

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

**Plataforma autonivelada para magnetómetro
antártico comandada por Bluetooth**

Autores:

- *Daniel Rios*

Director:

- *Angel Ferrera*

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico
en la*

Facultad Regional Paraná

Fecha:

Declaración de autoría:

Yo declaro que el Proyecto Final “Plataforma Autonivelada Autónoma Para Magnetómetro Antártico Comandada por Bluetooth” y el trabajo realizado son propio/s.

Declaro/declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

Fecha:

Agradecimientos:

En agradecimiento a mi familia que me apoyó desde el primer momento en esta carrera tanto en lo emocional como económicamente para alcanzar este tan ansiado objetivo.

A los amigos y amistades logradas en este largo camino recorrido.

Por último, agradecer a nuestra casa de estudio y al cuerpo docente que la integra, gracias a su dedicación y paciencia en todos estos años de estudio.

Daniel Rios

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Plataforma Autonivelada Para Magnetómetro Antártico Comandada por Bluetooth

RIOS, Víctor Daniel

Abstract:

The implementation of a self-leveling platform system is developed in this project.

It is designed to support an instrument for measuring the terrestrial magnetic field and allow the operator user to make the necessary mechanical and position adjustments for its correct operation by leveling the platform where it is placed.

The system meets the main design requirements required by the user: Portable, simple installation and assembly and easy action and operation interface.

The system is made up of three parts: a mobile application that manages the different functions of the leveling system; electronic and power unit in charge of processing the different analog signals from the sensors and requests given by the user and in this way activating the mechanical system of the self-leveling platform; mechanical structure

designed to support the different mechanical and electromechanical components of the system.

The development of the leveling instrument was carried out almost entirely while tasks were simultaneously carried out at the Marambio Antarctic Base under the Argentine Antarctic Institute of the National Antarctic Directorate (IAA-DNA), using base resources for its manufacture, such as: hand and electronic tools, 3D printer used for the manufacture of structural parts and supplies.

A leveling system commanded by a cellular device was obtained, with the ability to automatically level the platform that it possesses, being used as a complement and support for a Fluxgate Magnetometer in charge of measuring and surveying terrestrial magnetic field lines in Argentine Antarctic soil.

Keywords: Self leveling. Fluxgate magnetometer. Sensors. Cellular application. Magnetic field.

Resumen:

La implementación de un sistema de plataforma auto nivelada es desarrollada en este proyecto.

La misma está pensada para dar soporte a un instrumento de medición de campo magnético terrestre y permitir al usuario operador realizar los ajustes mecánicos y de posición necesarios para el correcto funcionamiento del mismo mediante la nivelación de la plataforma en donde es colocado.

El sistema cumple con los principales requisitos de diseño requeridos por el usuario: portátil, instalación y montaje simple y fácil interfaz de acción y funcionamiento.

El sistema está compuesto por tres partes: aplicación celular que gestiona las diferentes funciones del sistema nivelador; unidad electrónica y de potencia encargada de procesar las diferentes señales analógicas de los sensores y solicitudes dadas por el usuario y de esta forma accionar el sistema mecánico de la plataforma auto nivelada; estructura mecánica diseñada para dar soporte a los diferentes componentes mecánicos y electromecánicos del sistema.

El desarrollo del instrumento nivelador se realizó casi en su totalidad mientras simultáneamente se cumplían tareas en la Base Antártica Marambio bajo el Instituto Antártico Argentino de la Dirección Nacional del Antártico (IAA-DNA), utilizando recursos de la base para su fabricación, tales como: herramientas de mano y electrónicas, impresora 3D utilizada para la fabricación de las piezas estructurales e insumos.

Se obtuvo un sistema nivelador comandado mediante un dispositivo celular, con capacidad de nivelar automáticamente la plataforma que el mismo posee, siendo utilizado como complemento y soporte de un Magnetómetro Fluxgate encargado de medir y relevar líneas de campo magnético terrestre en suelo antártico argentino.

Palabras Clave: Auto nivelación. Magnetómetro Fluxgate. Sensores. Aplicación celular. Campo Magnético.

Índice

Capítulo 1: Introducción	20
1.1 Descripción	20
1.2. Fundamentación	21
1.3 Diagrama en bloques	21
1.4. Target	22
1.5. Pruebas de concepto	22
1.6. Pruebas de producto. Competencia	22
1.7. Análisis de recursos	22
1.8. Ciclo de vida del producto	22
Capítulo 2: Marco teórico	23
2.1. Campo Magnético Terrestre	23
2.1.1 Elementos de líneas de campo magnético	25
2.2 Composición de un sistema de auto nivelamiento	26
2.2.1 Sensores de movimiento o unidades de medición inercial	27
2.2.2 IMU con dos tipos de sensores	28
2.2.3 IMU con 3 tipos de sensores	28
2.3 Aplicaciones	29
2.3.1 Consideraciones al utilizar un IMU	30
2.3.1.1 Tamaño	30
2.3.1.2 Precisión en los datos	31
2.3.1.3 Tiempo de muestreo.....	31
2.3.1.4 Grados de libertad.....	31
2.4 Errores en unidades de medición inercial	32
2.4.1 Errores de giroscópio y acelerómetro.....	32
2.4.1.1 Rango de entrada [<i>deg/s</i>], [<i>g</i>].....	32
2.4.1.2 Sesgo [<i>deg/hr</i>],[<i>m/s²</i>]	32
2.4.1.3 Repetibilidad de sesgo [<i>deg/hr</i>],[<i>m/s²</i>]	32
2.4.1.4 Estabilidad de sesgo (sesgo en ejecución) [<i>deg/hr/hr</i>],[<i>m/s²/hr</i>] ..	33
2.4.1.5 Factor de escala <i>ppm</i>	33
2.4.1.6 Caminata aleatoria (ruido del sensor) [<i>deg/√hr</i>], [<i>m/s/√hr</i>]	33
2.4.1.6 No ortogonalidad del sensor (des alineación) [<i>mrad</i>].....	33
2.4.1.7 Dependencia de G (efecto de aceleración) [<i>deg/hr</i>], [<i>m/s²</i>]	34
2.4.1.8 Errores de tiempo (latencia)	34
2.5 Métodos de reducción de errores en dispositivos IMU	34
2.6 Filtros de reducción de errores.....	36
2.6.1 Filtro complementario	36

2.6.1 Filtro de Kalman	37
Capítulo 3: Desarrollo	41
3.1 Aplicación celular.....	42
3.1.1 Pantalla principal	43
3.1.2 Conectividad.....	45
3.1.3 Comando manual	47
3.1.4 Funciones.....	49
3.1.5 Pantalla Funciones automáticas.....	50
3.1.6 Función verificación de suelo	51
3.1.7 Función Nivelación Automática	52
3.1.8 Función verificación de suelo	52
3.1.9 Función Datos	53
3.1.10 Función abortar	54
3.1.11 Información funciones automáticas	55
3.2 Sistema Electrónico.....	56
3.2.1. Alimentación.....	57
3.2.2 Regulador de voltaje	58
3.2.3 Microcontrolador.....	58
3.2.4 Interfaz SPI.....	59
3.2.5 Interfaz I2C.....	59
3.2.6 Unidad de medición inercial IMU-6050.....	59
3.2.7 Real Time Clock (RTC)	62
3.2.8 Memoria no volátil SD	64
3.2.9 Desarrollo de software	66
3.2.9.1 Inicialización de software	66
3.2.9.2 Recepción de datos.....	67
3.2.9.3 Ejecución de tareas.....	67
3.2.9.4 Respuesta de calculo inclinación acelerómetro, FC y FK	68
3.2.9.5 Transmisión de Respuesta.....	70
3.3.3 Placa de circuito impreso	71
3.3 Sistema Plataforma	73
3.3.1 Drivers de potencia y motores.....	74
3.3.2 Estructura	79
3.3.3 Construcción y diseño.	84

3.3.4 Sistema de transmisión	85
3.3.5 Movimiento de ejes	86
Capítulo 4: Resultados.....	89
4.1 Puesta en funcionamiento.....	90
4.2 Características técnicas de aplicación celular “Plataforma autoniveladora”	95
4.3 Características técnicas de estructura plataforma.....	97
4.4 Características técnicas de sistema electrónico.....	97
Capítulo 5: Análisis de Costos	98
5.1 Costo de materiales en aplicación celular “Plataforma Niveladora”	98
5.2 Costo de materiales en estructura de plataforma.....	98
5.3 Costo materiales sistema electrónico.....	99
5.4 Costos Totales.....	100
Capítulo 6: Discusión y Conclusión.	101
6.1 Resultados obtenidos.....	101
6.1.1 Operatividad	101
6.2 Futuras mejoras	102
Capítulo 7: Literatura Citada	103

Índice de figuras

Figura 1 - Magnetómetro fluxgate a nivelar	20
Figura 2 - Diagrama en bloques general simplificado del proyecto	21
Figura 3 - Distribución de observatorios permanentes de campo magnético terrestre	24
Figura 4 - Componentes vector campo magnético terrestre	26
Figura 5 - Diagrama de flujo simplificado de sistema auto nivelador	27
Figura 6 - Diagrama en bloques IMU 2 sensores	28
Figura 7 - Diagrama en bloques IMU 3 sensores	28
Figura 8 - IMU comercial.....	30
Figura 9 - Grados de libertad en IMU	31
Figura 10 - Diagrama en bloque de Filtro Complementario	36
Figura 11 - Diagrama de flujo Filtro Complementario.....	37
Figura 12 - Diagrama en bloques Filtro de Kalman	38
Figura 13 - Diagrama en bloques general de Sistema Autonivelador	41
Figura 14 - Interfaz entre el usuario y aplicación celular.....	42
Figura 15 - Diagrama simplificado de aplicación celular	42
Figura 16 - Pantalla de inicio aplicación.....	44
Figura 17 - Pantalla principal	44
Figura 18 - Interfaz comunicación.....	45
Figura 19 - Interfaz movimiento	47
Figura 20 - Paquete de datos de solicitud.....	48
Figura 21 - Interfaz opciones adicionales	49
Figura 22 - Paquete enviado para solicitud.....	50
Figura 23 - Pantalla funciones automáticas	51
Figura 24 - Función Homing	51
Figura 25 - Función Nivelación Automática.....	52
Figura 26 - Función verificación de suelo	52
Figura 27 - Función "Datos" y "Abortar Nivelado"	53
Figura 28 - como "Retornar" e "Información Funciones Automáticas"	55
Figura 29 - Pantalla Informativa Funciones Automáticas	55
Figura 30 - Diagrama en bloques de sistema electrónico de plataforma	56
Figura 31 - Modulo de carga y descarga implementando modulo S-8254A	57
Figura 32 - Esquemático de conexión en módulo de carga	58
Figura 33 - Microcontrolador ESP32-WROOM-32.....	59
Figura 34 - IMU 6050	60
Figura 35 - Módulo RTC DS1307.....	63
Figura 36 - Pin-out de memoria microSD.....	64
Figura 37 - Módulo adaptador de lectura y escritura microSD.....	64
Figura 38 - Perturbación paralela al Eje Y - Inclinación Eje Y	68
Figura 39 - Perturbación paralela a Eje X - Inclinación Eje	69
Figura 40 - Perturbación paralela a eje Y - Inclinación Eje X.....	69
Figura 41 - Perturbación paralela a Eje X - Inclinación Eje Y	69
Figura 42 - Inclinación obtenida de acelerómetro	70
Figura 43 - Placa circuito impreso - Vista	71

