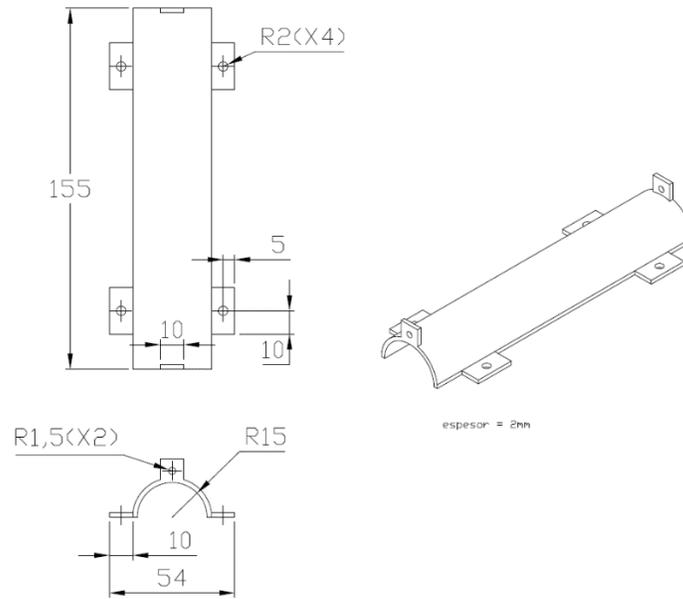


Figura 3.40 Plano cobertor eje del núcleo magnético

En la figura 3.41 se ve la pieza que se encarga sostener a los cepillos de acero que permiten el flujo de líneas de campo, este elemento va unido directamente con el anillo de neodimio.

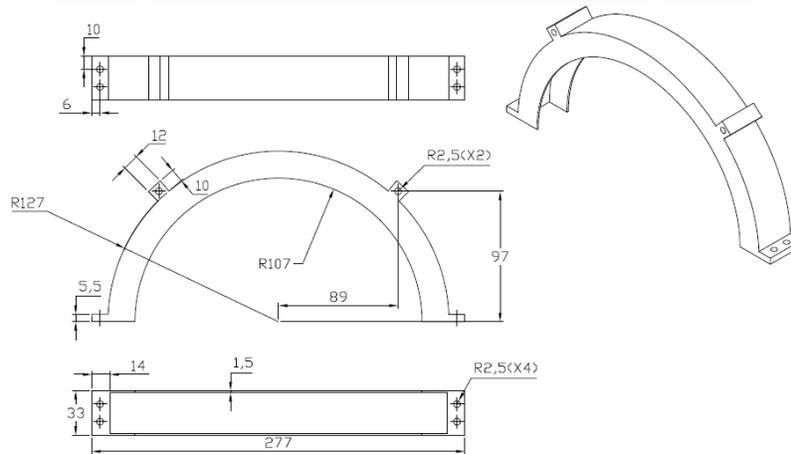


Figura 3.41 Plano soporte cepillos de acero

En la figura 3.42 se muestra el eje de móvil al cual se le unen las ruedas y los motores para permitir el desplazamiento del sistema a través de la tubería, en la parte superior va unido a un rodamiento axial que permite el giro de este eje con respecto al “cuerpo” del sistema.

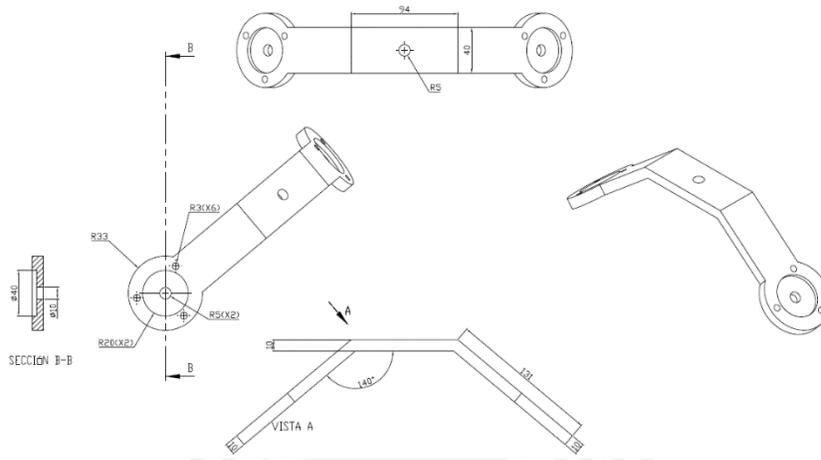


Figura 3.42 Plano eje del móvil

En la figura 3.43 se muestra la parte fija del soporte de los sensores, la cual va unida al eje del núcleo magnético y cuyo desplazamiento y rotación se ven restringidos por el limitador geométrico.

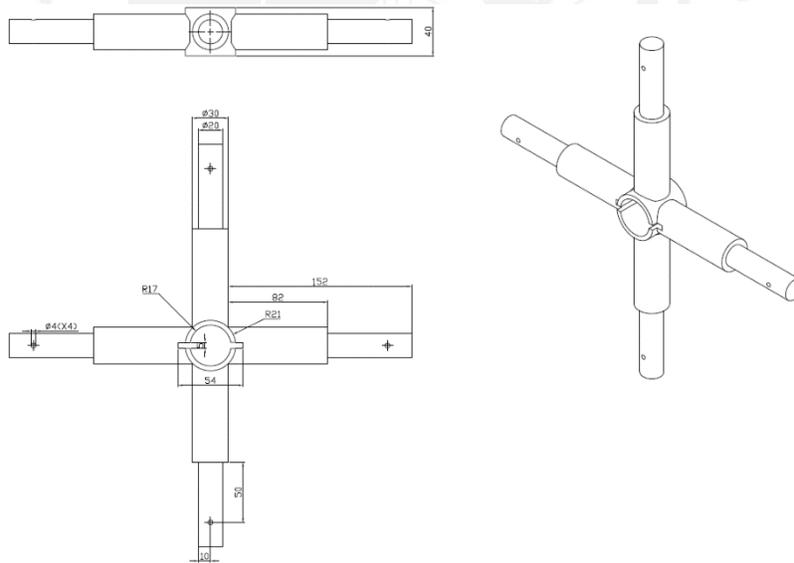


Figura 3.43 Plano soporte fijo sensores

En la figura 3.44 se muestra la parte móvil del soporte de los sensores, que es donde van posicionados los sensores de efecto Hall por medio de resina y además sobre esta van posicionados los soportes a los cuales van unidos una pequeñas ruedas que permiten el que permiten el desplazamiento a lo largo de la tubería y a la vez permiten que esta parte móvil se pueda adecuar a posibles variaciones en el diámetro.

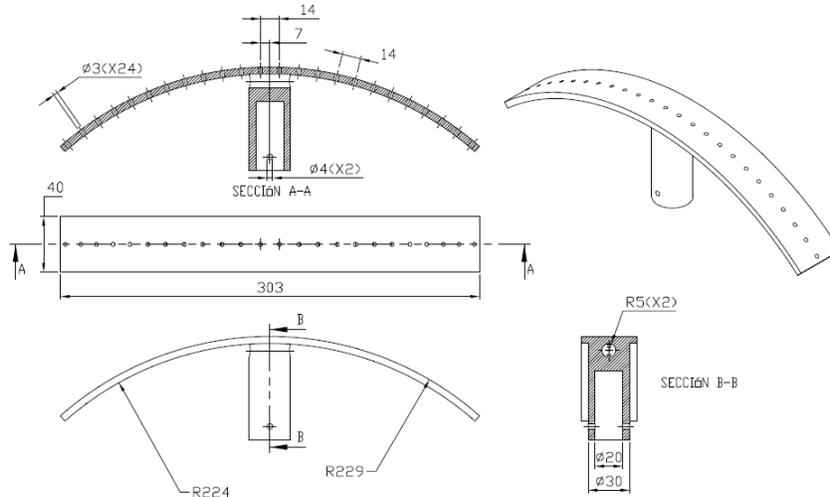


Figura 3.44 Plano soporte móvil sensores

En la figura 3.45 se muestra el eje auxiliar, el cual sirve para que el eje del móvil pueda desplazarse al momento de hacer un giro en una unión tipo codo 90°. Este elemento se desliza sobre dos resortes, cuyas características están mencionadas en el anexo A. Sobre este elemento también se acoplan soportes a los cuales irán unidos ruedas que permiten el desplazamiento sobre el riel para ruedas internas.

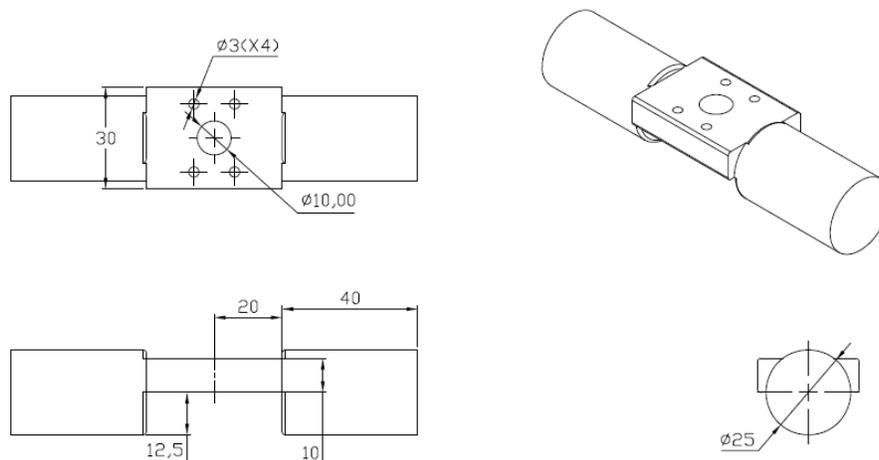


Figura 3.45 Plano eje auxiliar

3.3.2 Planos eléctricos

En la figura 3.46 se muestra la alimentación de todo el sistema, para lograr este objetivo se hace uso de baterías de polímero de ion-litio (Lithium-ion polymer batteries) más comúnmente conocidas como baterías lipo. Para alimentar el sistema se usaron solo baterías de 3.7 que van enseriadas y unidas en paralelo según sea el requerimiento. Para lograr voltajes de 5 y 12 voltios se usan reguladores que permiten mantenerlos en dicho valor. Para el los dispositivos que requieren 24V (cRIO y motores) no es indispensable que sea una valor exacto de 24 V ya que ambos trabajan en un rango aceptable de voltaje. En el esquemático también se puede notar que la parte de potencia (motores) se encuentra aislada de la parte de control para que no haya influencias sobre esta. Todos los planos eléctricos se muestran en el anexo B.

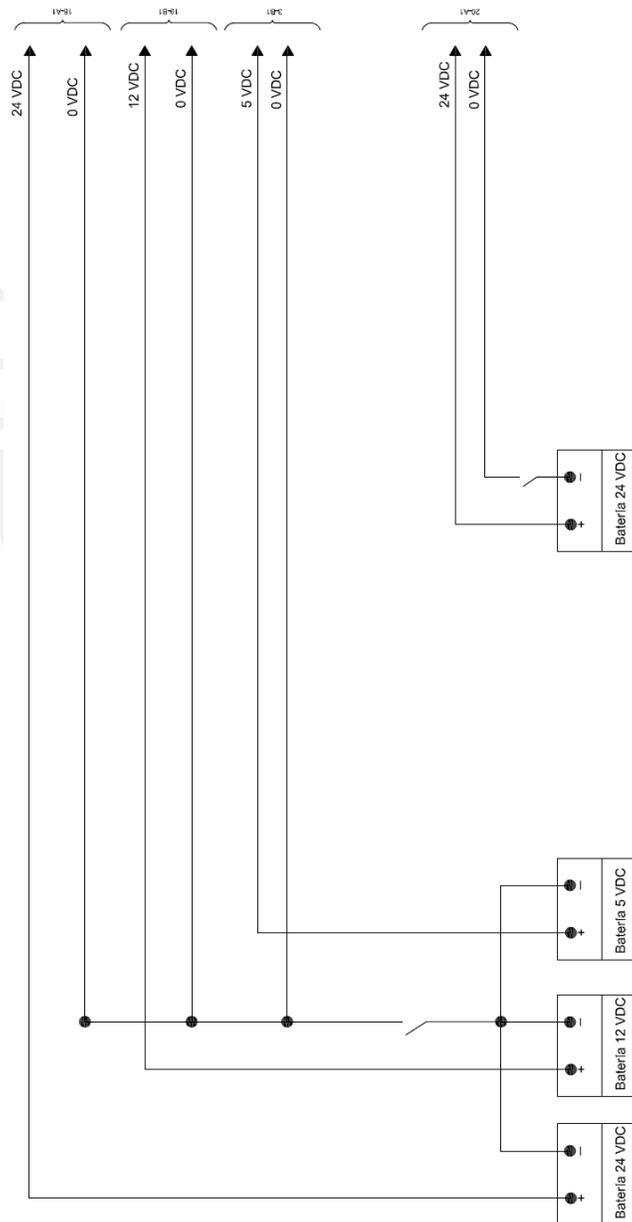


Figura 3.46 Esquemático Alimentación

De la figura 3.47 – 3.51 se muestra la distribución de los sensores de efecto Hall conectados a los módulos de entradas analógicas NI 9205 que a su vez van conectados al controlador Compact RIO 9076.