Figura 44 - Placa circuito impreso - Vista inferior	72
Figura 45 - Diagrama en bloques de estructura plataforma.....	73
Figura 46 - Driver de potencia Polulu A4988	74
Figura 47 - Conexión driver A4988 con microcontrolador	75
Figura 48 - Componentes driver de potencia.....	76
Figura 49 - Cálculo de tensión de referencia en driver	77
Figura 50 - Ubicación resistencias limitadoras.....	77
Figura 51 - Motor NEMA 17	77
Figura 52 - Dimensiones de motor NEMA 17.....	77
Figura 53 - Diseño final de estructura de plataforma auto-nivelada.....	79
Figura 54 - Soporte motor NEMA 17	80
Figura 55 - Vista soporte motor NEMA 17	80
Figura 56 - Soporte cojinete.....	80
Figura 57 - Vista soporte cojinete	80
Figura 58 - Articulación soporte plataforma	80
Figura 59 - Vista soporte articulación plataforma.....	80
Figura 60 - Unión soporte cojinete	81
Figura 61 - Unión soporte motores	81
Figura 62 - Soporte base plataforma	81
Figura 63 - Soporte eje lineal.....	81
Figura 64 - Soporte plataforma	81
Figura 65 - Junta cardán plataforma	81
Figura 66 - Ilustración articulación cilíndrica	82
Figura 67 - Varilla roscada con tornillo.....	83
Figura 68 - Varilla acerada.....	83
Figura 69 - Rodamiento lineal.....	83
Figura 70 - Rodamiento radial	83
Figura 71 - Posición relativa de cada eje con los demás	84
Figura 72 - Vista eje individual de plataforma	85
Figura 73 - Vista eje individual de plataforma	85
Figura 74 - Condición final de eje	86
Figura 75 - Condición final de eje	86
Figura 76 - Distribución de ejes	87
Figura 77 - Disposición de eje	88
Figura 78 - Plataforma autonivelada final	89
Figura 79 - Caja protectora	89
Figura 80 - Objeto de prueba.....	91
Figura 81 – Desnivel de prueba 100 [mm], 50 [mm] y 30 [mm]	91
Figura 82 - Prueba desnivel N° 1	92
Figura 83 - Prueba desnivel N° 2.....	93
Figura 84 - Prueba desnivel N° 3.....	93
Figura 85 - Conexión banco baterías.....	94
Figura 86 - Implementación banco baterías.....	95
Figura 87 - Configuración de banco baterías.....	95

Índice de tablas

Tabla 1: Aplicación en industria de IMU's.....	29
Tabla 2: Aplicaciones en medicina de IMU's	29
Tabla 3: Aplicaciones en robótica de IMU's.....	29
Tabla 4: Aplicación en sistemas de navegación de IMU's.....	29
Tabla 5: Aplicación en sistemas de realidad virtual de IMU's.....	30
Tabla 6: Aplicaciones en sistemas deportivos de IMU's.....	30
Tabla 7: Conexión módulo SD a microcontrolador.....	65
Tabla 8: Formato datos almacenados en memoria microSD	65
Tabla 9: Grados de libertad de junta de Cardán	82

Lista de Abreviaciones

WMM	Word Magnetic Model
NOAA	Atmospheric Administration's National Centers for Environmental Information
NCEI	The U.S. National Oceanic
WGS	Word Geodetic System
MEMS	Micro Electro-Mechanical Systems
IMU	Inercial Medition Unit
DOF	Degrees Of Freedom
DC	Direct Current
ADC	Analog Digital Converter
SPI	Serial Peripheral Interface
I2C	Inter-Integrated Circuit
TX	Transmisor
RX	Receptor
FC	Filtro Complementario
FK	Filtro de Kalman

Lista de simbolos

[V]

Unidad de Voltage

[Hz]

Unidad Hertz

[W]

Unidad Watt

[°C]

Unidad Grado Celsius

[A]

Unidad Amper

[F]

Unidad Faradio

[s]

Unidad Segundos

[Ω]

Unidad Ohm

Dedicado a:

Capítulo 1: Introducción

1.1 Descripción

La finalidad de este proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de plataforma autonivelada la cual será utilizada en conjunto con un magnetómetro antártico. Este es utilizado para relevar y medir las líneas de campo magnético terrestre en zonas australes cercanas al polo sur. Los datos recopilados de estos estudios son almacenados para un posterior análisis en donde se evalúa principalmente, entre otras cosas, la concordancia de los datos obtenidos del campo magnético terrestre medidos en el punto de estudio comparados con los aportados por el modelo internacional de campo magnético terrestre (WMM: World Magnetic Model).

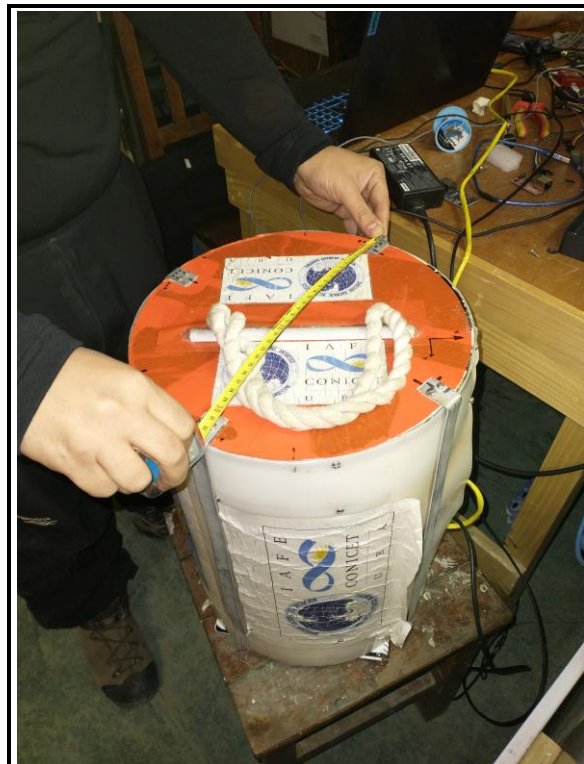


Figura 1 - Magnetómetro fluxgate a nivelar

El sistema a desarrollar tiene como objetivo proporcionar el movimiento y ajuste mecánico al instrumento Magnetómetro en base a las condiciones de terreno en dónde será puesto en marcha. De esta manera el sistema no solo eliminará los errores provocados por el desnivel y el estado del terreno en donde se realice las mediciones, sino que también servirá como un punto de apoyo seguro para el instrumental.

Como funcionalidad adicional el sistema le permitirá al usuario poder controlar de forma arbitraria el sistema, evaluar el terreno y almacenar información relevante al punto medición para un posterior análisis

1.2. Fundamentación

Los magnetómetros son instrumentos que permiten sensar y cuantificar en magnitud y dirección una señal magnética de una muestra. En particular, estos son utilizados para sensar y determinar la magnitud y sentido del campo magnético terrestre en diferentes puntos del planeta.

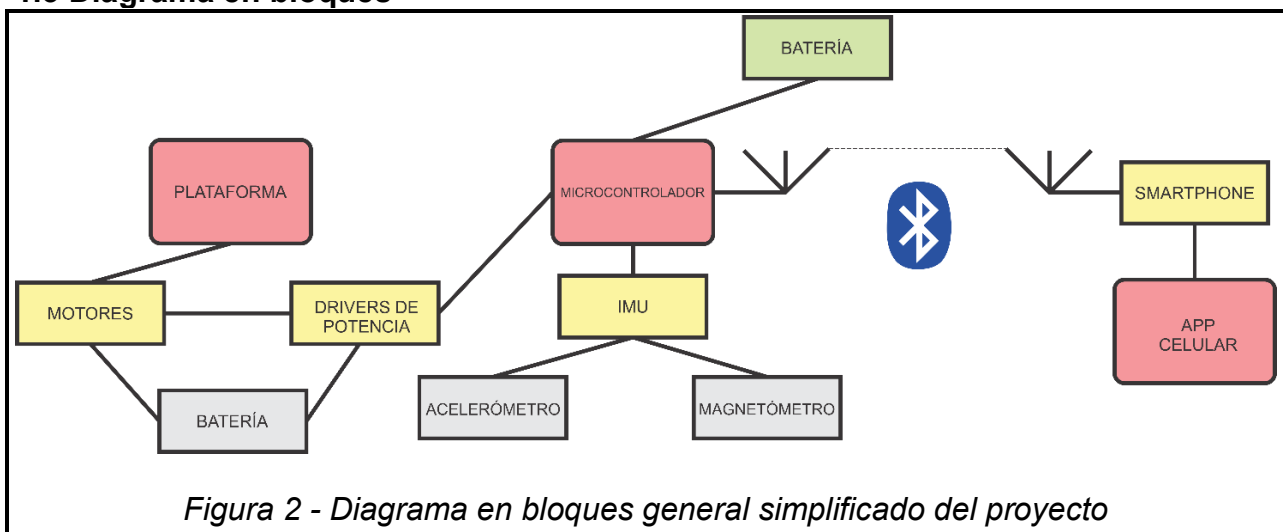
Son utilizados para desarrollar e instalar observatorios en todo el planeta para medir y relevar el campo magnético terrestre de forma continua, con esto se obtiene un registro de cambios y fluctuaciones que este presenta. Estos registros son utilizados para el desarrollo del World Magnetic Field (WMM), utilizado mundialmente en todos los sistemas de navegación.

La construcción de estos observatorios está ligada a la posición geográfica en donde serán instalados. Ya que deben ser aislados de la intemperie, fuentes de ruido y posicionados en lugares estables y seguros.

En puntos geodésicos que presentan geografías irregulares es necesario la utilización de sistemas de nivelación del equipo respecto al suelo para la instalación de estos instrumentos de medida.

El principal objetivo del sistema de nivelación a desarrollar es proporcionar un soporte seguro y estable al equipo de medición capaz de nivelarse respecto al plano del suelo independientemente la geografía en donde sea instalado. De esta manera se obtiene un funcionamiento óptimo del dispositivo, con una precisión mucho mayor en las mediciones realizadas.

1.3 Diagrama en bloques



1.4. Target

El producto está destinado a todo personal, no solo científico, que realice actividades en el exterior y que ésta demande poseer una superficie completamente plana y nivelada para desarrollarla. El uso de la plataforma es extenso, dependiendo la actividad que quiera realizarse.

1.5. Pruebas de concepto

Es un producto útil ya que partió de la necesidad específica de personal científico que desarrolla sus actividades en un suelo inhóspito y desconocido como es el suelo antártico, en donde cada localización cuenta con una geografía completamente distinta e irregular, lo cual hace difícil la localización de un lugar estable en donde colocar instrumentos y realizar los estudios necesarios.

1.6. Pruebas de producto. Competencia

Al ser una herramienta desarrollada exclusivamente para una aplicación bien definida no hay presente muchos dispositivos similares en el mercado. Si bien existen plataformas autoniveladas para el desarrollo de procesos industriales, las características del presente proyecto difieren en gran medida con los demás.

1.7. Análisis de recursos

Los recursos utilizados para la planificación, diseño y puesta en marcha del producto, en primer lugar, fueron reunidos a través de toda la carrera dando los medios posibles para el desarrollo del mismo. En el mismo se invertirá tiempo en la programación y desarrollo de los diferentes algoritmos alojados en el microcontrolador que será el cerebro del sistema; además, se invertirá tiempo en el desarrollo de la aplicación de celular que será la encargada de comandar todo el sistema de forma general y avanzada. También, el desarrollo de todo el hardware requerirá una cantidad de tiempo considerable para la puesta en marcha.

Para el diseño de hardware se utilizarán periféricos, que si bien son de mediano-bajo costo, tienen la ventaja de que tienen una precisión considerable, vida útil medianamente larga y se pueden adquirir de forma fácil.

1.8. Ciclo de vida del producto

En base a los diferentes elementos que el dispositivo posee, se puede realizar una estimación de la vida útil de la herramienta, pero al ser un dispositivo que será desarrollado y puesto en marcha en condiciones extremas solo se sabrá de forma exacta una vez probado y estudiando su desempeño.

Capítulo 2: Marco teórico

Para comprender mejor la finalidad del proyecto desarrollado a continuación se hará un recorrido por los diferentes temas relacionados al mismo.

2.1. Campo Magnético Terrestre

La tierra es un imán gigante, donde en cualquier ubicación sobre o por encima de ella, su campo magnético posee líneas de campo las cuales pueden conocerse con bastante certeza y ser medidas con facilidad. El conocimiento del campo magnético terrestre es utilizado para:

- Orientación de aeronaves
- Embarcaciones
- Satélites
- Antenas
- Herramientas y equipos electrónicos.

En algunos lugares del globo la componente horizontal del campo magnético terrestre utilizada para la orientación de los diferentes equipos coincide con el norte geográfico o norte verdadero, pero en general esto no ocurre. Este desfase angular entre el norte magnético y el norte geográfico en los distintos puntos del planeta se denomina declinación magnética. Esta corrección es necesaria al momento de realizar una navegación ya sea por aire o por mar, convirtiendo un rumbo magnético a un rumbo verdadero.

El Modelo Magnético Mundial (WMM: World Magnetic Model) provee las herramientas necesarias para realizar esta corrección., el cual es desarrollado y producido por “The U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration’s National Centers for Environmental Information” (NOAA/NCEI), es un modelo estándar utilizado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, el Ministerio de Defensa de Inglaterra. La Organización Internacional de Hidrografía, navegación, sistemas de referencia de actitud y rumbo utilizando el campo geomagnético. También se utiliza ampliamente en sistemas de navegación y localización para uso civil. Este modelo, tiene como principal utilidad la de proveer la declinación magnética en cualquier punto del globo. Además, este provee la geometría completa del campo magnético terrestre hasta 1 [Km] debajo del WGS: Sistema Geodésico del Mundo (World Geodetic System) hasta 850 [Km] sobre este.

El campo magnético terrestre es un vector (\mathbf{B}) el cual varía en tiempo (t) y espacio (r), este es medido por sensores magnéticos ubicados sobre la superficie terrestre y por encima de esta. \mathbf{B} está compuesto por diferentes contribuciones de importantes campos magnéticos que provienen de diferentes fuentes, los cuales se superponen e interactúan entre sí a través de procesos inductivos. Las principales fuentes de campo magnético que componen el terrestre son:

- Campo debido al núcleo terrestre generado por la capa externa del núcleo líquido y conductor de la tierra: $\mathbf{B}_{\text{nucleo}}(r, t)$
- Campo debido a la corteza terrestre y manto superior: $\mathbf{B}_{\text{corteza}}(r)$
- Campo de perturbación combinado debido a las corrientes eléctricas que fluyen en la parte superior de la atmósfera y magnetosfera, que también inducen corrientes eléctricas en el mar y la tierra $\mathbf{B}_{\text{perturbacion}}(r, t)$

$$\mathbf{B}(r, t) = \mathbf{B}_{\text{nucleo}}(r, t) + \mathbf{B}_{\text{corteza}}(r) + \mathbf{B}_{\text{perturbacion}}(r, t)$$

El campo producido por el núcleo magnético terrestre, $\mathbf{B}_{\text{nucleo}}$, es el que domina en comparación con los demás, siendo algo más del 95% del campo total, y el movimiento secular del núcleo produce una variación lenta en el tiempo.

El campo magnético aportado por los cristales de roca magnetizados, $\mathbf{B}_{\text{corteza}}$, ubicados sobre la superficie terrestre varía de forma espacial, aunque en las escalas de tiempo consideradas en el modelo su aporte es constante en el tiempo. Si bien la magnitud de $\mathbf{B}_{\text{corteza}}$ en comparación con $\mathbf{B}_{\text{nucleo}}$ es mucho menor en la mayoría de los lugares, puede tener un impacto significativo en los dispositivos con brújulas.

Por último, el aporte debido a las corrientes que fluyen en la ionosfera y la magnetosfera y sus resultantes inducen corrientes en el manto y la corteza de la tierra, $\mathbf{B}_{\text{perturbacion}}$, estas varían con la ubicación y el tiempo.

Para crear un modelo de campo magnético preciso con el cual poder medir las componentes de campo magnético más importantes, se utilizan diferentes métodos: satélites especiales y observatorios terrestres. En el siguiente gráfico se puede observar la distribución espacial de los diferentes observatorios ubicados en la superficie terrestre, cuya función principal es la de relevar de forma continua estas variables.

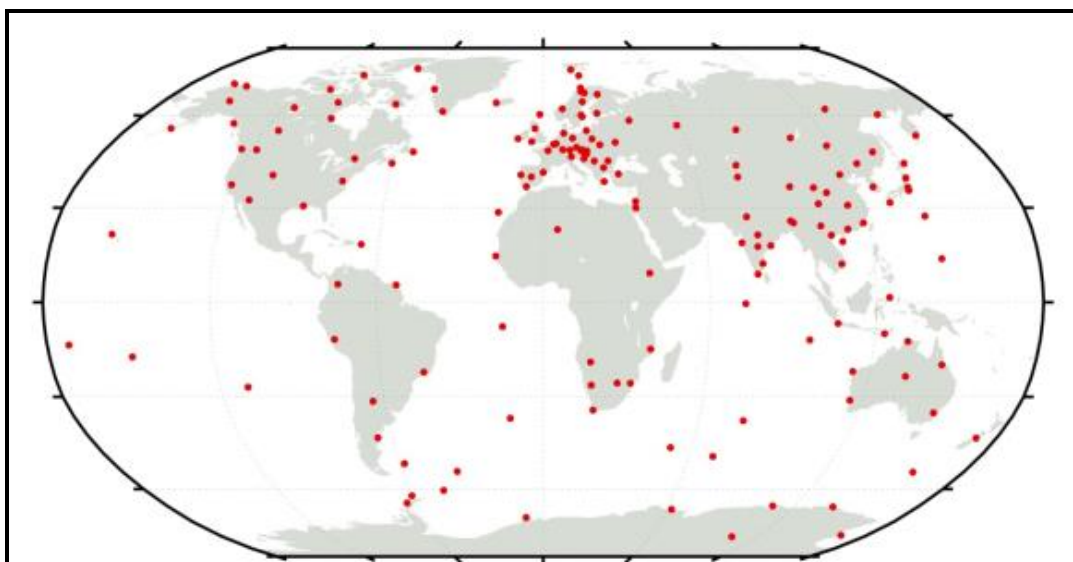


Figura 3 - Distribución de observatorios permanentes de campo magnético terrestre

Cabe resaltar la diferencia de distribución de observatorios permanentes entre el hemisferio norte y el hemisferio sur, donde se observa una mayor cantidad en el primero que en el segundo. Además, esto se repite comparando el hemisferio orientan con el occidental. Teniendo en cuenta lo anterior, el lugar geofísico con menos cantidad de observatorios permanentes es la unión entre el hemisferio sur y el hemisferio occidental.

Dicha localización coincide con la localización de la Antártida Argentina.

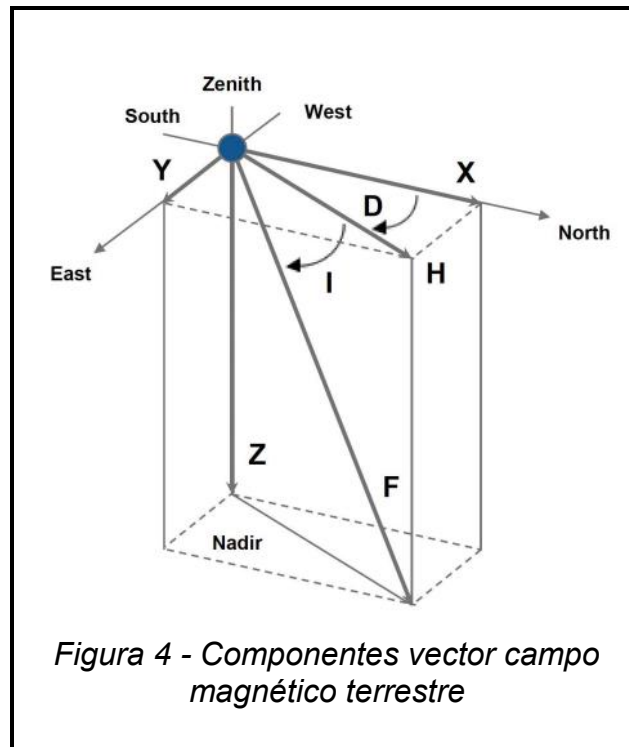
En los observatorios terrestres presentar 3 categorías de instrumentos:

- La primera categoría comprende variómetros que realizan mediciones continuas del campo geomagnético terrestre. Actualmente el tipo más común utilizado de variómetro es el magnetómetro fluxgate de tres ejes.
- La segunda categoría comprende instrumentos absolutos que pueden realizar mediciones del campo magnético en términos de unidades básicas físicas absolutas o constantes físicas universales.
- La tercera categoría comprende instrumentos semi-absolutos. Estos instrumentos miden las desviaciones de un campo, que se determina de forma regular utilizando un instrumento absoluto.