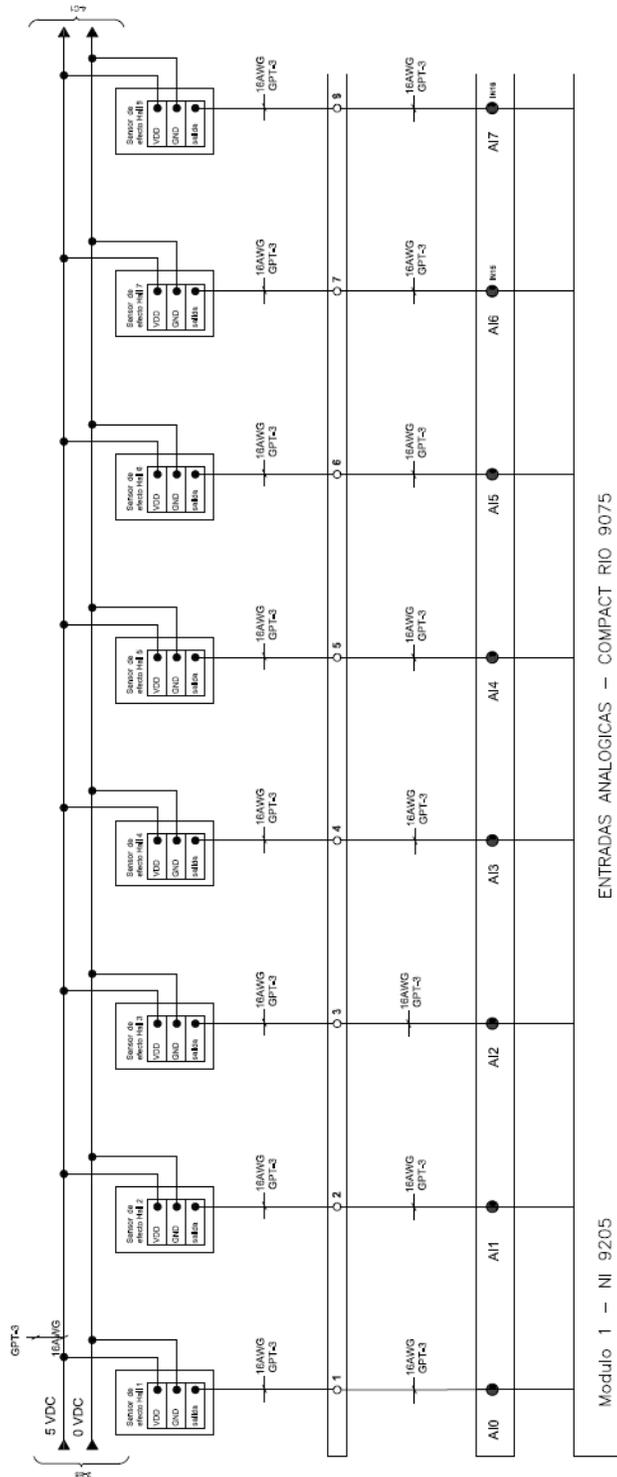


Figura 3.47 Esquemático de conexión de sensores de efecto Hall a NI 9205 (AI0 - AI7)

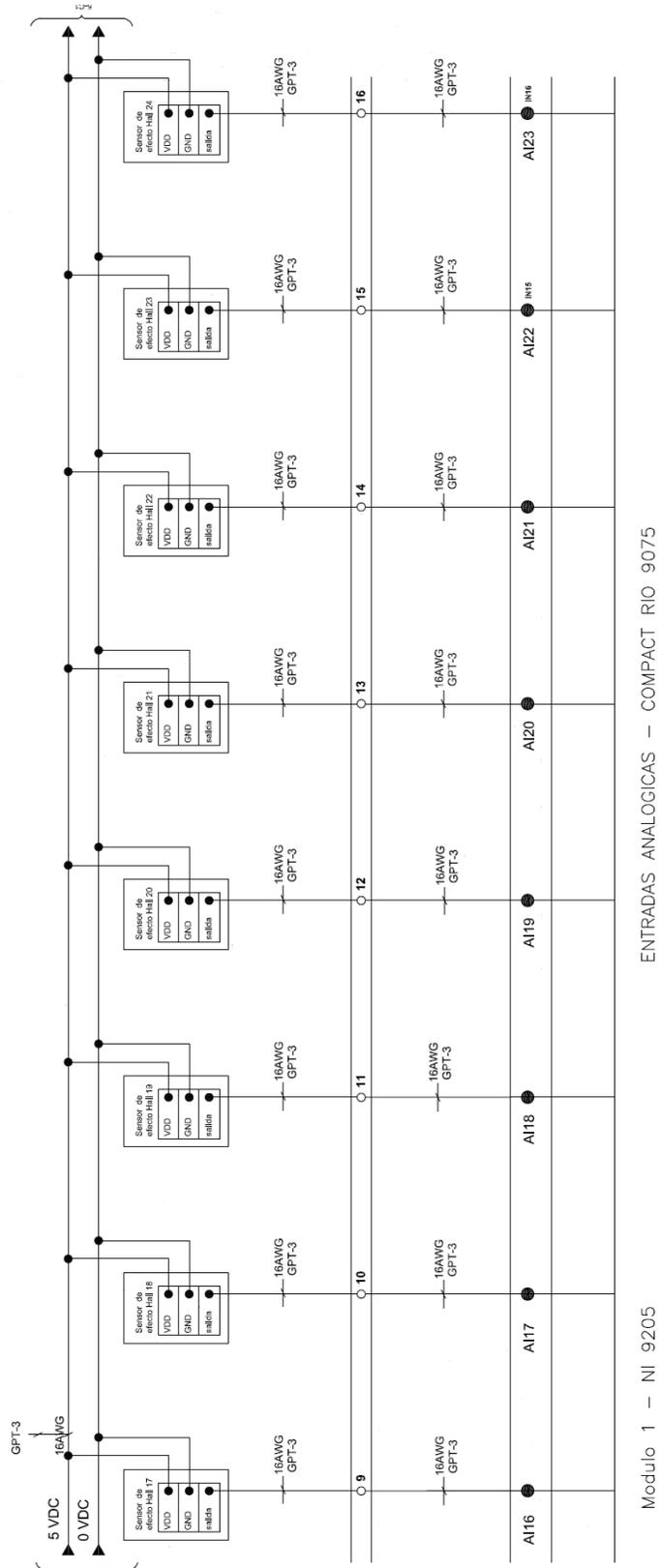


Figura 3.48 Esquemático de conexión de sensores de efecto Hall a NI 9205 (AI16 – A23)

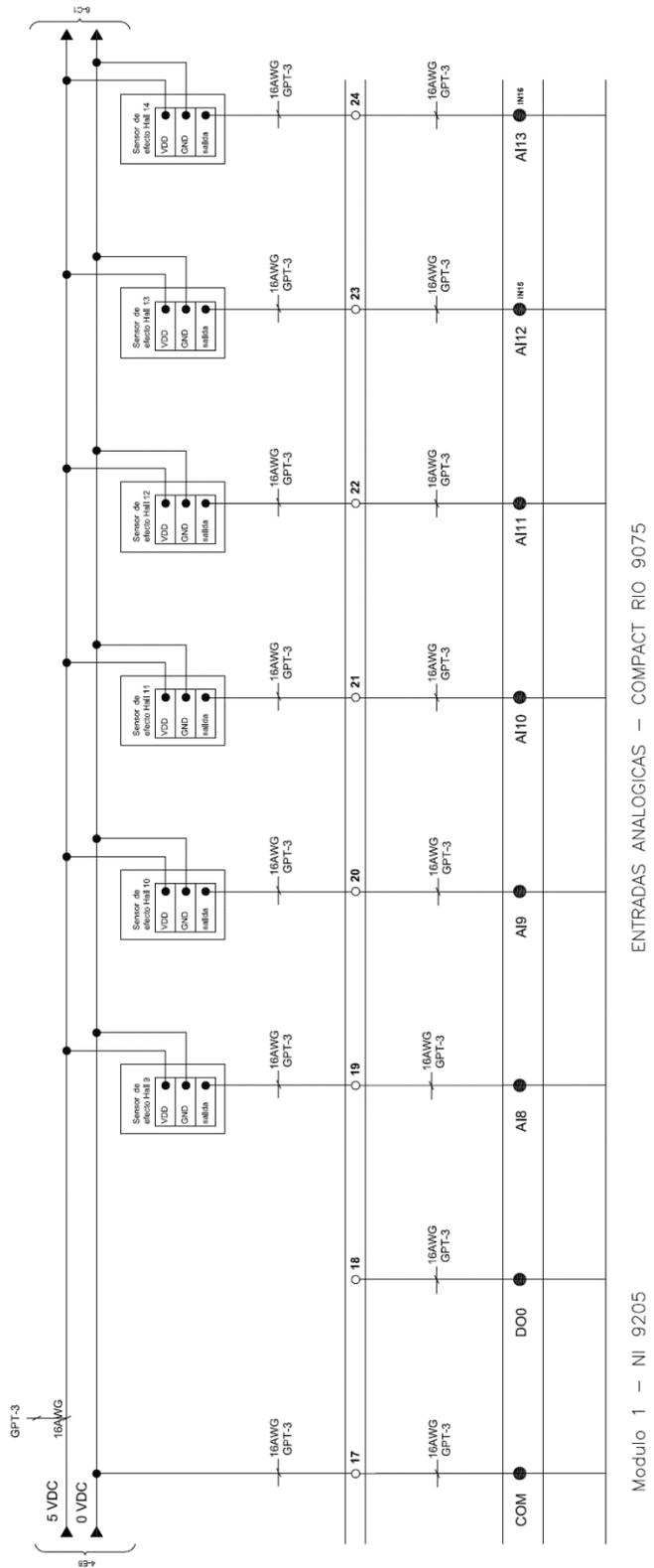


Figura 3.49 Esquemático de conexión de sensores de efecto Hall a NI 9205 (COM – AI13)

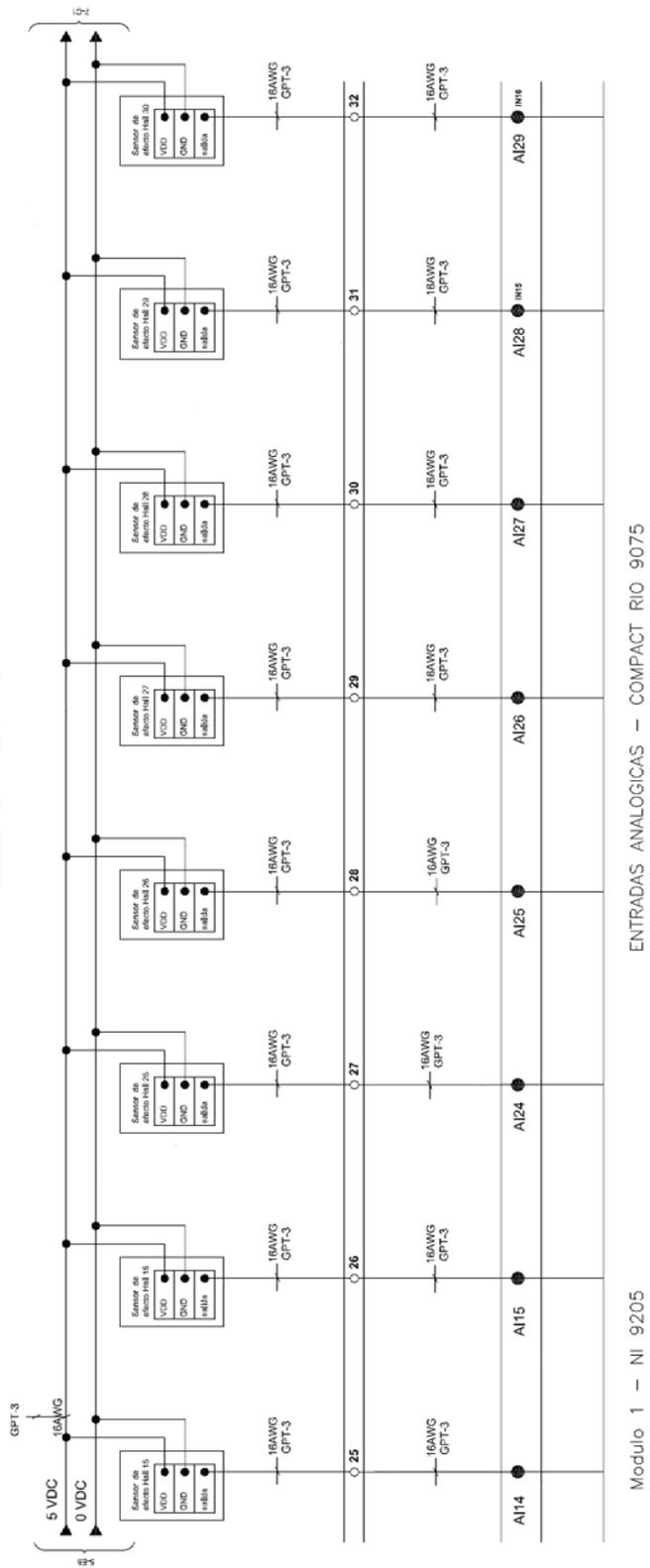


Figura 3.50 Esquemático de conexión de sensores de efecto Hall a NI 9205 (AI14 – AI29)

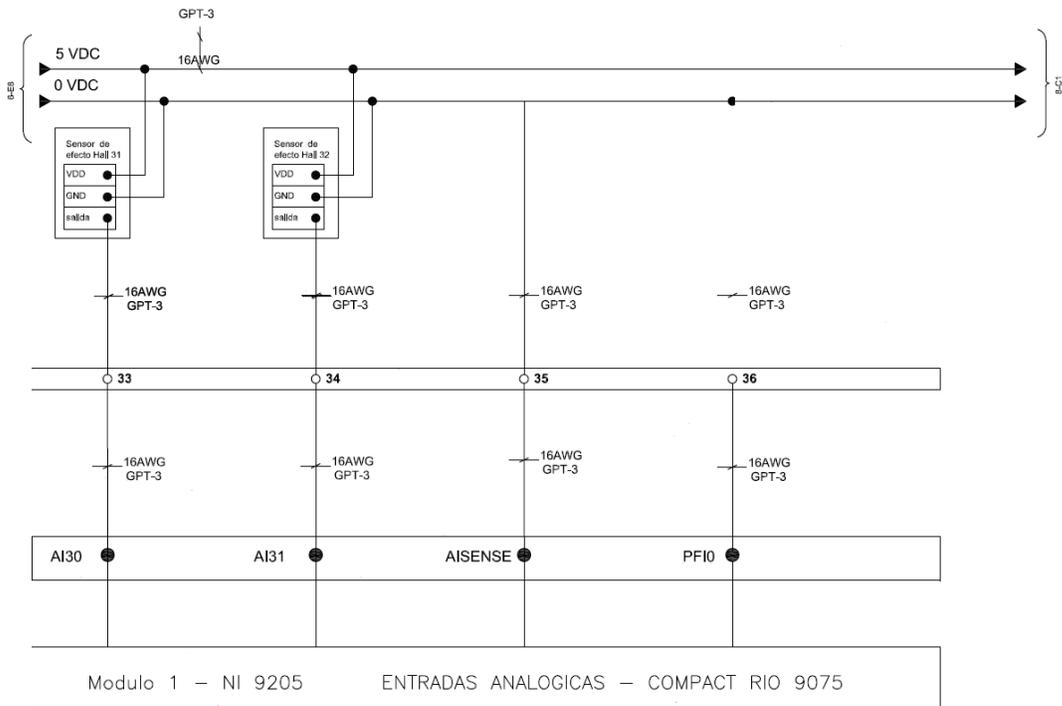


Figura 3.51 Esquemático de conexión de sensores de efecto Hall a NI 9205 (AI30 – PF10)



En la figura 3.52 se muestra la conexión de las cámaras usadas con el módulo de expansión de entradas seriales y su respectiva conexión a la línea de alimentación.

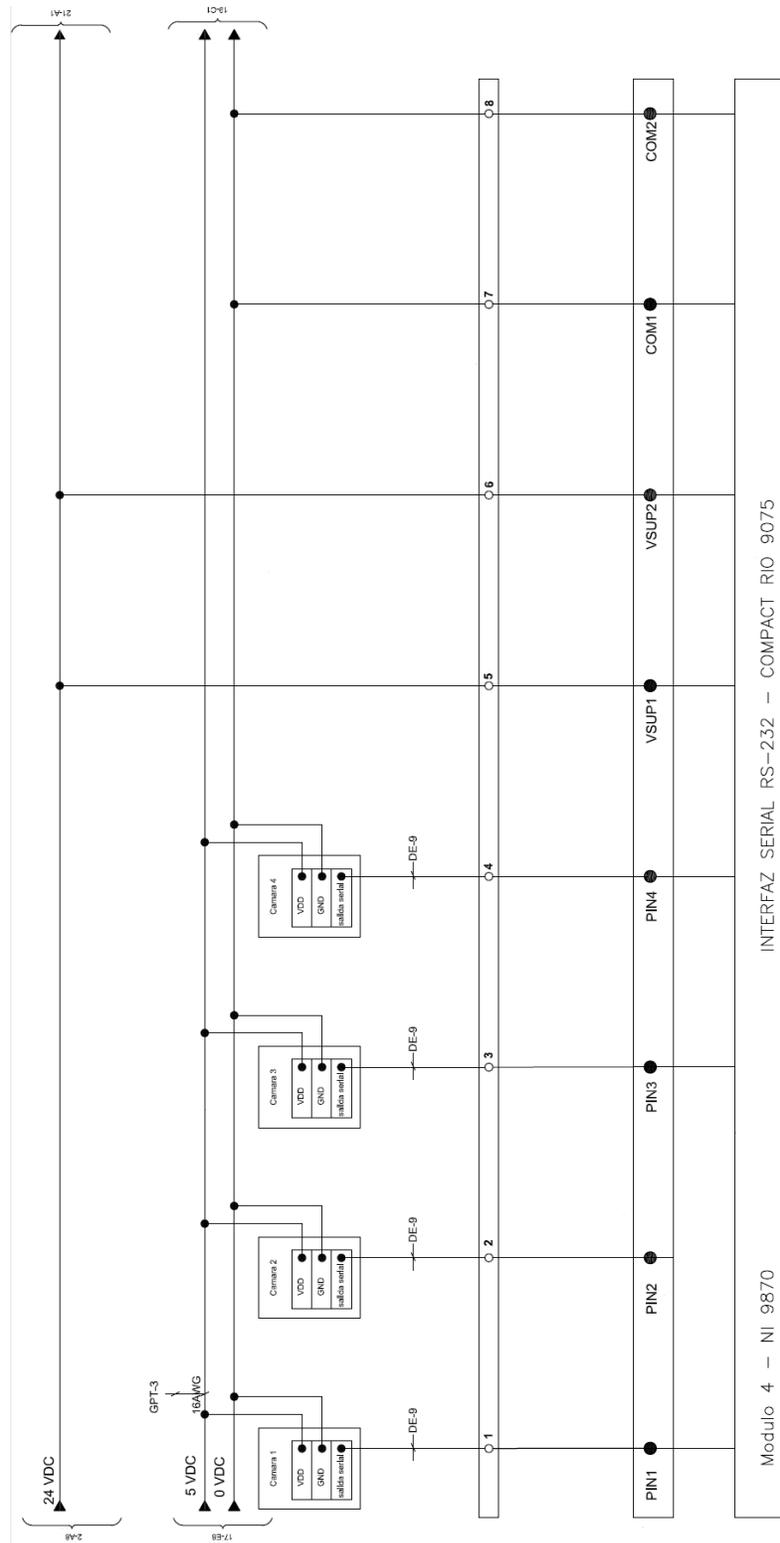


Figura 3.52 Esquemático de conexión de cámaras a NI 9870

En la figura 3.53 se muestra la conexión del acelerómetro y giroscopios de 2 ejes a los respectivos pines en la tarjeta del arduino Mega 2560.

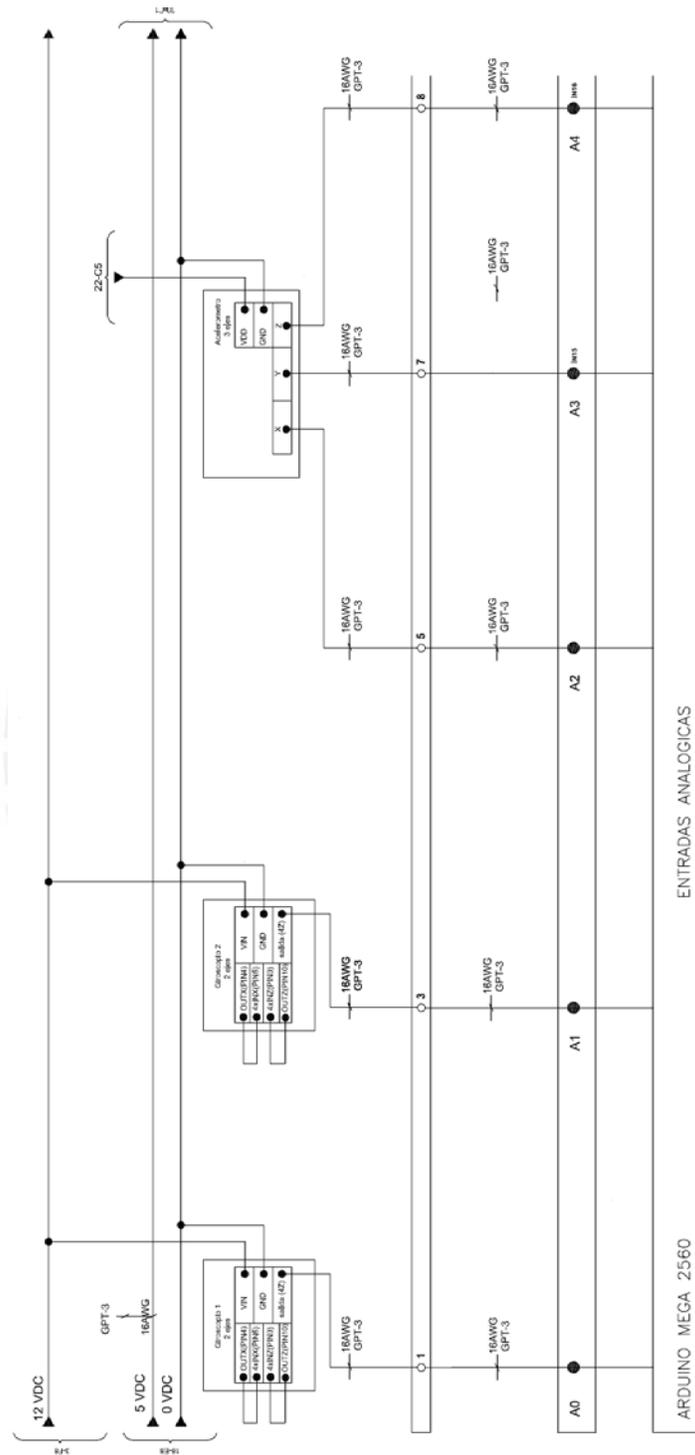


Figura 3.53 Esquemático de conexión de giroscopios y acelerómetro a Arduino Mega 2560

En la figura 3.54 se muestra la interacción entre el driver, los motores y el controlador Arduino. El Arduino se encarga de enviar la señal control para manipular a los motores y además recibe una señal de realimentación que le indica cuanta corriente fluye por cada uno de los motores.

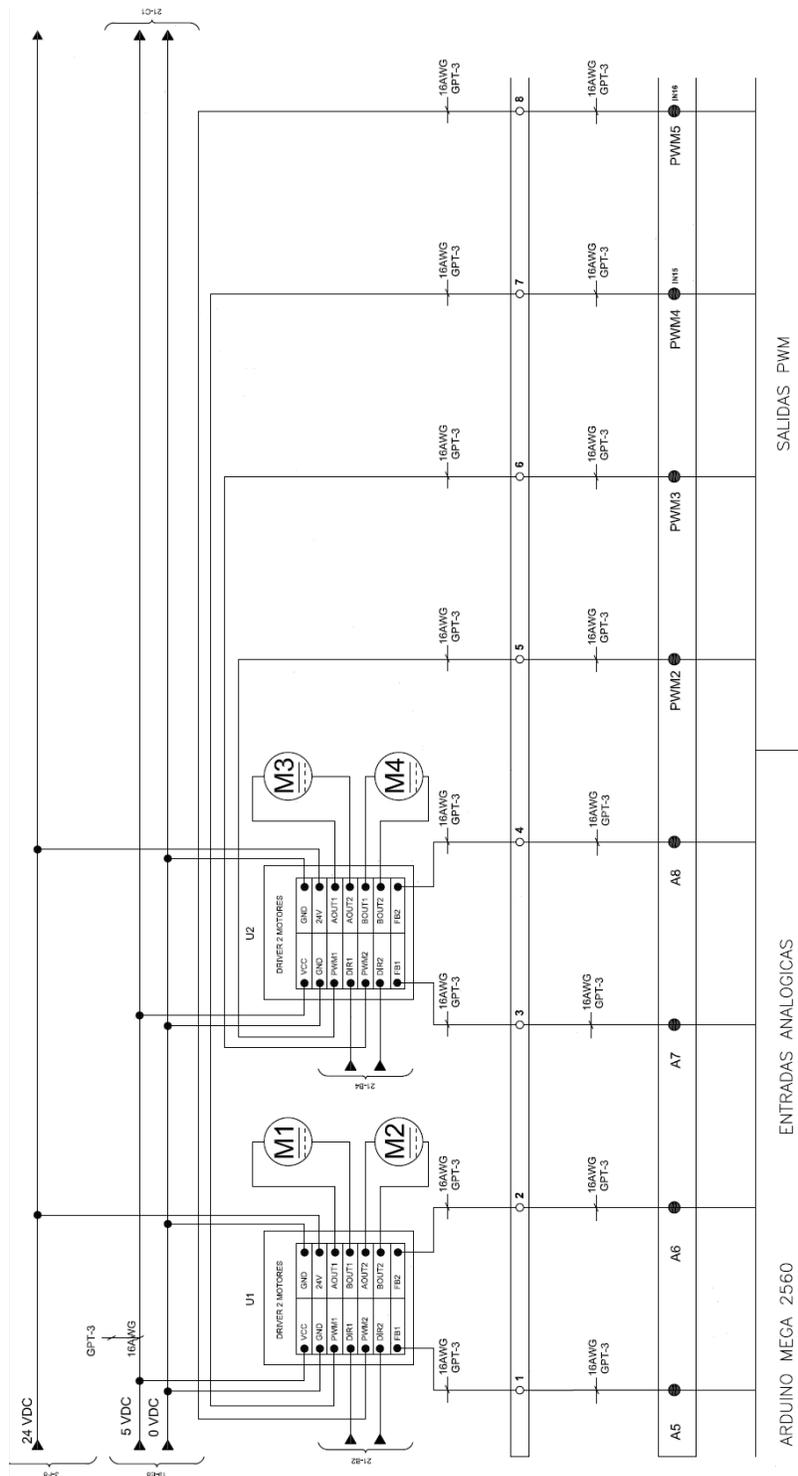


Figura 3.54 Esquemático de conexión de drivers y motores a Arduino Mega 2560

En la figura 3.55 se muestra la conexión de comunicación entre el Arduino y el Compact RIO, además se observa la salida que controla el encendido de las lamparas por medio de un relay. Por último se puede visualizar la salida para el control de la dirección del giro de los motores.

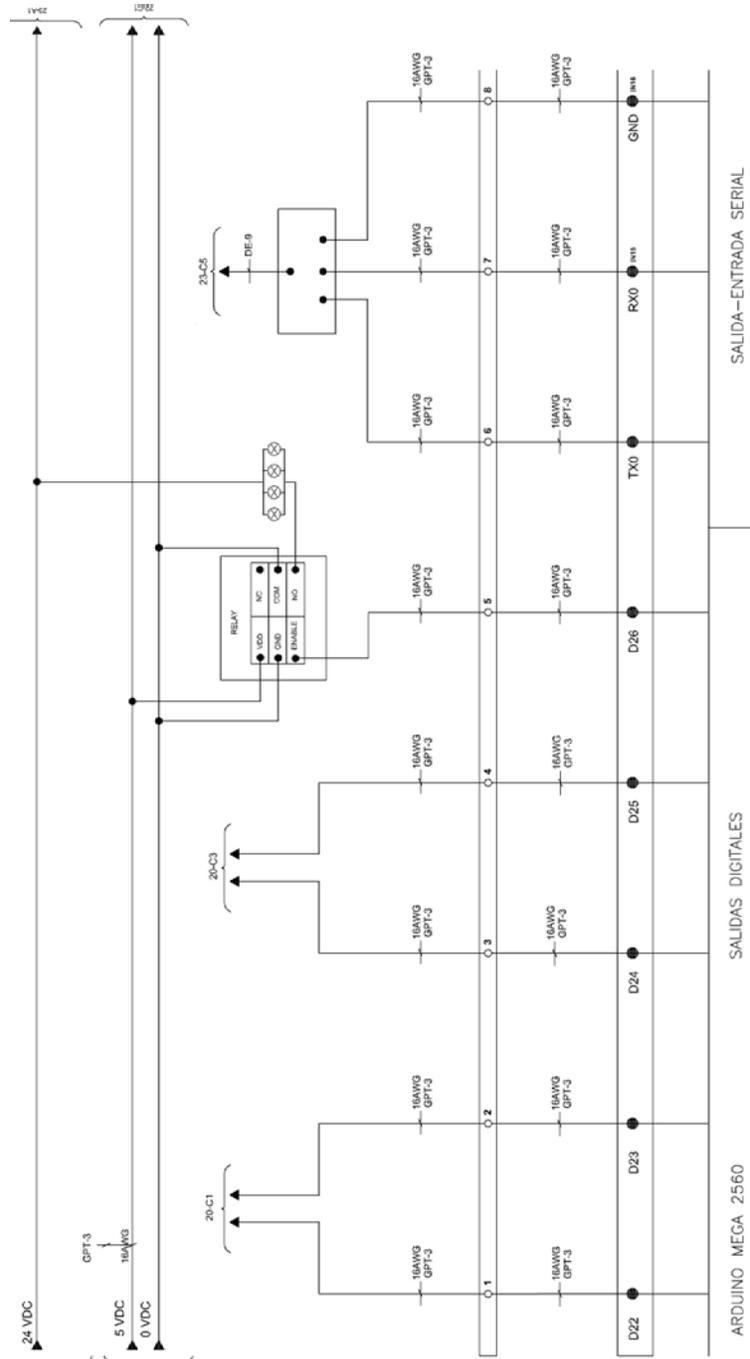


Figura 3.55 Esquemático de conexión de relay y salida serial a Arduino Mega 2560

En la figura 3.56 se muestra la conexión del giroscopio de 3 ejes y el relay que es usado para mostrar el estado del sistema (en funcionamiento o detenido) y además una salida de 3.3V que alimenta al acelerómetro.