Los observatorios terrestres de primera categoría son los más usuales debido a que su composición y construcción son más accesibles. Tanto los variómetros digitales como analógicos requieren temperaturas controladas, como también plataformas estables en donde ser colocados. Este último punto es muy importante ya que debe soportar la intemperie y adaptarse al terreno en donde es instalado.

2.1.1 Elementos de líneas de campo magnético

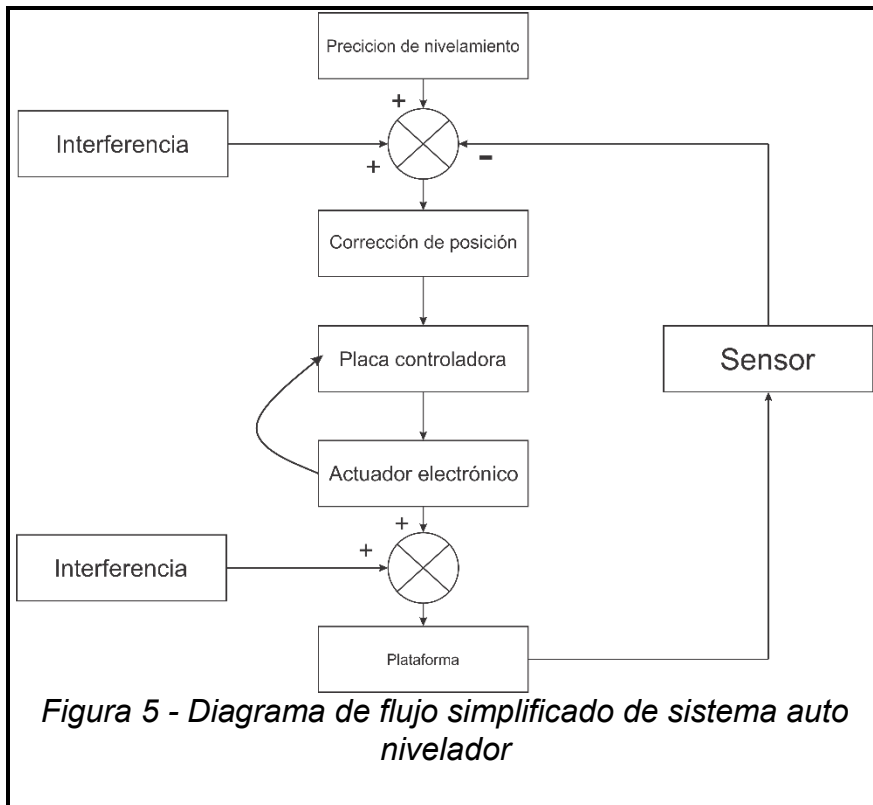
El vector de campo geomagnético, B_m , se describe mediante siete elementos. Estos son la intensidad del norte X , la intensidad del este Y , la intensidad vertical Z (positiva hacia abajo) y las siguientes cantidades derivadas de X , Y y Z : la intensidad horizontal H , la intensidad total F , el ángulo de inclinación I , (también llamado ángulo de inmersión y medido desde el plano horizontal al vector de campo, positivo hacia abajo) y el ángulo de declinación D (también llamado variación magnética y medido en el sentido de las agujas del reloj desde el norte verdadero hasta la componente horizontal del vector de campo).



2.2 Composición de un sistema de auto nivelamiento

De acuerdo al modo de transmisión de energía utilizado en el sistema, los sistemas de nivelamiento pueden dividirse en sistemas hidráulicos y sistemas electromecánicos. Los sistemas manejados por cilindros pueden soportar cargas muy pesadas, sin embargo, al utilizar líquidos como medio de trabajo resultan sensibles a temperaturas y a las posibles fugas, lo que resulta de precisión baja. Los sistemas electromecánicos, a diferencia del anterior, es compacto y fácil de controlar, si bien presentan una mayor complejidad tienen la ventaja de ser más precisos. La complejidad estará ligada a la cantidad de puntos de ajuste que el sistema poseerá, siendo tipo de tres puntos, cuatro puntos o tipo multipunto.

Un sistema de nivelamiento electromecánico general incluye las siguientes partes: módulos mecánicos y módulos de control. Además, se incluye la fuente de energía que alimenta el sistema, sensores de inclinación, motores y sistemas de transmisión. Se incluye, además, las perturbaciones o ruido externo que se introduce en el sistema y afecta el funcionamiento del instrumento.



En la *Figura N. ° 5* se observa la composición general de un sistema de nivelamiento automático. En este punto se destacan 2 elementos igual de importantes, el sensor a utilizar y las perturbaciones o interferencias que en el sistema están presentes.

2.2.1 Sensores de movimiento o unidades de medición inercial

El inicio de estos sistemas se remonta a las primeras décadas del siglo 20, utilizados en aeronaves o sistemas de gran porte, debido a su tamaño, costo y consumo de energía. En épocas más recientes y con la introducción de los sistemas microelectrónicos (*MEMS: Micro Electro-Mechanical Systems*) fue posible desarrollar sensores más pequeños y de menor costo, siendo así más atractivo su uso en una amplia gama de dispositivos.

La demanda de unidades de medición inercial (*IMU: Inercial Medicion Unit*) ha crecido de manera exponencial en base al desarrollo de dispositivos electrónicos que los utilizan. El uso de IMU se ha aplicado ampliamente para determinar sus movimientos en términos de aceleración, velocidad angular y rotación de estos dispositivos.

La tecnología de estos dispositivos utilizados para la medición de velocidad, orientación y fuerza gravitacional están divididas en dos: la antigua basada en la implementación de un acelerómetro y giróscopo; la más avanzada además de los dos anteriores, se suma la implementación de un tercer sensor denominado magnetómetro.

2.2.2 IMU con dos tipos de sensores

Compuestos por un acelerómetro y un giróscopo. Cada uno tiene de dos a tres grados de libertad (*DOF: Degrees Of Freedom*). Combinándolos se tiene un total de cuatro a seis DOF.

Las variables que determinan estos dispositivos están representadas en la figura.

La ventaja de estos dispositivos es que la presencia de un campo magnético externo no afecta su desempeño, aun estando cercano a materiales ferromagnéticos. El funcionamiento y respuesta del IMU depende exclusivamente de la precisión del mismo ante el ruido del sistema y el error de los giroscopios.

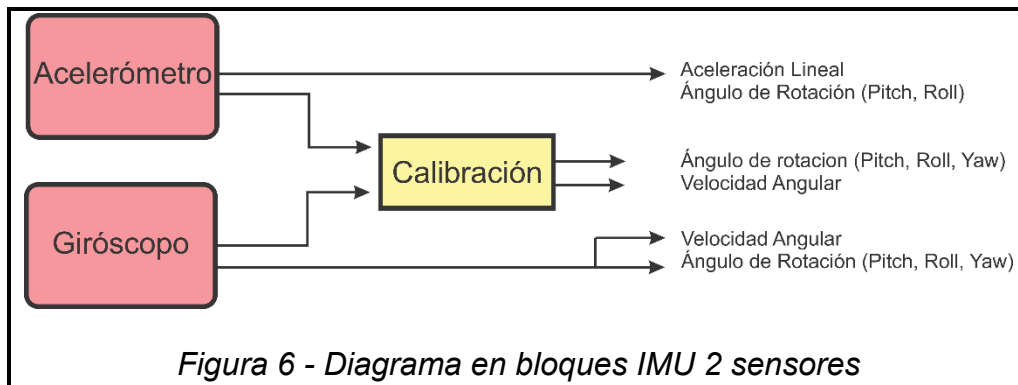


Figura 6 - Diagrama en bloques IMU 2 sensores

2.2.3 IMU con 3 tipos de sensores

Además de un acelerómetro y un giróscopo, comprenden en su interior un magnetómetro. Comúnmente todos presentan tres DOF, haciendo un total de nueve DOF. Utilizados más en el cálculo de orientación dinámica, debido a la presencia de un magnetómetro si se lo utiliza en un entorno rodeado de metal ferromagnético, las mediciones pueden verse afectadas debido a la perturbación del campo magnético.

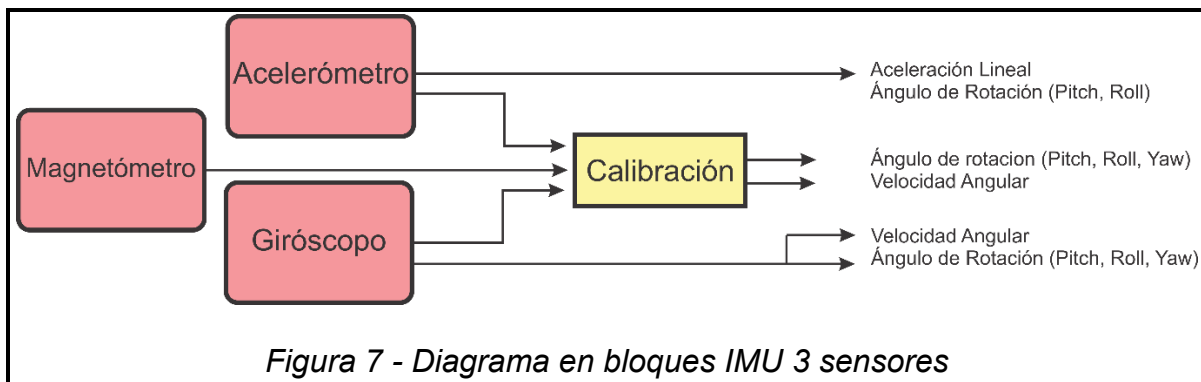


Figura 7 - Diagrama en bloques IMU 3 sensores

2.3 Aplicaciones

La tecnología IMU, gracias al avance en el desarrollo de las MEMS, ahora se ha expandido a diversas áreas como dispositivos médicos, robótica, navegación de vehículos terrestres o aéreos (tripulados o no), etc.

Las aplicaciones de estos sensores pueden ser clasificadas en las siguientes categorías: Tipos de IMU, área de aplicación y métodos de fusión e implementación.

APLICACIONES EN FABRICACIÓN DE CONTROL DE CALIDAD

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
Foxlin ⁴	Rastreador de cabeza inercial	Tipo I	Filtros de Kalman
S. Won <i>et al.</i> ⁵	Rastreador de herramientas de sujeción	Tipo I	KF y sistemas
S. Won <i>et al.</i> ⁶	Rastreador de herramientas de sujeción	Tipo II	KF y sistemas

Tabla 1: Aplicación en industria de IMU's

APLICACIONES MEDICAS DE REHABILITACIÓN

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
W.-W. Wang and L.C. Fu ⁷	Exoesqueleto para rehabilitación	Tipo II	Concepto de terapia de espejo
Je-Nam Kam <i>et al.</i> ⁹	Monitor de rehabilitación posterior a un accidente cerebrovascular	Tipo II	Ninguno
Jon Erikson <i>et al.</i> ¹⁰	Rehabilitación del brazo después de un accidente cerebrovascular	Tipo II ₁₁	Ninguno
Z. Q. Ding <i>et al.</i> ¹²	Corrección de la postura del brazo	Tipo II	Desconocido
Gianni Fenu and Gary Steri ¹³	Análisis de movimientos postraumáticos	Tipo I	Ninguno

Tabla 2: Aplicaciones en medicina de IMU's

APLICACIONES EN ROBÓTICA

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
Jingang Yi <i>et al.</i> ¹⁴⁻¹⁵	Robot móvil con dirección deslizante	Tipo I	KF no lineal / KF extendido y deslizamiento
Chris C. Ward and Karl Iagnemma ¹⁶	Detección de patinaje de ruedas	Tipo II	esquema de estimación
Marrco Hutter <i>et al.</i> ¹⁷ , Michael Bloesch <i>et al.</i> ¹⁸	Robot de patas	Tipo I	KF extendido

Tabla 3: Aplicaciones en robótica de IMU's

APLICACIONES EN SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
T. S. Burggemann <i>et al.</i> ¹⁹	Detección de fallas de GPS	Tipo I	KF extendido
A. Zul Zafar and D. Hazry ²⁰	Estabilizador de cuadrórotor	Tipo I	Estimación del promedio de peso, PID
Jong-ho Han <i>et al.</i> ²¹	Construcción de mapas 3D	Tipo I	Filtro de equilibrio (paso alto, paso bajo)

Tabla 4: Aplicación en sistemas de navegación de IMU's

APLICACIONES EN SISTEMAS DE REALIDAD VIRTUAL

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
R. Azuma <i>et al.</i> ³²	Navegación personal al aire libre	Tipo I	Calibración de datos de brújulas

Tabla 5: Aplicación en sistemas de realidad virtual de IMU's

APLICACIONES EN APRENDIZAJE DEPORTIVO

Referencia	Uso/dispositivo	Tipo de IMU	Método de implementación
N. C. Perkins ²²⁻²⁴	Medir el equipamiento deportivo	Tipo I	Ninguno
K. King <i>et al.</i> ²⁵ , K. King ²⁶	trayectoria	Tipo I	Ninguno
Yi-Chen Huang <i>et al.</i> ²⁷	Medir la trayectoria del swing de golf	Tipo I	Basado en el método de mínimos cuadrados (LSM)
K. King <i>et al.</i> ²⁸	Medir la trayectoria del swing de golf	Tipo I	calibración
Tung Mun Hon <i>et al.</i> ²⁹	Medir el efecto de los bolos dinámica	Tipo I	Ninguno
Ryan S. McGinnis <i>et al.</i> ³⁰⁻³¹	Medición de la cinemática de béisbol / softbol	Tipo I	Ninguno

Tabla 6: Aplicaciones en sistemas deportivos de IMU's

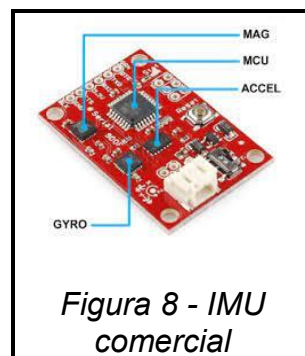
Para la utilización de un dispositivo IMU es necesario determinar las necesidades específicas de la aplicación, y en base a esto último seleccionar el dispositivo a implementar. Existen diferentes tipos de IMU implementados mediante MEMS, diferenciándose cada uno dependiendo sus características de hardware y electrónicas.

2.3.1 Consideraciones al utilizar un IMU

Al elegir qué tipo de IMU se utilizará, hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta según el uso final y la tolerancia o error del mismo.

2.3.1.1 Tamaño

La mayoría de los consumidores diseñadores de productos requieren sensores pequeños y livianos que se adapten al producto permitiendo una buena movilidad. Smartphones, medición de trayectorias de vuelo en dispositivos pequeños, como ser pelotas de beisbol, requieren un tamaño diminuto de sensores IMU para su implementación.



2.3.1.2 Precisión en los datos

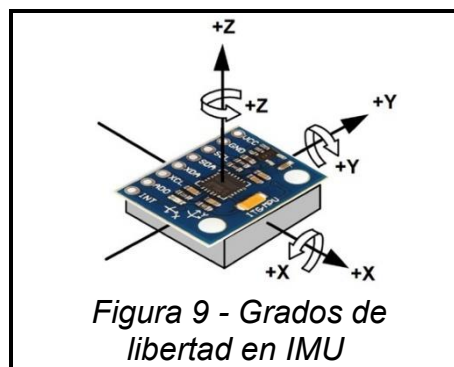
Los giróscopos presentan errores de deriva durante largos periodos de tiempo cuando son utilizados para la obtención de muestras. Los acelerómetros al contrario presentan la propiedad que mientras más largo sea el tiempo de muestreo los datos serán más precisos. Se han desarrollado mejoras basadas en métodos que utilizan filtros para calibrar los datos obtenidos de estos dos tipos de sensores. Algunas aplicaciones necesitan un rango de medidas en los cuales se soportan determinadas tolerancias o errores de precisión, sin la necesidad de filtrado.

2.3.1.3 Tiempo de muestreo

Una característica importante de un sensor es el tiempo de muestreo máximo que es capaz de implementar. Si bien es una característica que limita al sensor a la aplicación o dispositivo en el cual se quiera implementar, existe un amplio rango y tipos de sensores que se adaptan en base a las necesidades.

2.3.1.4 Grados de libertad

Determina el número de parámetros independientes del sistema. El número de grados de libertad representan las medidas en los ejes X, Y y Z de cada sensor. En el mercado se hayan dispositivos que van desde dos a 9-ejes de libertad. La diferencia en cada dispositivo depende del tipo de sensor incluido en el IMU. Usualmente un mayor número de grados de libertad representa un muestro más preciso de los datos.



A pesar de los muchos avances, los MEMS de bajo costo utilizados en aplicaciones industriales o de desarrollo aún experimentan sesgos, factores de escala y otros errores aleatorios. Estos errores se deben a la desalineación de los ejes en la fabricación del sensor o durante el montaje de la IMU, también producidos por el auto calentamiento del sensor. Los métodos adecuados de calibración y fusión del sensor pueden reducir o compensar el efecto de estos errores. En la calibración se establece una relación entre las medidas del sensor digital y la cantidad física que se mide. Los métodos de calibración

difieren principalmente en la instrumentación utilizada y la complejidad del modelo utilizado para representar el sensor

2.4 Errores en unidades de medición inercial

Una unidad de medición inercial (IMU) combina aceleraciones lineales de un acelerómetro y rotaciones de un giroscopio para entregar parámetros de navegación e información de actualización de posición. La precisión de estos parámetros está influenciada por una serie de errores que son función del tiempo.

2.4.1 Errores de giroscopio y acelerómetro

2.4.1.1 Rango de entrada [*deg/s*], [*g*]

El rango de entrada es la velocidad angular máxima o la aceleración que la IMU puede medir de manera significativa. La aceleración o rotación fuera de este rango da como resultado mediciones incorrectas o ninguna medición. Es importante tener esto en cuenta al seleccionar una IMU, especialmente en entornos que experimentan una alta dinámica o con IMU que tienen rangos de entrada bajos. El rango de entrada también se puede describir en términos de choque (aceleración lineal con respecto al tiempo) o aceleración angular (tasa angular con respecto al tiempo). Es importante destacar que las vibraciones fuertes pueden conducir a una mala solución, ya que los sensores ya están saturados de señal. La señal real del movimiento del vehículo (o el cuerpo objeto de la medición) es más difícil de separar del ruido causado por la vibración. El ancho de banda de los sensores juega un papel importante en la capacidad de los sensores para medir el movimiento real.

2.4.1.2 Sesgo [*deg/hr*],[*m/s²*]

Para una entrada física determinada, el sensor genera una medición, compensada por el sesgo. Por ejemplo, si la IMU está estacionaria y nivelada, el eje vertical mide el efecto de la aceleración gravitacional. La gravedad tiene una aceleración nominal de 9,81 [*m/s²*], pero si la medición está sesgada, la IMU puede informar 9,75 [*m/s²*]. La diferencia entre el valor real y la salida es el sesgo. En la ecuación de un solo eje, el sesgo se denota como *b*.

$$x = S f (x) + b$$

El sesgo se puede dividir en dos componentes que describen el comportamiento del sesgo a lo largo del tiempo; respetabilidad y estabilidad.

2.4.1.3 Repetitividad de sesgo [*deg/hr*],[*m/s²*]

Para cada encendido de la IMU, el sesgo inicial es diferente. Esto se debe a una serie de efectos, incluido el cambio en las propiedades físicas de la IMU y las condiciones iniciales del procesamiento de la señal. Un sesgo muy repetible permite un mejor "ajuste" de los parámetros de la IMU por parte del INS para alcanzar rápidamente una buena estimación del sesgo. Una alta variabilidad en el sesgo de activación a activación conduce a un período de estimación más largo y difícil (convergencia) para cada inicio.

2.4.1.4 Estabilidad de sesgo (sesgo en ejecución) [deg/hr/hr],[m/s²/hr]

Mientras la IMU está encendida, el sesgo inicial cambia con el tiempo. Este cambio de sesgo a menudo está relacionado con la temperatura, el tiempo y/o el estrés mecánico en el sistema. A menudo, las IMU se fabrican con compensación de temperatura, lo que aumenta la estabilidad de las mediciones.

2.4.1.5 Factor de escala ppm

El error del factor de escala es la relación entre la entrada y la salida. Si la entrada es 100%, la salida esperada es 100%. La salida real es el resultado de un efecto lineal, donde la salida es proporcional a la entrada, pero escalada. Por ejemplo, si la entrada es 10 [m/s²], pero hay un error de factor de escala del 2%, la medida de salida es 10,2 [m/s²]. Esto también se puede describir como un error de 20000 ppm. Otra forma de pensar en el factor de escala es la pendiente de la señal del sensor. En la siguiente ecuación de un solo eje, el factor de escala es denotado como S.

$$x = S f (x) + b$$

2.4.1.6 Caminata aleatoria (ruido del sensor) [deg^{1/2}/hr], [m/s^{1/2}/hr]

Si un sensor mide una señal constante, siempre está presente un ruido aleatorio (error) en la medición. Esto se describe como un proceso estocástico y se minimiza mediante técnicas estadísticas. La integración (mecanización) de los errores de caminata aleatorios en las medidas, conduce a una caminata aleatoria en la solución final. Un área donde la marcha aleatoria de los giroscopios juega un papel importante es la alineación estática. La calidad del resultado de la alineación estática está directamente relacionada con el ruido de los sensores.

2.4.1.6 No ortogonalidad del sensor (des alineación) [mrad]

Los tres giroscopios y los tres acelerómetros están montados ortogonales entre sí. Sin embargo, los montajes tienen errores y, por lo tanto, no están perfectamente a 90 grados. Esto conduce a una correlación entre sensores. Por ejemplo, suponga que un eje apunta perfectamente hacia arriba y la IMU está nivelada. El acelerómetro de este eje mide la gravedad. Si los otros dos ejes fueran perfectamente ortogonales, no miden nada del efecto de la gravedad. Si hay una no ortogonalidad, los otros ejes también miden la gravedad, lo que lleva a una correlación en las medidas.