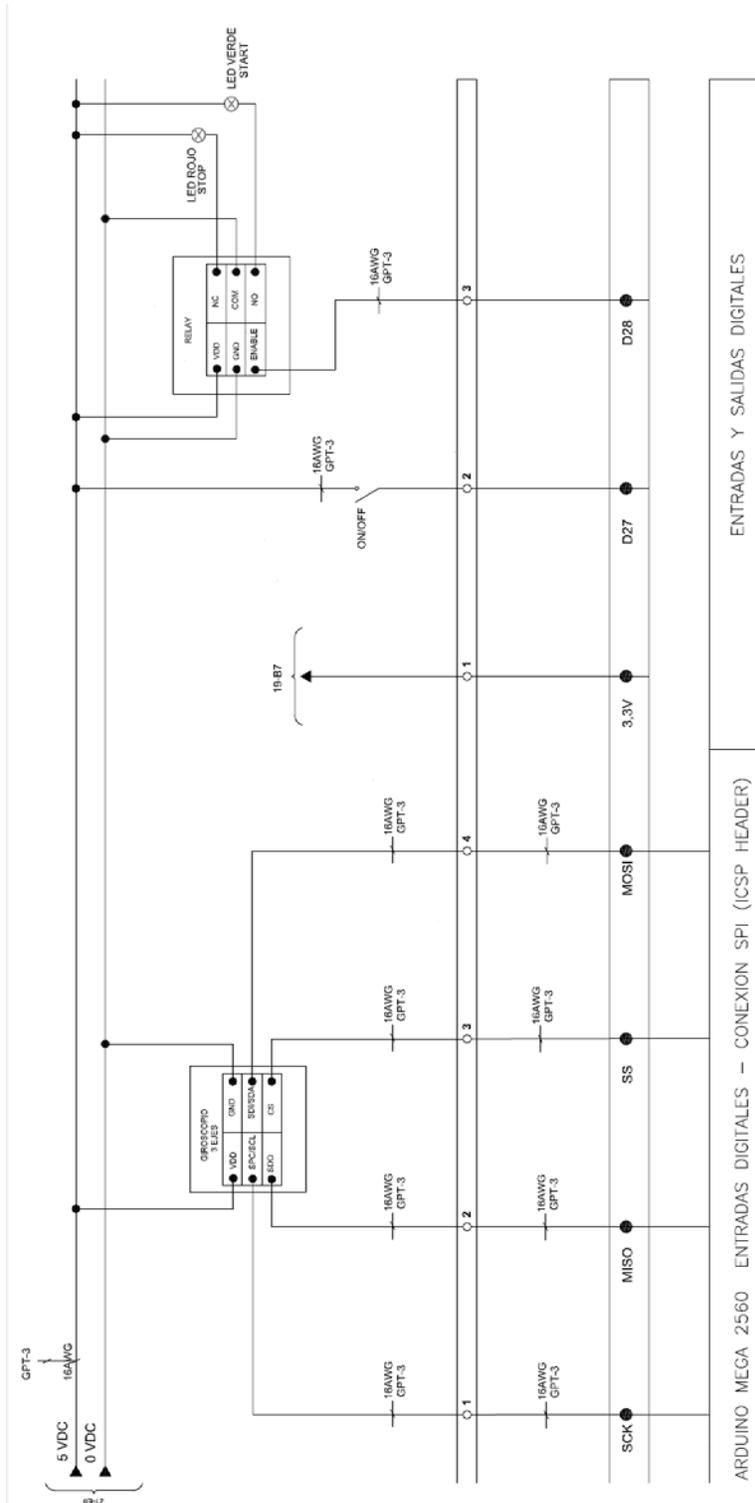


Figura 3.56 Esquemático de conexión de relay y giroscopio 3 ejes a Arduino Mega 2560

En la figura 3.57 se observa la conexión de alimentación del Compact RIO y la conexión serial para la comunicación entre el Compact RIO y el arduino

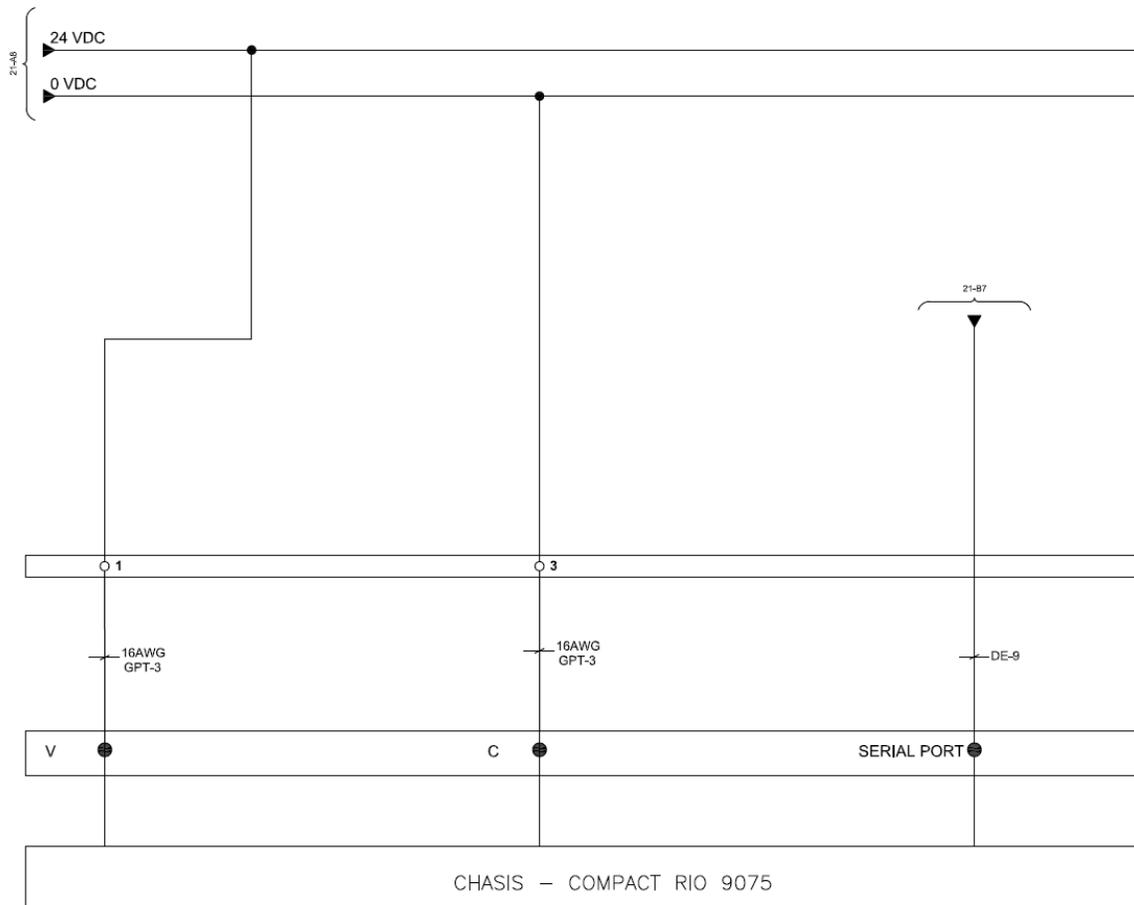


Figura 3.57 Esquemático de conexión comunicación serial y alimentación Compact RIO 9075

3.4 Diagrama de flujo del programa de control

En la figura 3.58 se muestra el funcionamiento del sistema. Inicialmente, después de que el usuario envía la señal de inicio el sistema define los datos iniciales que le permitirán tener una referencia inicial para su análisis. Después de eso se muestra la distribución de tareas para cada uno de los controladores. Los bloques sueltos en la parte inferior izquierda del controlador Arduino indican rutinas de interrupción. La primera es interrupción de timer, el cual se usa para hacer las lecturas de los acelerómetros y giroscopios. La segunda interrupción se usa para tomar una medida de acción en cuanto se detecta que se ha superado el ángulo relativo existente entre el eje del móvil y el “cuerpo”. La última interrupción se usa para la comunicación entre el Arduino y el Compact RIO, por ejemplo cuando se le informa al Arduino que hubo falla, este se encarga de encender las lámparas para la captura de imágenes.

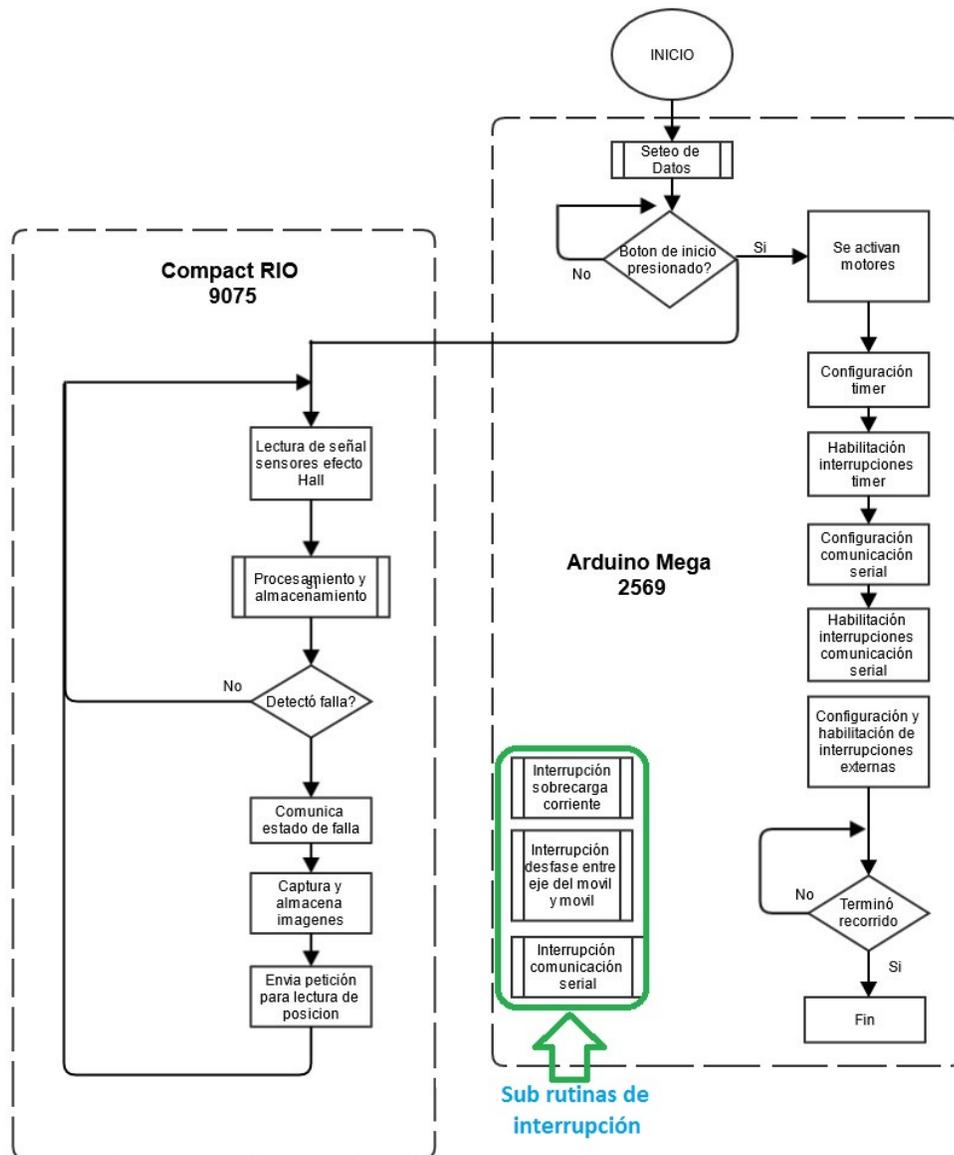


Figura 3.58 Diagrama de flujo del programa de control

En la figura 3.59 se muestra como se realimentan las señales tanto de la corriente que fluye por los motores como la de desfase entre el eje del móvil y el móvil para mantener controlado el sistema en base al algoritmo que se detalla en las figuras 3.62 y 3.63

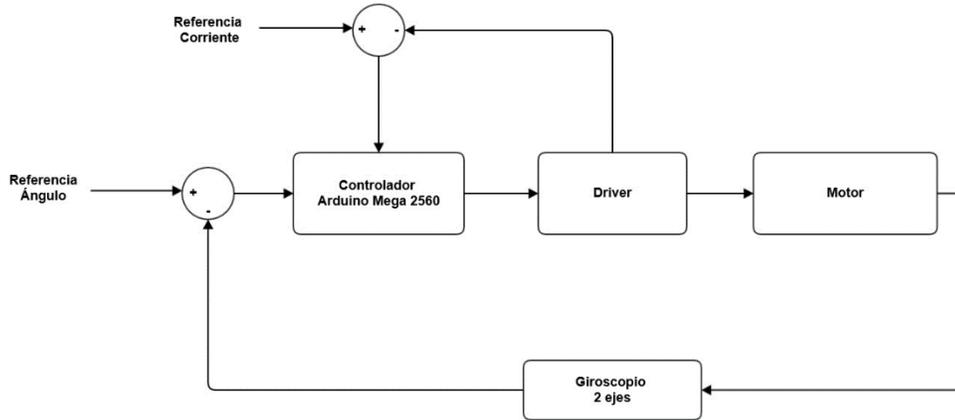


Figura 3.59 Esquema de realimentación de señales para el controlador Arduino

En la figura 3.60 se muestra las acciones que se toman en la sub-rutina de seteo de datos. Se almacena la posición inicial para tener una referencia del desplazamiento de sistema y además se almacena la lectura inicial de los giroscopios analógicos para que se use como referencia para el control del sistema.



Figura 3.60 Sub rutina de seteo de datos

En la figura 3.61 se muestra el algoritmo a emplear para el procesamiento y almacenamiento de los datos leídos de los sensores de efecto Hall. El resumen de este algoritmo que se aprovecha la frecuencia de muestreo de los módulos analógicos del controlador Compact RIO para realizar el muestreo a una frecuencia de 6kHz, pero no se almacenan todos los datos, sino que se forman grupos de 20 datos y promedian para dar resultado a un único dato, el cual si es almacenado. Este proceso permite que la señal se almacene suavizada al ser resultado de varios promedios. Los cálculos de frecuencia de muestreo y grupos de datos muestrados de detalla en el anexo A.

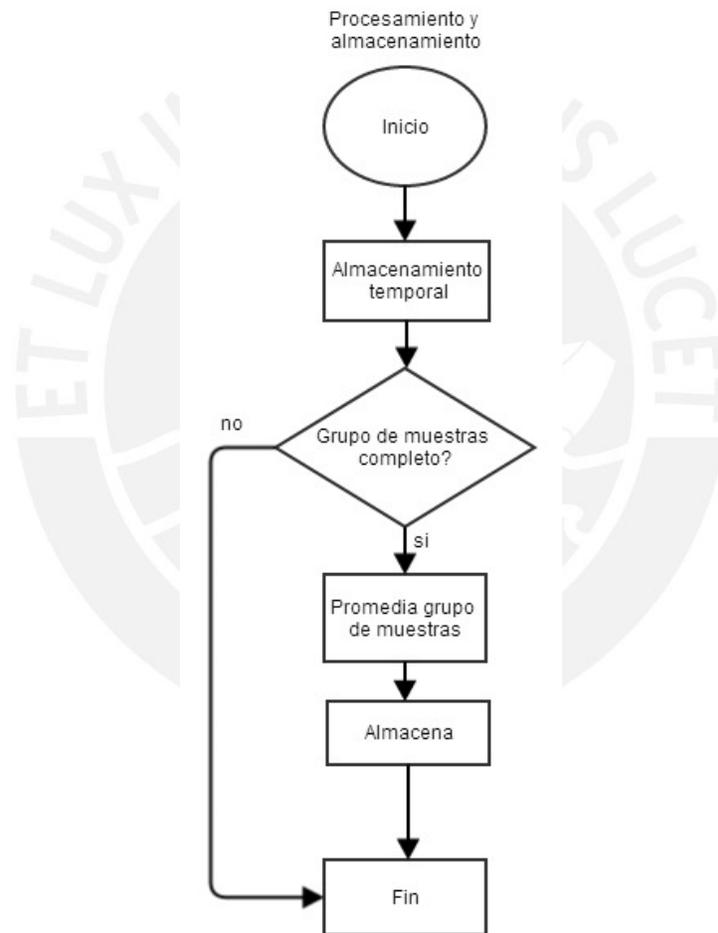


Figura 3.61 Sub-rutina para el procesamiento y almacenamiento de los datos de los sensores de efecto Hall

En la figura 3.62 se muestra el algoritmo simplificado que se usa en caso de que se detecte una sobrecarga de corriente en alguno de los 4 motores. Esta sobrecarga de corriente el Arduino la detecta como una señal de voltaje. El driver envía una señal corriente que mediante una resistencia se transforma en voltaje para que analice el Arduino. El cálculo de esta resistencia se detalla en el anexo A. En resumen si el controlador detecta que hay en exceso de corriente (mayor a 3A) asume que puede ser o porque hay un obstáculo delante o porque el eje del móvil se encuentra desfasado. En el primer caso se retrocede y se intenta pasar el obstáculo nuevamente, en caso de originarse otra sobrecarga de corriente por seguridad del sistema el móvil vuelve camino atrás.

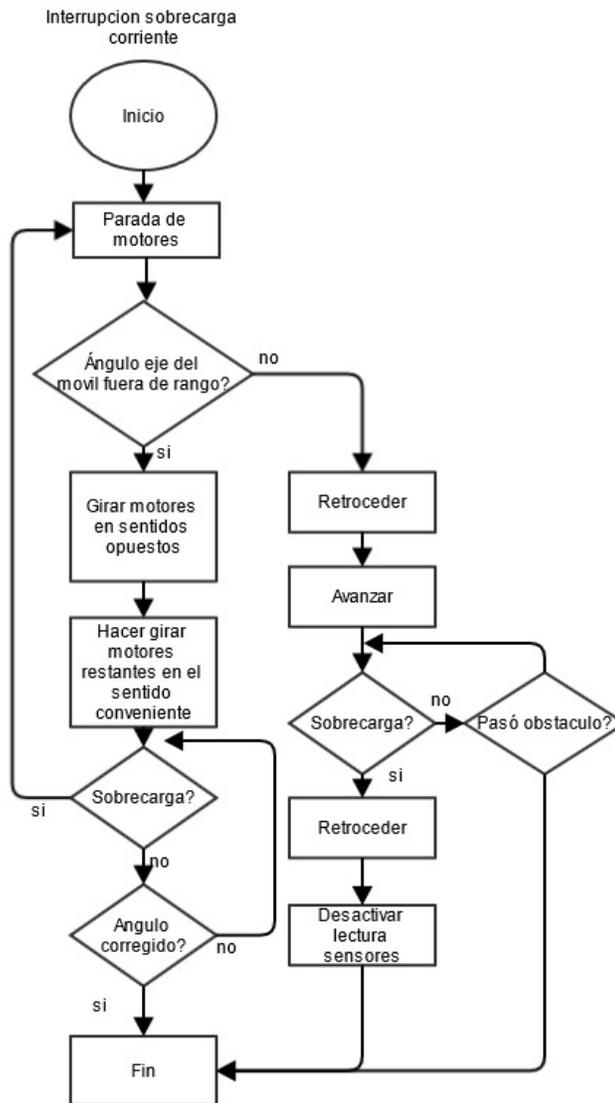


Figura 3.62 Esquema de interrupción para la sobrecarga de corriente

En la figura 3.63 se muestra el algoritmo en respuesta a un desfase entre el eje del móvil y el “cuerpo” del móvil. Cuando se detecta este fallo se intenta hacer que el eje vuelva a su estado predeterminado haciendo que uno de los motores que van unidos al eje en cuestión haga girar su eje en sentido opuesto para corregir el error. La decisión por la cual uno u otro motor cambiará su giro se basa en hacia que lado es el desfase. Los motores restantes también ayudan a corregir el error avanzando o retrocediendo según sea el caso basado en el mismo parámetro.

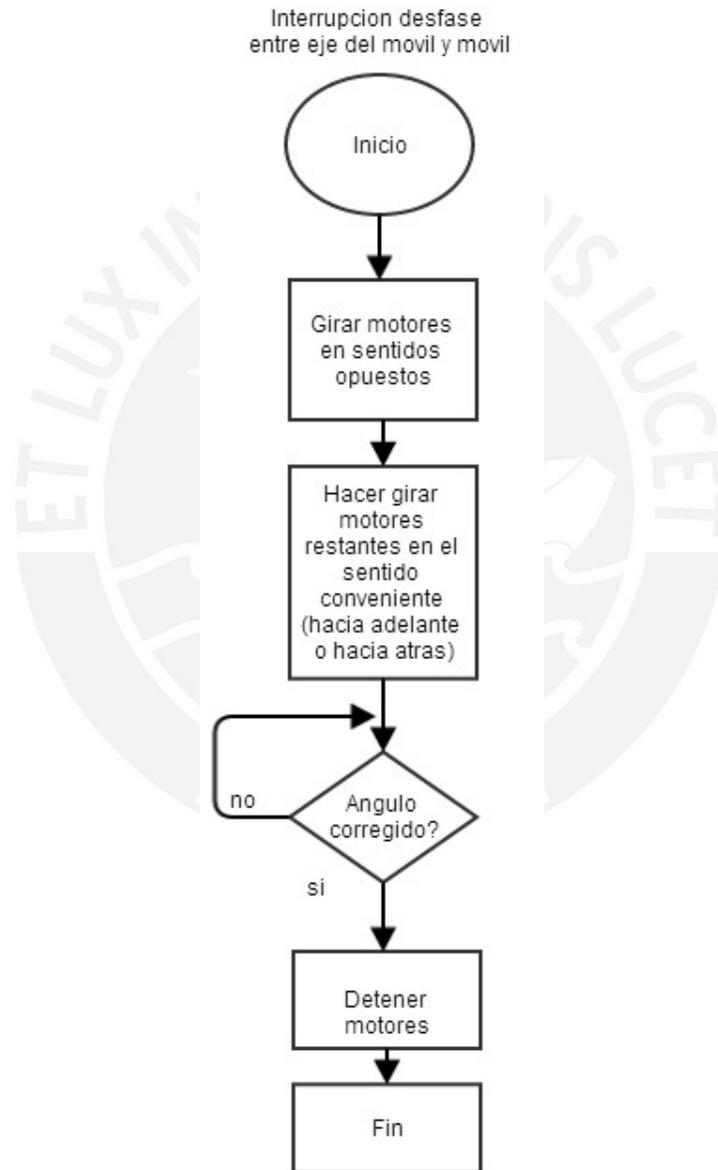


Figura 3.63 Esquema de interrupción del desfase entre el eje del móvil y el móvil

En la figura 3.64 se muestra el algoritmo de comunicación entre el Compact RIO y el Arduino mediante interrupciones de comunicación serial. Cuando el Arduino recibe una petición, lee la petición y determina si la petición es para encender las lámparas de iluminación para captura de imágenes o para enviar la posición actual del móvil con respecto a la posición inicial almacenada al empezar el proceso.

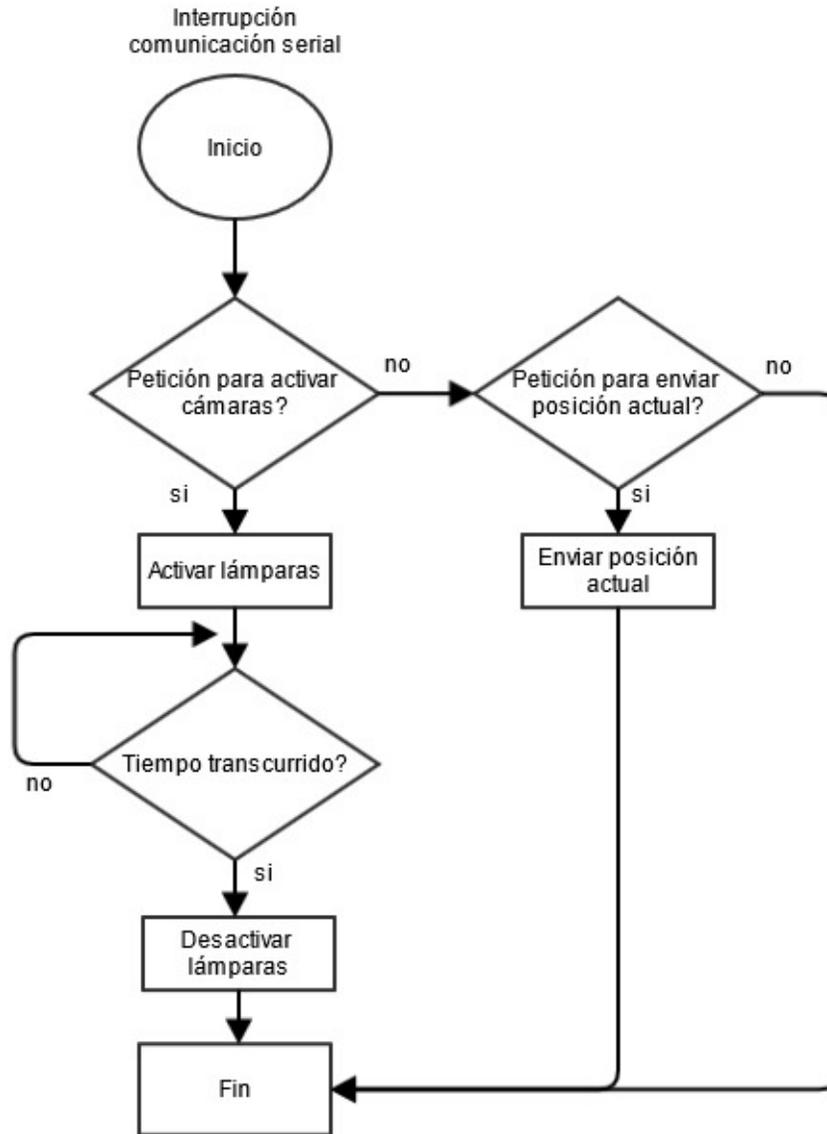


Figura 3.64 Esquema de interrupción de comunicación serial

Capítulo 4

Simulaciones y resultados

4.1 Marco teórico

Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de 4 ecuaciones de gran complejidad que describen los fenómenos electromagnéticos. Estas ecuaciones describen como se propagan los campos magnéticos y eléctricos, interactúan y como se ven influenciados por los objetos. A continuación se muestran las 4 ecuaciones de maxwell.

Ley de Gauss: Determina cual es el comportamiento del campo eléctrico alrededor de cargas eléctricas.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (1)$$

Donde \vec{D} es el vector es de densidad de flujo eléctrico y ρ_v es la densidad de carga eléctrica.

Ley de Gauss para campos magnéticos: Esta ley establece que la divergencia de densidad de flujo magnético es cero.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

Donde \vec{B} es el vector de densidad de flujo magnético

*Esta segunda ley es la que establece que NO existen los monopolos magnéticos.

Ley de Faraday: Estable que cuando existe un campo magnético variable en el tiempo, este da lugar a una circulación de campo eléctrico a su alrededor. Además establece la co-existencia entre el campo magnético y el campo eléctrico.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \quad (3)$$

Donde \vec{E} es el vector de campo eléctrico y \vec{B} es el vector de densidad de campo magnético.

Ley de Ampere: Establece que una corriente eléctrica fluyendo (\vec{j}) da lugar a un campo magnético que rodea a la corriente.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4)$$

Calculo de campo magnético

Para el análisis de campo magnético para el sistema se tienen que verificar las ecuaciones de Maxwell que gobiernan el comportamiento de los campos magnéticos.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu_o(\vec{H})^* \quad (7)$$

Donde $\vec{\mu}_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ es la permeabilidad del vacío.

* Se usa para modelos idealizados

Debido a que en la realidad la dependencia entre \vec{H} y \vec{B} no es lineal sería en exceso tedioso hacer los cálculos de campo magnético de manera analítica, es por eso que en el presente trabajo se determinan las variaciones de campo magnético haciendo uso del análisis de elementos finitos. Para ello se emplea el software Ansoft Maxwell 14, que es un software de simulación de campos electromagnéticos. Para hacer este tipo de análisis se eligió dicho software ya que está dedicado exclusivamente a simulaciones de tipo electromagnética. Existen otros softwares que también permiten hacer análisis electromagnéticos, pero al no ser exclusivos para este tipo de simulaciones es un poco más complicado y no tan intuitivo hacer este tipo de simulaciones. Este software además de verificar las ecuaciones de Maxwell aplica la siguiente relación para el análisis iterativo.

$$\vec{B} = \mu_o(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_o \cdot \mu_r \cdot \vec{H} + \mu_o \cdot \vec{M}_p$$

Donde: $\vec{H}(x, y, z)$ Es la intensidad de campo magnético.

$\vec{B}(x, y, z)$ Es la densidad de flujo magnético.

$\vec{M}_p(x, y, z)$ Es la magnetización permanente.

μ_r Es la permeabilidad relativa.

El software Ansoft Maxwell requiere que las curvas BH para las direcciones principales en el material respectivo sean proporcionadas, en caso de que no se encuentren en las librerías propias del software. A partir de estas curvas, la dependencia energética de H se extrae para cada una de las respectivas direcciones principales y se utiliza en el proceso de obtener el tensor de permeabilidad no lineal utilizado en el proceso de solución iterativa Newton-Raphson

Proceso de solución iterativa Newton-Raphson:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + [\tilde{\mu}] \cdot (\vec{H} - \vec{H}_0)$$

$$[\tilde{\mu}] = \frac{\delta \vec{B}}{\delta \vec{H}} = [\Delta \tilde{\mu}] + [\mu]$$

Donde \vec{B}_0 y \vec{H}_0 son las soluciones de campo previas, $[\tilde{\mu}]$ es un tensor general, y $[\mu]$ está dado por:

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_x & & \\ & \mu_y & \\ & & \mu_z \end{bmatrix}$$

Donde μ_x , μ_y y μ_z tienen en cuenta los efectos anisotrópicos de cualquier laminación presentado en el modelo.

4.2 Resultados de simulaciones.

En la figura 4.1 se muestra la configuración de los elementos que se toman en cuenta para el análisis magnético.