El efecto de la no ortogonalidad se produce dentro de los conjuntos de sensores (entre acelerómetros o giroscopios), entre conjuntos de sensores o entre los conjuntos de sensores y la carcasa (desalineación del paquete). La fabricación cuidadosa, así como la calibración de fábrica, pueden ayudar a minimizar esta fuente de error. La estimación y corrección continuas durante el funcionamiento del sistema también es un enfoque utilizado para minimizar este efecto.

La desalineación del paquete (entre la IMU y el gabinete) se puede eliminar realizando una estimación de puntería para determinar el desplazamiento entre el marco de medición de la IMU y el marco del sensor (objetivo).

2.4.1.7 Dependencia de G (efecto de aceleración) [deg/hr], [m/s²]

Algunos giroscopios y acelerómetros están sujetos a un cambio en el sesgo dependiendo de cómo el sensor experimenta la aceleración. Esto es más común en los giroscopios de sistemas micro electromecánicos (MEMS), cuando la masa sufre una aceleración a lo largo del eje de detección.

Este efecto se puede modelar y eliminar de las mediciones y, a menudo, se incluye en la etapa de condición de la señal IMU antes de la salida de las mediciones.

2.4.1.8 Errores de tiempo (latencia)

La diferencia entre el tiempo que la IMU mide el movimiento y el tiempo que las fuentes externas como GNSS miden el mismo movimiento es un factor muy importante en la calidad de la solución combinada resultante. Cuando la sincronización INS + GNSS no concuerda, por factores suficientemente grandes, los errores se hacen evidentes, especialmente en situaciones dinámicas.

El equipo INS integrado corrige esta diferencia en el tiempo de medición automáticamente y elimina este error de las mediciones de salida y la solución de navegación final.

2.5 Métodos de reducción de errores en dispositivos IMU

Las fuerzas específicas y velocidades angulares recogidas por el acelerómetro y giroscopio contienen diferentes tipos de errores, como ruido, sesgos de activación, errores de factor de escala y errores de instalación en su fabricación. Por lo general, el modelo de error del sensor para giroscopios y acelerómetros se puede describir mediante las ecuaciones siguientes:

$$\hat{\omega} = \omega + \omega + S_g \omega + N_g \omega + n_\omega$$

$$\hat{f} = f + b + S_a f + N_a f + n_f$$

Donde ω son las salidas reales del giróscopo, ω es la verdadera velocidad angular del giroscopio, ω es el sesgo del giróscopo, S_g es la escala factor, N_g son los errores de instalación, n_ω es el ruido del giróscopo, f es las salidas reales del acelerómetro, f es la fuerza específica verdadera, b es el sesgo del acelerómetro, S_a es el factor de escala, N_a son los errores de instalación y n_f es el ruido del giroscopio. Los sesgos del giróscopo y del acelerómetro normalmente contienen dos partes: parte determinista y parte aleatoria. La parte determinista es constante, pero difiere cada vez que se enciende el sensor. La parte aleatoria varía con el tiempo y se cuantifica por la inestabilidad de sesgo.

Los factores de escala del giroscopio y el acelerómetro provocan errores en el sensor del valor real. Por lo general, los factores de escala para giroscopios y acelerómetros están representados por las matrices diagonales en las ecuaciones (5) y (6), respectivamente, y se cuantifican en unidades de partes por millón (ppm). Normalmente, el factor de escala para MEMS IMU varía en función de los entornos circundantes (como la temperatura).

$$S_g = \begin{bmatrix} K_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{gz} \end{bmatrix}$$

$$S_a = \begin{bmatrix} K_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & K_{az} \end{bmatrix}$$

Donde K_{gx} , K_{gy} , K_{gz} son los factores de escala para los giroscopios a lo largo de los ejes X, Y y Z, respectivamente, y K_{ax} , K_{ay} , K_{az} son los factores de escala para los acelerómetros a lo largo de los ejes X, Y y Z, respectivamente. Debido a la imperfección del ensamblaje e instalación del sensor inercial, los tres ejes sensibles de la tríada del sensor no son perfectamente ortogonales entre sí, lo que hace que el valor inercial detectado de un eje se proyecte en los otros dos ejes. El error de instalación de giroscopios y acelerómetros puede ser descrito por las ecuaciones (7) y (8), respectivamente, y se cuantifican utilizando la unidad de ángulo.

Del mismo modo, los errores de instalación también dependen de la temperatura.

$$N_g = \begin{bmatrix} 0 & K_{gxy} & K_{gxz} \\ K_{gyx} & 0 & K_{gyz} \\ K_{gzx} & K_{gzy} & 0 \end{bmatrix}$$

$$N_a = \begin{bmatrix} 0 & K_{axy} & K_{axz} \\ K_{ayx} & 0 & K_{ayz} \\ K_{azx} & K_{azy} & 0 \end{bmatrix}$$

Donde K_{gij} es el error de instalación entre el eje i y el eje j , y K_{aij} es el error de instalación del acelerómetro entre el eje i y el eje j ($i, j = x, y, z$). Aunque los sesgos del sensor, los factores de escala y los errores de instalación varían en su naturaleza, se consideran constantes en un período corto de tiempo a temperatura estable.

Estos errores pueden ser reducidos o mitigados en gran parte mediante la utilización de filtros o algoritmos que permiten obtener un resultado más preciso.

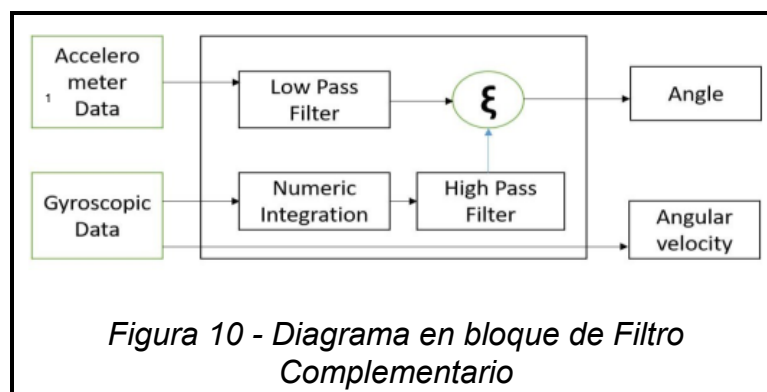
Un error de sesgo, si no se elimina de la medición, se integra dos veces como parte del proceso de mecanización. En este caso, un sesgo constante (error) en la aceleración se convierte en un error lineal en la velocidad y un error cuadrático en la posición. Un sesgo constante en la tasa de actitud (giroscopio) se convierte en un error cuadrático en la velocidad y un error cúbico en la posición.

Un filtro convergente y bien diseñado, estima y elimina errores de las mediciones de IMU, lo que conduce a una mayor precisión de actitud y una mayor estabilidad de la solución.

2.6 Filtros de reducción de errores

2.6.1 Filtro complementario

En la Unidad de Medición Inercial (IMU), el acelerómetro, el giroscopio y el magnetómetro están integrados. El acelerómetro y el giroscopio son el sensor principal y el magnetómetro es el sensor de corrección. Todas las fuerzas que actúan sobre el objeto se miden con un acelerómetro y, dado que las pequeñas fuerzas crean perturbaciones en la medición, la medición a largo plazo es fiable. Entonces, para el acelerómetro, se necesita un filtro de paso bajo para la corrección. En el sensor giroscópico, la integración se realiza durante un período de tiempo, el valor comienza a variar a largo plazo, por lo que se necesita un filtro de paso alto para la corrección de datos giroscópicos. El filtro complementario consta de un filtro de paso alto y bajo.



La función de transferencia para la entrada que pasa a través del filtro de paso bajo:

$$\frac{1}{1 + T_S}$$

La función de transferencia para la entrada que pasa a través del filtro de paso alto:

$$\frac{T_S}{1 + T_S}$$

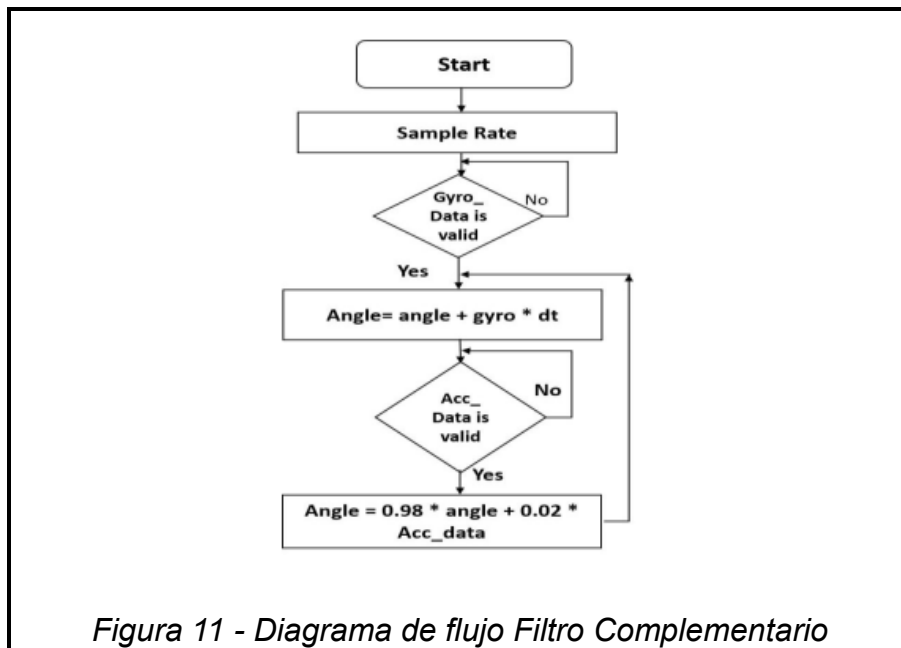
En término de función transferencia podemos escribir el filtro complementario como:

$$CF = \frac{\alpha}{1 + T_S} + \left[\frac{T_S}{S(1 + T_S)} + \frac{1}{S} \right] * \beta$$

El total de ganancia del filtro es de 1.

$$\text{Ganancia1}(S) + \text{Ganancia2}(S) = 1$$

Donde α es igual al dato proporcionado por el acelerómetro $\frac{\beta}{S}$ es igual al ángulo calculado desde el giroscopio, el cual es pasado por un integrador.