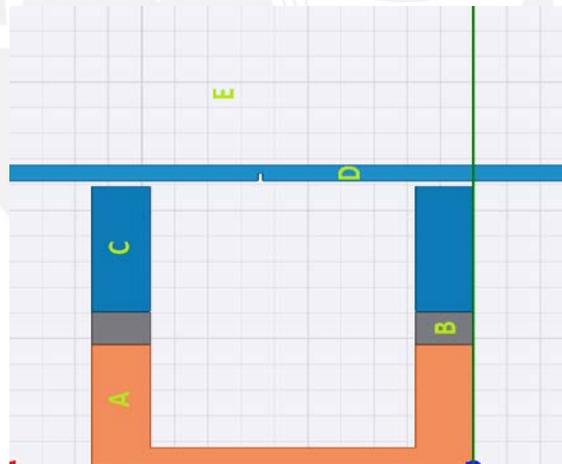


Figura 4.1 Disposición de elementos para análisis (A: Núcleo magnético B: Imán permanente C: Cepillos de Acero)

Fisuras externas

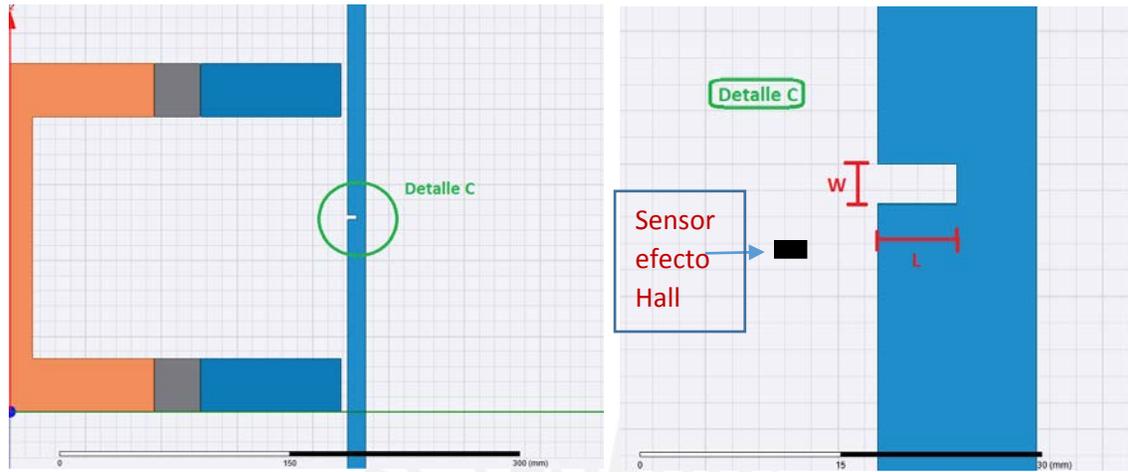


Figura 4.2 Esquema de la falla a analizar

Características falla:

Falla: fisura radial

W: 3mm

L: 6mm

Distancia del sensor a la tubería: 5 mm

Resultados de distribución de densidad de campo magnético

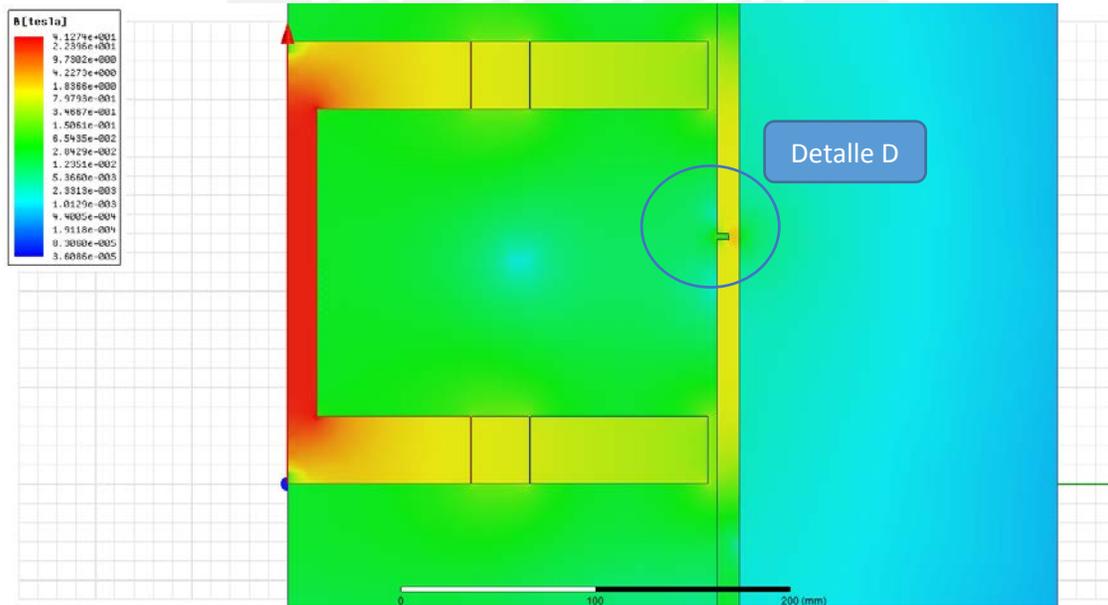


Figura 4.3 distribución de densidad de campo magnético

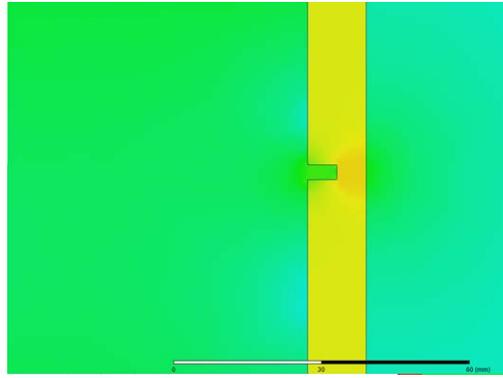


Figura 4.4 Detalle distribución de densidad de campo magnético (Detalle D)

En la gráfica 4.5 se muestra como se dispersan las líneas de flujo magnético en las inmediaciones de la falla.

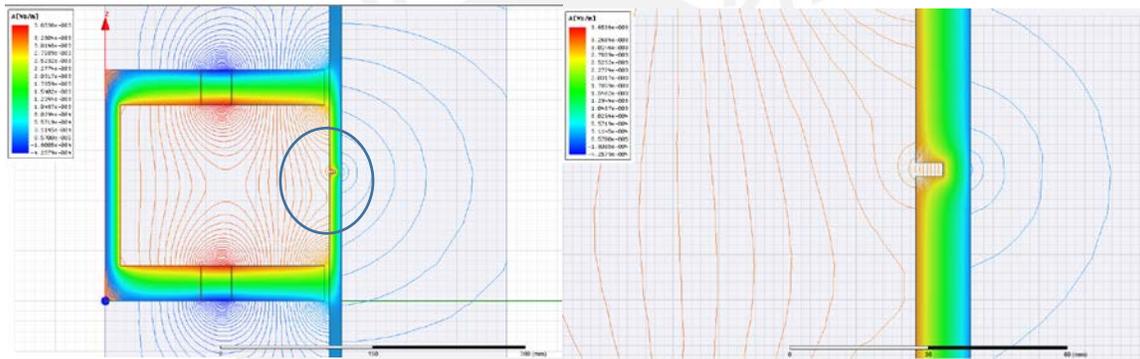


Fig 4.5 Gráfica de dispersión de flujo magnético

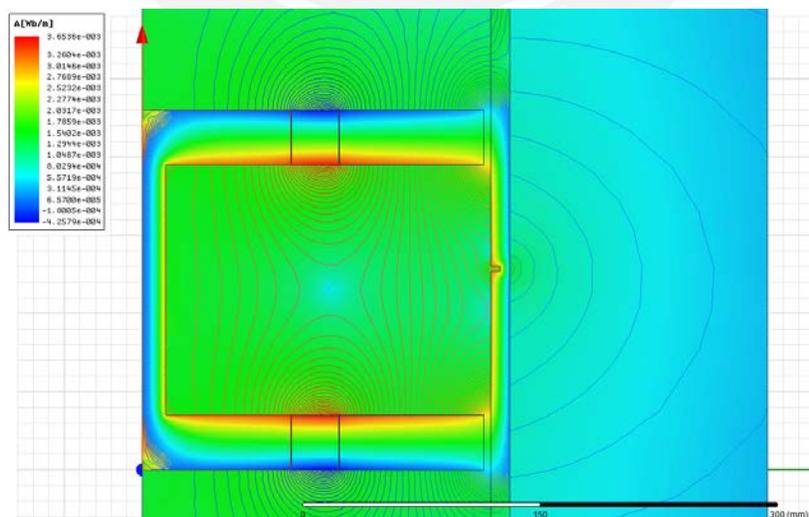


Figura 4.6 Gráfica donde se muestran tanto densidad de flujo magnético como dispersión de flujo magnético

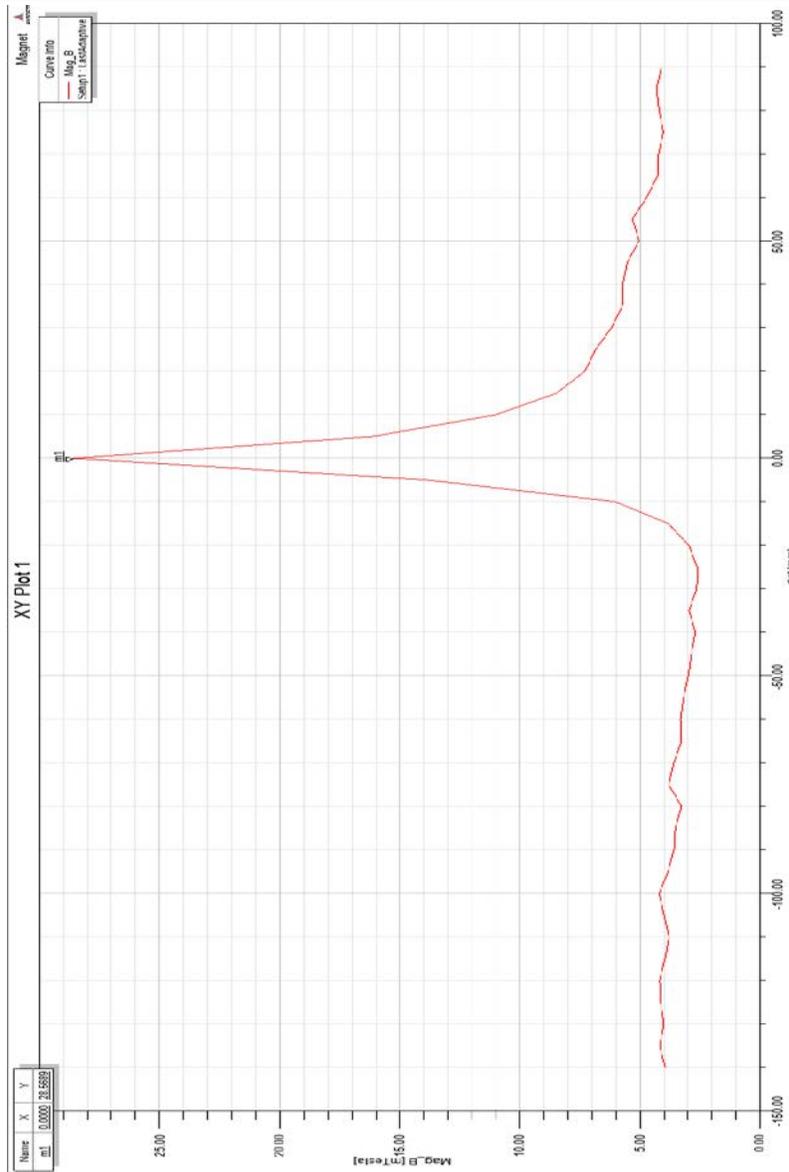


Figura 4.5 Gráfica de densidad de campo magnético versus la distancia que recorre el móvil

Resultados de simulación:

Valor promedio de lectura en los sensores cuando no hay falla: 50 Gauss

Valor máximo alcanzado al momento de la falla: 258 Gauss

Comparación de la variación de densidad de flujo magnético cuando se hace variar la profundidad de la falla (L)

Parámetros:

Falla: fisura radial

W= 3mm

L = 2 – 10 mm

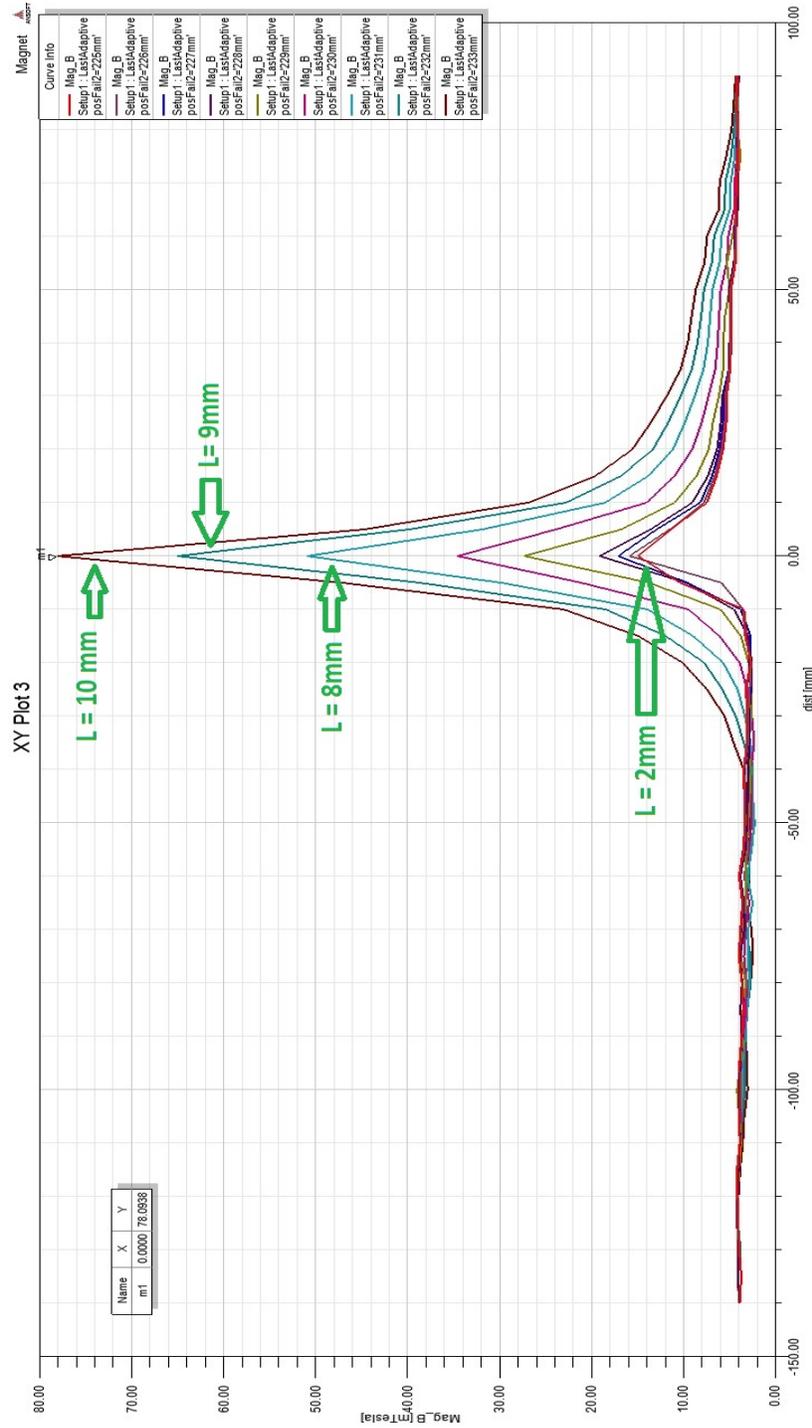


Figura 4.6 Resultados de análisis para diferentes profundidades

De la figura 4.6 se obtiene que la mayor variación de densidad de campo magnético se da cuando existe una falla con una profundidad de 10 mm y el valor de densidad de campo magnético máximo para dicha falla es 780 Gauss cuando el nivel promedio sin falla es 50 Gauss aproximadamente.

En la figura 4.7 se observa el comportamiento de la variación de densidad de campo magnético (B) a medida que se aumenta la profundidad de la falla (L). La relación que existe entre B y L tiene una tendencia lineal. Lo cual permite tener una idea de la magnitud de la falla.

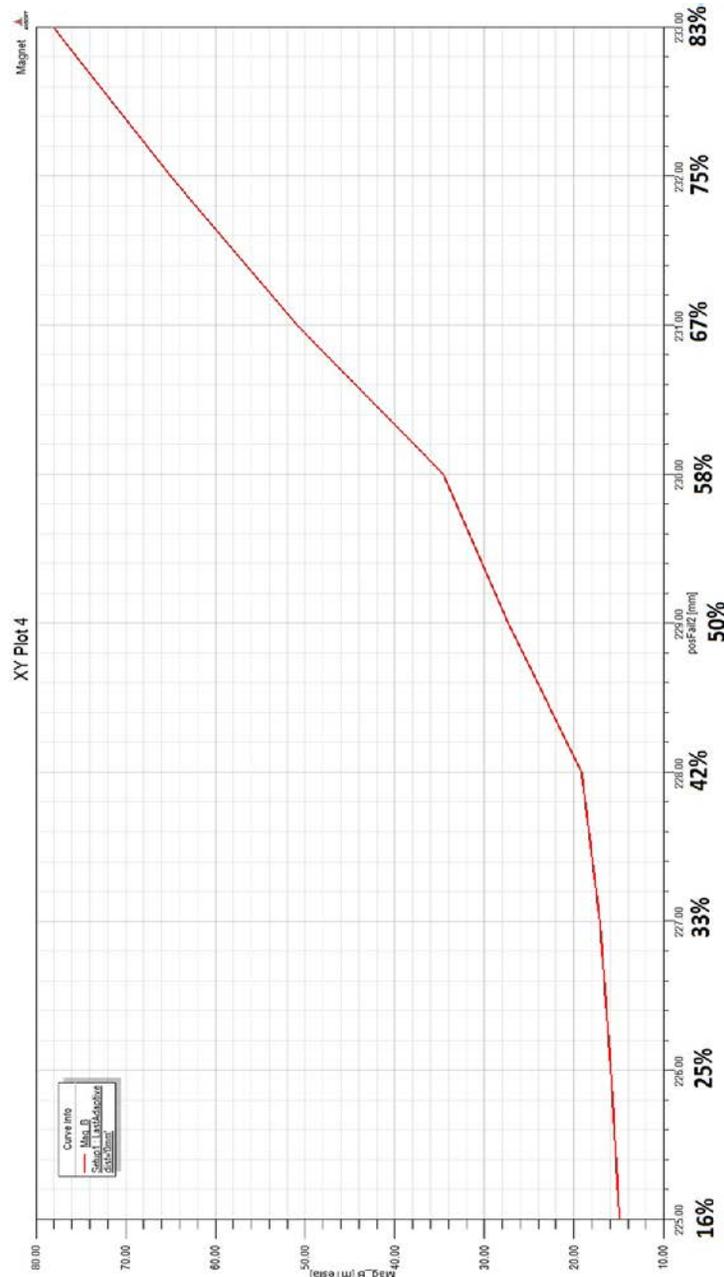


Figura 4.7 Relación entre en porcentaje de profundidad del defecto Vs densidad de campo magnético (B)

Fisura interna

Parámetros: $W = 4 \text{ mm}$ $L = 3 \text{ mm}$ $H = 4 \text{ mm}$ $M = 5 \text{ mm}$

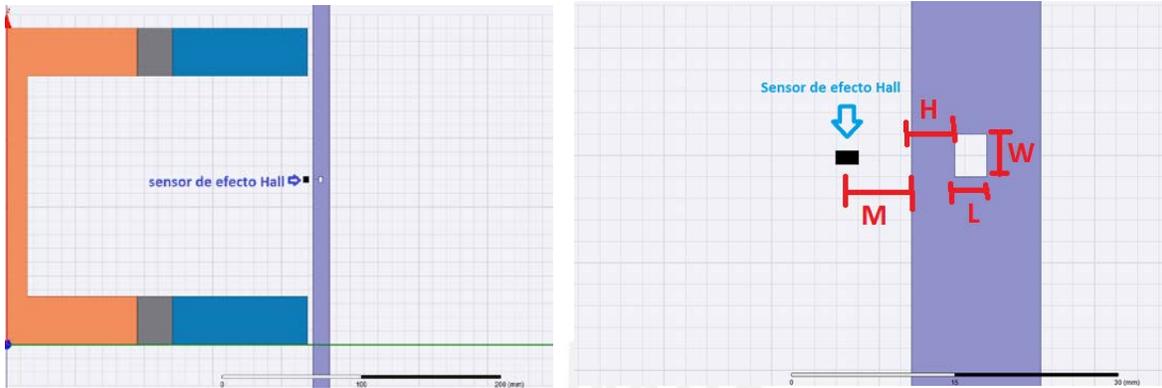


Figura 4.8 Esquema de falla interna

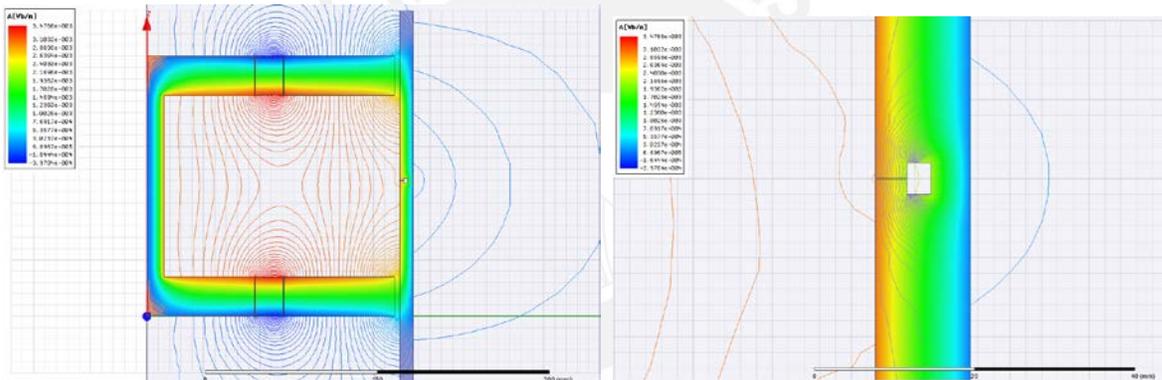


Figura 4.9 Gráfica de dispersión de flujo magnético en falla interna

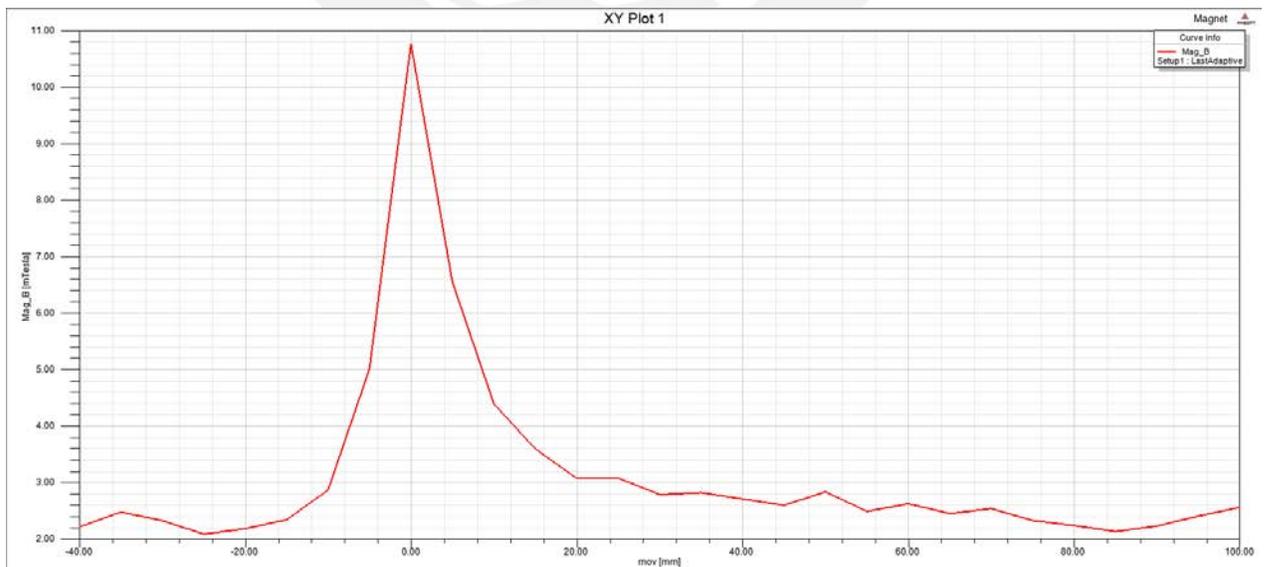


Figura 4.10 Gráfica de densidad de flujo magnético vs desplazamiento del móvil

En la gráfica 4.10 se observa un perfil parecido al que se obtuvo al hacer el análisis de la fisura externa (Figura 4.5) con la diferencia que en este análisis la variación de densidad de flujo magnético no es muy elevada en comparación con la densidad de flujo magnético que existe cuando no hay falla.

Cuando hay falla (máximo) ≈ 108 Gauss

Cuando no hay falla (referencia) ≈ 30 Gauss

Para mejorar estos resultados se hace uso de pequeñas piezas de ferrita (1.45x4.35 mm²) que aumentan el valor de la lectura de los sensores.

Sensors	B [G]
	(64%)
	(139%)
	(52%)
	(200%)
	(66%)
	(122%)

Figura 4.11 Análisis de disposición de sensor para obtener mejores resultados (B [G] es el porcentaje de la lectura con las piezas de ferrita con respecto a cuándo no se emplea ferrita) [1]

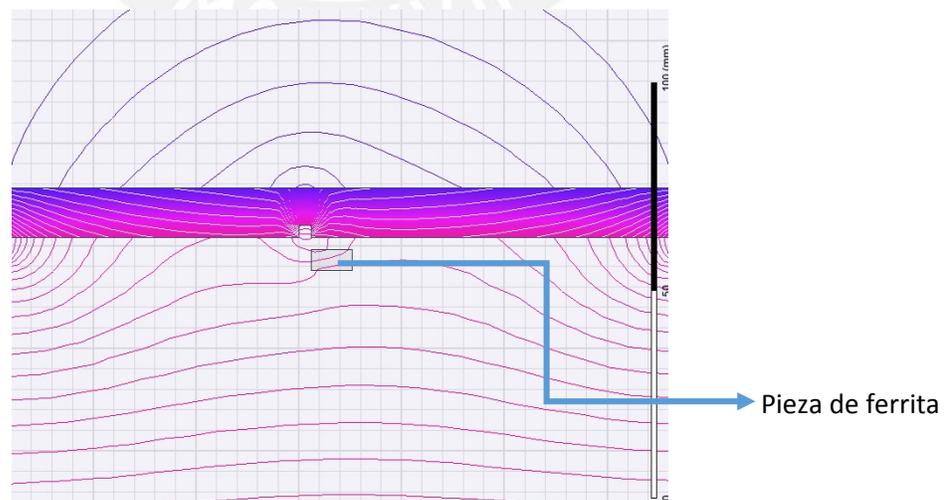


Figura 4.12 Efecto de las piezas de ferrita sobre las líneas de flujo

Resultados del análisis de fisuras internas con el uso de piezas de ferrita

Densidad de campo magnético máximo cuando hay falla ≈ 235 Gauss

Densidad de campo magnético cuando no hay falla ≈ 30 Gauss

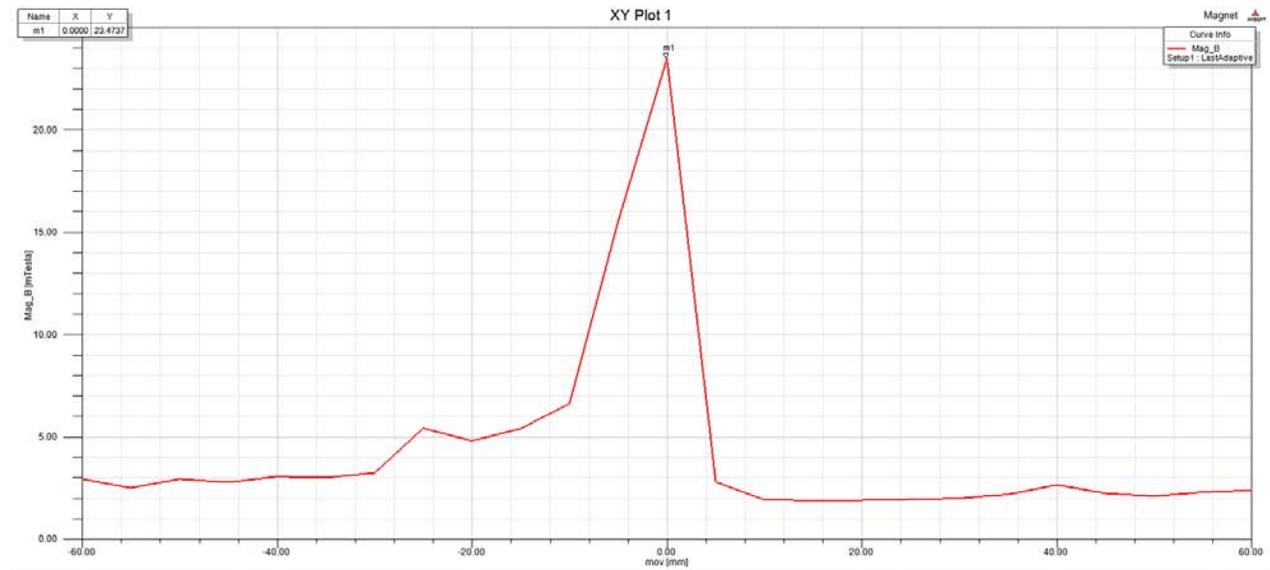


Figura 4.13 Resultado simulación falla interna con piezas de ferrita

Corrosión

Parámetros: profundidad de corrosión = 4mm Longitud de corrosión= 60 mm
Distancia de sensor = 5mm

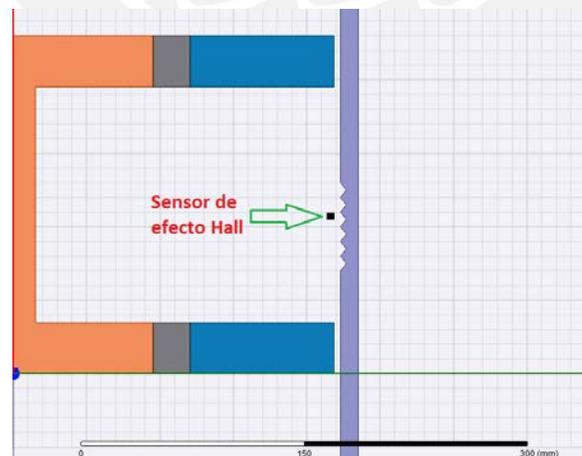


Figura 4.14 Esquema de falla por corrosión

Al igual que el caso anterior la variación de densidad de flujo magnético es bastante débil comparada con el valor de densidad de flujo magnético cuando no hay falla. También se puede observar que la señal es bastante inestable, lo cual sería un problema al momento de inspeccionar la tubería y que el sistema se encuentre ante este tipo de fallas.