2.6.1 Filtro de Kalman

Un filtro de Kalman es una función estadística obtenida a partir de una muestra. Consiste en estimar el estado instantáneo de un sistema dinámico lineal perturbado por un ruido blanco, aleatorio, mediante el uso de medidas linealmente relacionadas con el estado, pero corrompidas por el ruido blanco. Minimiza el error cuadrático medio de un conjunto de

datos para dar la estimación más óptima y fiable de la realidad. Un ruido blanco es aquel que tiende a cero con la evolución del sistema, es decir, se trata de un ruido aleatorio que aparece como resultado de errores en las medidas o en la predicción realizada por el modelo dinámico de las variables del sistema,

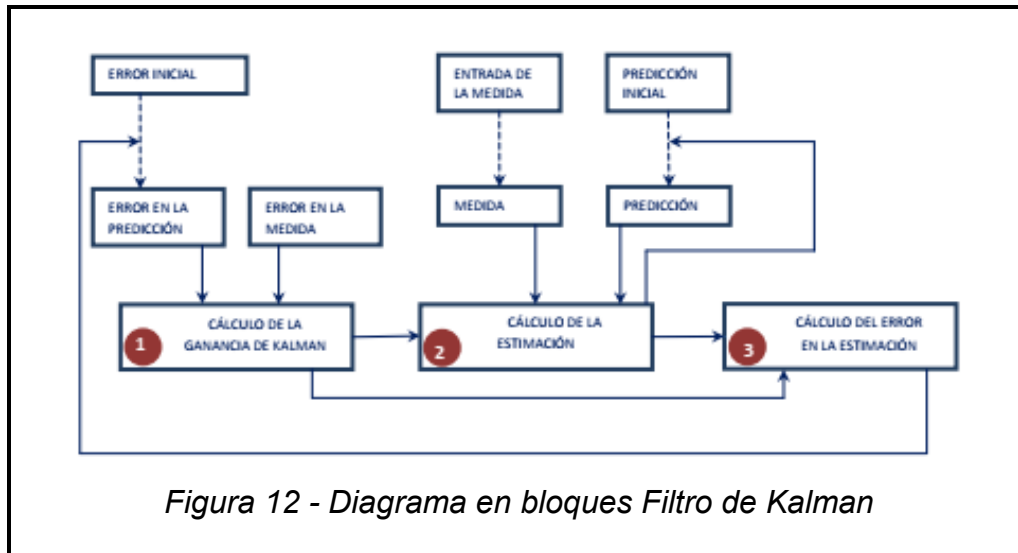


Figura 12 - Diagrama en bloques Filtro de Kalman

En una iteración normal del filtro el primer paso es la predicción, para el instante actual, del valor de la variable de estado, utilizando el modelo dinámico del sistema y en base al valor estimado de la variable (salida del filtro) en la iteración anterior. A continuación, se actualiza el error de la predicción realizada utilizando el error que se obtiene de la salida del filtro como resultado de nuestra estimación. En la primera iteración, al no disponerse de una salida del filtro, se utilizan valores iniciales previamente establecidos.

Por otro lado, el filtro recibe como dato de entrada la medida de la variable, obtenida del sensor, que será almacenada como valor medido. Se actualiza también el error de este último valor medido. Siguen ahora los tres procesos principales en los que se basa el filtro. El primero de ellos será calcular la Ganancia de Kalman que, utilizando los errores calculados, se encarga de ponderar entre la medida y la predicción, según se indica en el cuadro

Con la Ganancia, la predicción de la variable de estado para esta iteración y la medida, se obtiene la salida del filtro, es decir, se estima el valor de la variable de estado. Finalmente, se actualiza el error cometido en el cálculo de esta estimación. Tanto el valor de la estimación como de su error asociado son almacenados para ser utilizados en la siguiente iteración.

Ganancia de Kalman: Su valor oscila entre cero y uno. Su función dentro del filtro es la de dar más importancia al valor medido o al valor estimado mediante la comparación de los errores (E) de cada uno. Se define por el siguiente cociente:

$$K = \frac{E_{ESTIMACION}}{E_{ESTIMACION} + E_{MEDIDA}}; K \in [0,1]$$

Al comienzo del proceso iterativo, el error en la estimación será normalmente elevado respecto al de la medida, porque tanto el error como la estimación se corresponderán con un valor que ha sido inicializado previamente por el programador y que estará alejado de la realidad, o por lo menos, más alejado que la medida. Por esta razón, al ser $E_{MEDIDA} \ll E_{ESTIMACION}$, la Ganancia de Kalman tiende a un valor cercano a uno. Esto significará que el filtro dará más peso a la medida respecto de la estimación. A medida que avanza el proceso, la Ganancia de Kalman tiende a disminuir. En el extremo contrario, cuando su valor sea cercano a cero, significará que $E_{MEDIDA} \gg E_{ESTIMACION}$, lo que indicará que la estimación prevalece sobre la medida denotando la buena estimación del modelo. La rápida convergencia del filtro de Kalman permite que el valor de la ganancia alcance un valor próximo a cero en un número relativamente pequeño de iteraciones. Por esta razón es tan ampliamente utilizado como uno de los mejores métodos estimativos.

Estimación del estado actual: Una vez conocido cuál de los dos valores, si la estimación o la medida, es más fiable, y reflejado en el valor de la Ganancia de Kalman, K , tiene lugar la estimación del estado actual, o lo que es lo mismo, el cálculo de la variable que rige el comportamiento del sistema. Viene definida por la ecuación:

$$EST_{actual} = Prediccion + K[Medida - Prediccion]$$

Es importante volver a incidir en que el filtro de Kalman es un estimador o función estadística y, como tal, realizará el tratamiento de la medida. En este sentido, tratará las medidas como un conjunto de valores de una distribución normal para los cuales minimizará su error cuadrático. No puede, por tanto, mejorar mediciones que se encuentren afectadas por sesgos o errores sistemáticos que no estén dentro del ámbito del ruido blanco. Analizando la ecuación, cuando la Ganancia de Kalman tiende a uno, la salida estará principalmente determinada por la medida. En el otro extremo, cuando la Ganancia de Kalman esté próxima a cero, la salida del filtro, es decir, la estimación, estará fuertemente condicionada por la predicción.

Error en la estimación actual: Es una indicación de cómo de próximos están los valores estimados a los medidos. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{EST_{actual}} = \frac{(E_{ESTIMACION})(E_{PREDICCION})}{(E_{PREDICCION}) + (E_{MEDIDA})}; E_{EST_{actual}} = (1 - K)E_{PREDICCION}$$

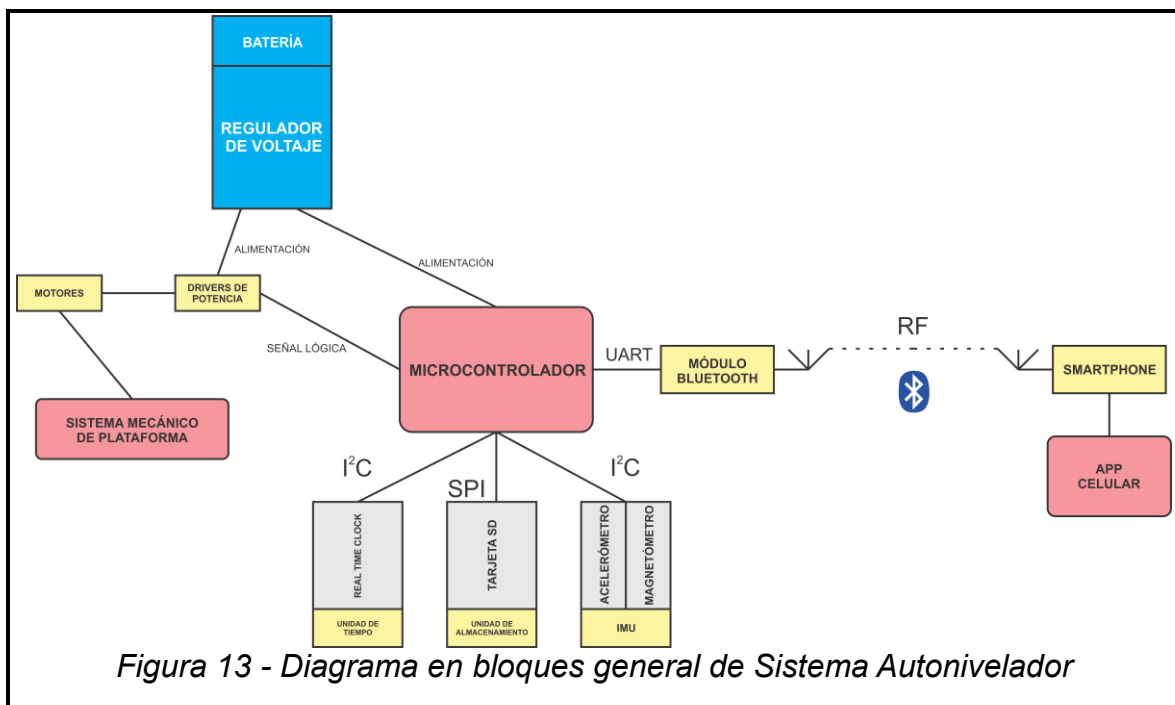
En este caso, cuando la Ganancia de Kalman tiende a uno, el error en la estimación actual va a ser muy pequeño. En efecto, cuando $K = 1$, el filtro considera que el error en la medida es muy pequeño, y el valor que estima es, por tanto, muy cercano a ella. Para la siguiente iteración, conseguirá comparar la medida nueva con un valor de su predicción que, por estar basado en el estado anterior, va a ser también muy próximo a la medida, con lo que K tenderá a cero. Cuando $K = 0$, el error en la medida es muy grande y el valor estimado es muy próximo al valor predicho, por lo que el error actual será el error de la

predicción. Como conclusión, cuando K sea muy grande la estimación se acerca rápidamente al valor medido, mientras que si K es pequeña, la estimación se acercará más lentamente a la medida, lo que se traduce por pequeñas oscilaciones en el entorno de la misma. Es interesante observar que, si bien será muy extraño que K tome valores extremos, el error en la estimación actual siempre será más pequeño que el error en la predicción, que está basado en el error de la estimación anterior, lo que garantiza la convergencia del filtro.

Capítulo 3: Desarrollo

En términos generales, se puede determinar que el sistema en su totalidad consta de tres partes bien definidas.

- Aplicación celular
- Sistema electrónico
 - Sensores
 - Recopilación y procesamiento de datos
 - Sistema de control
 - Sistema de potencia.
- Sistema electromecánico de plataforma

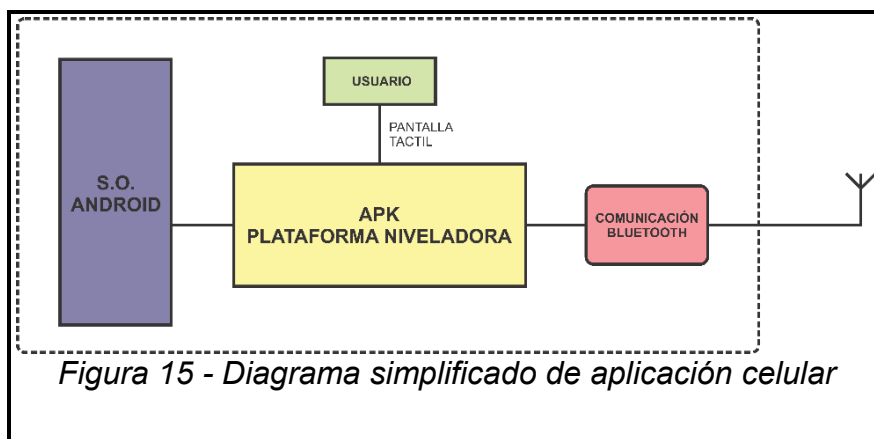


A continuación, se hará un detallado análisis de cada parte y su funcionamiento. Además, se hará hincapié en el criterio de diseño de los mismos.