Densidad de campo magnético máximo cuando hay falla ≈ 47 Gauss

Densidad de campo magnético cuando no hay falla ≈ 25 Gauss

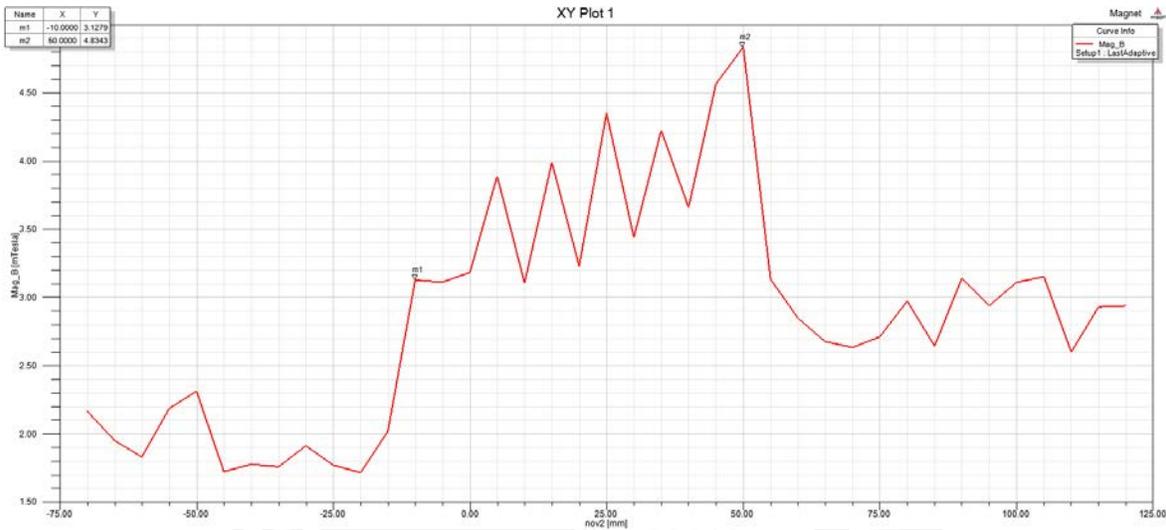


Figura 4.15 Gráfica de variación de densidad de campo magnético para falla por corrosión vs desplazamiento del móvil.

Para tratar de mejorar y corregir la lectura de los sensores se hará el análisis con piezas de ferrita y se analizarán los resultados.



Figura 4.16 Esquema de disposición de elementos para análisis de falla por corrosión usando piezas de ferrita.

En la figura 4.17 se muestra el resultado del análisis de la falla por corrosión después de haber adicionado piezas de ferrita en la parte posterior del sensor de efecto Hall. Se puede observar que el valor de densidad de campo magnético máximo aumento ligeramente, además se logró que la señal sea más estable y por ende la lectura de esta se pueda interpretar con mayor facilidad.

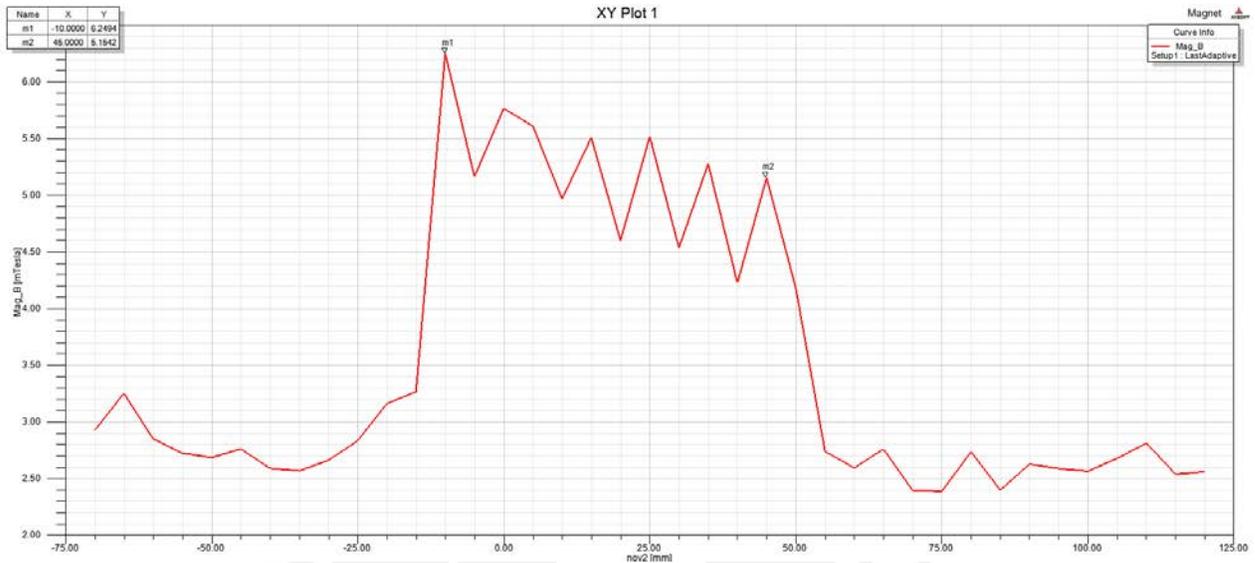
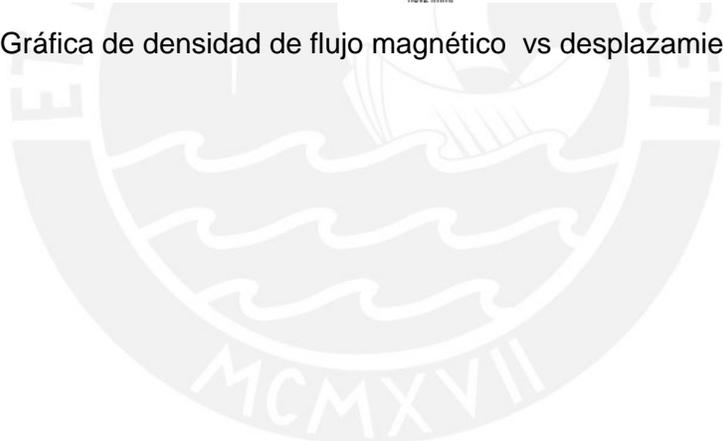


Figura 4.17 Gráfica de densidad de flujo magnético vs desplazamiento del móvil



Capítulo 5

Presupuesto

En la tabla 4-1 se muestra la cotización de los elementos necesarios para el desarrollo del sistema mecatrónico.

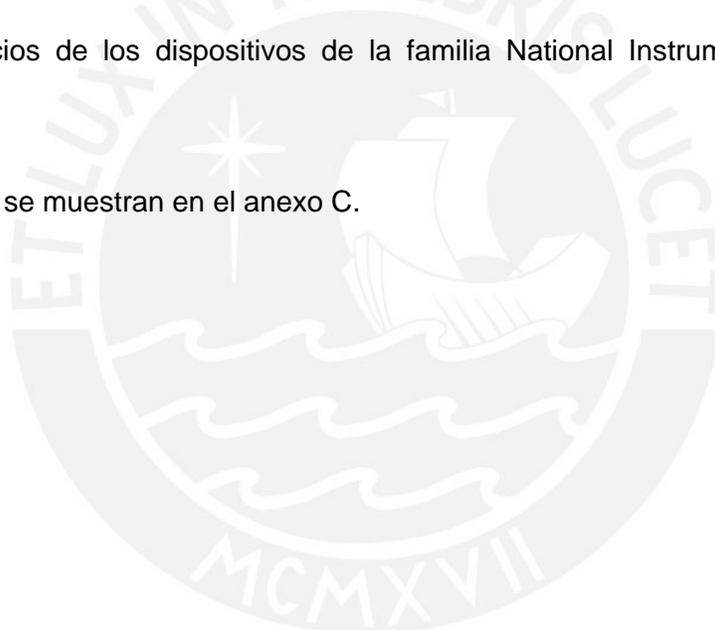
Tabla 4-1: Presupuesto de sistema mecatrónico

Dispositivo	Cantidad	Precio unitario (\$)	Costo (\$)
Compact RIO 9076	1	660	660.00
Terminal tipo tornillo para modulo NI 9205	3	130.5	391.50
Módulo serial RS232 (con cables)	1	612	612.00
Motor DOGA 111.37 61.30.00E	4	92	368.00
Imanes Permanentes	2	586	1,172.00
Arduino MEGA 2560	1	85.29	85.29
Módulos analógicos NI 9205	3	742.5	2,227.50
Relay G5LE	1	27.2	27.20
Sensor efecto Hall SS496A	96	1.54	148.00
Núcleo Magnético	1	300	300.00
Driver MC33926	2	52.17	104.34
Acelerómetro 3 ejes MMA7361L	1	28.27	28.27
Giroscopio 2 ejes LPY550AL	2	30.41	60.82

Giroscopio 3 ejes L3GD20	1	38.97	38.97
Camera LS-Y201	4	72.52	290.08
Lámpara 30x3528SMD	8	39.77	318.16
Baterías Turnigy T5800.1S.25	58	12.7	736.60
Mecanizado y materiales			1,000.00
Desaduanaje			2327,25
TOTAL			11,513.25

NOTA: Los precios de los dispositivos de la familia National Instruments son precios educativos.

Las cotizaciones se muestran en el anexo C.



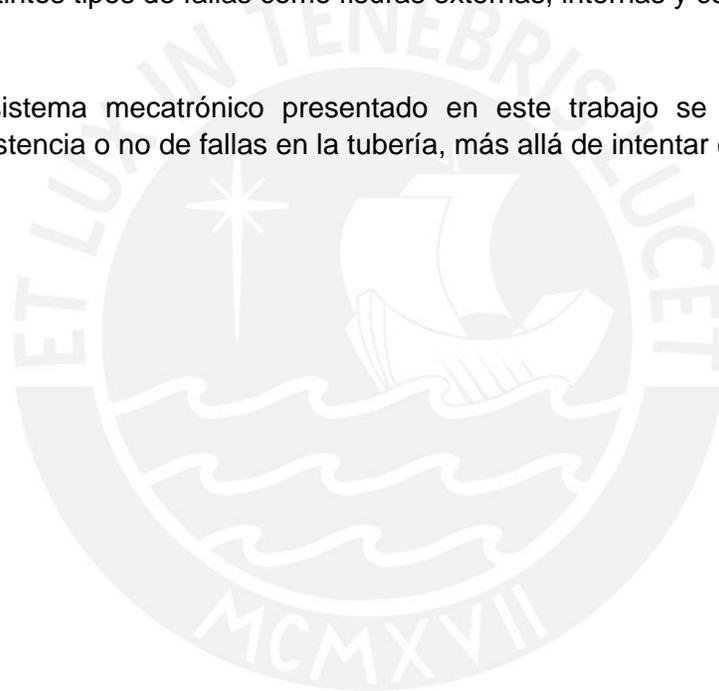
Capítulo 6

Conclusiones

El sistema mecatrónico diseñado satisface los requerimientos para la detección de fallas en tuberías ferromagnéticas para un diámetro de 18 pulgadas

Las simulaciones mostradas demuestran que el método de detección de fallas a través de mediciones de dispersión de densidad de campo magnético en tuberías ferromagnéticas es efectivo para distintos tipos de fallas como fisuras externas, internas y corrosión.

El diseño del sistema mecatrónico presentado en este trabajo se enfoca en poder establecer la existencia o no de fallas en la tubería, más allá de intentar caracterizarlas.



Bibliografía

- [1] Gwan Soo Park and Eun Sik Park, "Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT)", *TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 38, NO. 2, pp. 1277- 1280, 2002.
- [2] Hartmut Ewald, "3-Dimensional Magnetic Leakage Field Sensor in Nondestructive Testing", *Instrumentation and Measurement Technology Conference* Vail, CO, USA, pp. 1309-1311, 2003.
- [3] Gao Song-wei, Pei Rui, Liu Gang. "Magnetic Circuit Design Based on Circumferential Excitation In Oil-gas Pipeline Magnetic Flux Leakage Detection", *Second International Symposium on Computational Intelligence and Design*, pp. 550-553, 2009.
- [4] Xing Li, Liang Chen, Xiaohong Zeng, "FEA of Pipeline Magnetic Flux Leakage NDE", *IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices* Chengdu, China, pp. 312-315, 2009.
- [5] G. Katragadda, W. Lord, Y.S. Sun, S. Udpa and L. Udpa, "Alternative Magnetic Flux Leakage Modalities for Pipeline Inspection", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*. VOL. 32, NO. 3. pp. 1581-1584, 1996
- [6] Hui Min Kim, Yong Woo Rho, Hui Ryong Yoo, Sung Ho Cho, Dong Kyu Kim, Sung Ja Koo , Gwan Soo Park, "A Study on the Measurement of Axial Cracks in the Magnetic Flux Leakage NDT System", *8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 624-629, 2012
- [7] Wei Zhang, Yi Bing Shi, Yan Jun Li, "Magnetic Coil Parameters Design of Oil Casing Damage Detector Based on Magnetic Flux Leakage", *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on ID031 Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices* Sydney, Australia, pp. 50-53,
- [8] M. Norhisam, N. Wei Shin, M. Hamiruce Marhaban and S. Suhaidi, "Magnetic Imaging of Ferromagnetic Shape with Mobile Hall Sensor Array System", *International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, pp. 1-6, 2011.
- [9] Zhang Guoguang, Liu Jing, "Finite Element Modelling of Circumferential Magnetic Flux Leakage Inspection in Pipeline", *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, pp. 327-330, 2010

- [10] Jin Tao, Que Peiwen, Tao Zhengsu, “Development of Magnetic Flux Leakage Pipe Inspection Robot Using Hall Sensors”, pp. 1-5.
- [11] Zulkarnay Zakaria¹, Muhammad Saiful Badri Mansor¹, Aishah Hartini Jahidin¹, Mohd Shuhanaz Zonar Azlan¹ and Ruzairi Abdul Rahim², “Simulation of Magnetic Flux Leakage (MFL) Analysis Using FEMM Software”, Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010), October 3-5, 2010, Penang, Malaysia, pp. 481-486, 2010.