3.1 Aplicación celular

Esta parte del sistema es la encargada de comandar en su totalidad al sistema nivelador. Posee todas las funciones necesarias para comunicarse con la plataforma, cada acción solicitada por el usuario será enviada al sistema principal, el cual será atendido, procesado y ejecutado. La aplicación está compuesta y diseñada de forma que la misma pueda ser ejecutada desde cualquier Smartphone con sistema operativo Android.

En la figura siguiente se observa un diagrama general de la aplicación celular.



La aplicación celular está desarrollada para ser instalada en la totalidad de los celulares que cuentan con sistema operativo Android. Esto es así ya que fue programada y desarrollada utilizando herramientas nativas del sistema operativo. La misma aprovecha las diferentes funcionalidades del sistema operativo, en conjunto con los diferentes periféricos presentes en el smartphone.

El desarrollo de la aplicación celular fue realizado utilizando herramientas Open Source o de uso libre. Para esto se utilizó herramientas como AppInventor, AndroidStudio e Inkscape.

El conjunto de operaciones y la lógica de funcionamiento de la aplicación con cada una de las acciones que el usuario desea realizar es la siguiente:

- a) Inicio de aplicación seleccionando el icono de la misma
- b) Conectarse con el dispositivo a comandar
- c) Seleccionar acción a realizar
- d) Esperar respuesta del sistema

e) Luego se vuelve al paso c) y se repite la secuencia.

Para el desarrollo de la aplicación en su totalidad se utilizó el entorno de desarrollo visual de aplicaciones AppInventor. El mismo es un servicio web el cual permite el desarrollo de las diferentes aplicaciones y almacenar los mismos. El entorno de programación fue elegido principalmente por su sencillez a la hora de desarrollar aplicaciones. Al ser un entorno grafico de desarrollo permite un rápido aprendizaje. Además, gracias a su amplio rango de utilidades y funcionalidades es posible utilizar casi en su totalidad todos los periféricos y sus funciones que presenta el dispositivo smatphone a utilizar.

A continuación, se presentará un diagrama de flujo de las diferentes acciones y funciones de la aplicación. Cada interacción del usuario con el mismo desplegara diferentes algoritmos que serán ejecutados para realizar la acción solicitada. Cada diagrama de flujo será acompañado por su programación en bloque simplificada en el entorno de programación utilizado. Por último, se visualizará las diferentes ventanas que presenta la aplicación, ubicando cada acción que se va a realizar.

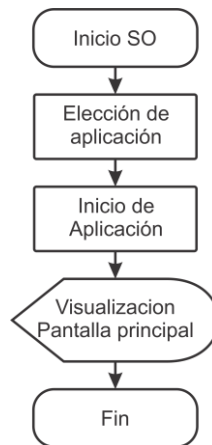
La aplicación presenta 2 pantallas principales:

- Pantalla principal: Esta pantalla presenta las funciones manuales del sistema nivelador. Presenta las diferentes interfaces mediante las cual el usuario es capaz de solicitar un movimiento manual en cada uno de los ejes que presenta la mesa niveladora. Consiste en un menú de navegación en donde se encuentra los diferentes botones y mensajes mediante los cuales el usuario puede interactuar. Además, cuenta con las funciones de conexión con el sistema nivelador.
- Pantalla de funciones: Esta pantalla presenta la interfaz mediante la cual el usuario será capaz de solicitar las acciones automáticas de la plataforma auto niveladora. Cada una de las acciones automáticas solicitadas será acompañada con una respuesta por parte del sistema nivelador, la cual será visualizada en pantalla. El funcionamiento de esta comunicación es compartido entre el sistema nivelador y la aplicación celular.

Cada una de las acciones que se realicen en la interfaz está acompañadas de una pequeña leyenda que explica brevemente su funcionamiento.

3.1.1 Pantalla principal

Es la ventana principal que aparecerá al momento de ser iniciada la aplicación, luego de que el logo del sistema aparezca unos momentos.



Las pantallas visualizadas al momento de iniciar la aplicación son las siguientes:



Figura 16 - Pantalla de inicio aplicación



Figura 17 - Pantalla principal

La pantalla principal de la aplicación como se dijo anteriormente está dotada de una interfaz con la cual el usuario es capaz de solicitar y ejecutar un movimiento manual del sistema nivelador. Funciones manuales del sistema nivelador:

- Movimiento individual y de a pares de cada de los ejes correspondiente al sistema mecánico de la plataforma niveladora.

El movimiento del sistema mecánico de forma manual está pensado y desarrollado para que el usuario sea capaz de poder mover a voluntad la inclinación de la plataforma.

Esto permite, entre otras cosas, poder realizar un ajuste manual del sistema y preparar el mismo para una posición inicial deseada.

Las diferentes funciones de la pantalla principal estas separadas en tres sectores definidos:

- Conectividad
- Comando manual
- Funciones

3.1.2 Conectividad

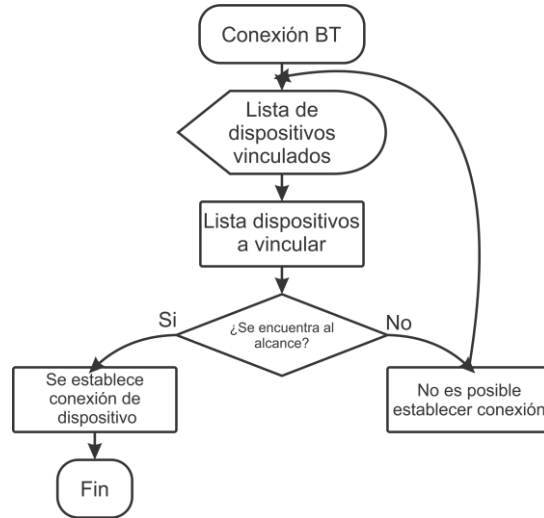


Esta interfaz está compuesta por dos botones. El botón ubicado en la parte izquierda de color verde tiene la función de desplegar y visualizar mediante una lista los diferentes dispositivos Bluetooth que han sido emparejados con el teléfono con anterioridad, además mostrara los dispositivos al alcance con los cuales es posible emparejarse.

Para que los dispositivos transmitan datos entre sí, se establece una sincronización mediante un canal de comunicación. Un dispositivo (el *dispositivo detectable*, en nuestro caso *la plataforma niveladora*) se habilita para recibir solicitudes de conexión entrantes. Nuestro smartphone encuentra el dispositivo detectable mediante un proceso de *detección del servicio*. Después de que el dispositivo detectable acepta la solicitud de sincronización, los dos dispositivos completan un proceso de *conexión* en el que se intercambian claves de seguridad. Ambos dispositivos almacenan estas claves en caché para usarlas posteriormente. Después de que terminan los procesos de sincronización y conexión, los dispositivos intercambian información. Cuando se completa la sesión, el dispositivo que inicializó la solicitud de sincronización libera el canal que usó para la sincronización con el dispositivo detectable. Sin embargo, siempre y cuando estén dentro del rango de alcance y ninguno elimine la conexión, los dos dispositivos permanecen vinculados para poder volver a conectarse automáticamente en una sesión futura.

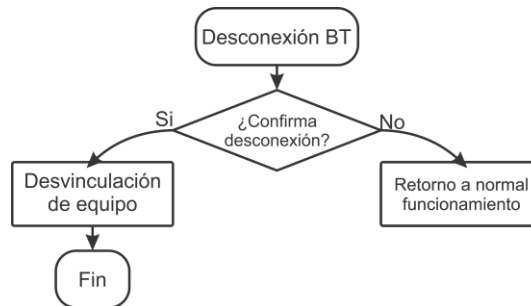
Una vez seleccionado el dispositivo a vincular, se espera a que el dispositivo acepte la sincronización. Si el dispositivo está dentro del rango de alcance y además está activado se concreta la conexión. Una vez hecho esto comienza el proceso de intercambio de información. En caso de que la conexión no sea posible se mostrara una leyenda indicando lo ocurrido. De ser exitosa la conexión, de igual manera, se mostrara una leyenda indicando el éxito de la acción.

Seleccionando el botón “Conexión BT”



El botón ubicado en la parte derecha tiene la función de desemparejar la conexión BT entre el smartphone y la plataforma niveladora. Al ser seleccionado se despliega una advertencia y confirmación de acción.

El diagrama de flujo siguiente indica el procedimiento al seleccionar el botón “Desconexión BT”



3.1.3 Comando manual

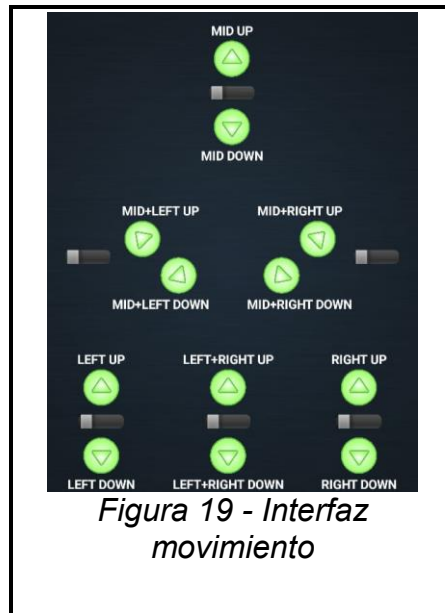


Figura 19 - Interfaz movimiento

El sistema mecánico de la plataforma niveladora este compuesto estructuralmente por 3 ejes. Cada eje está acoplado a un motor proporcionándole movilidad independiente con respecto a los otros dos. Cada uno de los ejes es posible desplazarlo independientemente de forma manual. Esto se logra a través de la interfaz manual de la pantalla principal de la aplicación. En la *Figura N° 19* se muestra en detalle la disposición de la interfaz. La misma está compuesta por dos tipos de botones:

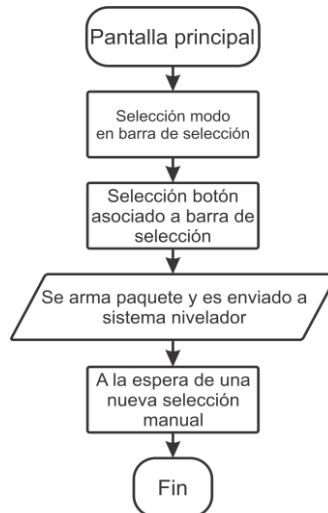
Movimiento individual:

Estos mueven individualmente los motores en base a las peticiones del usuario.

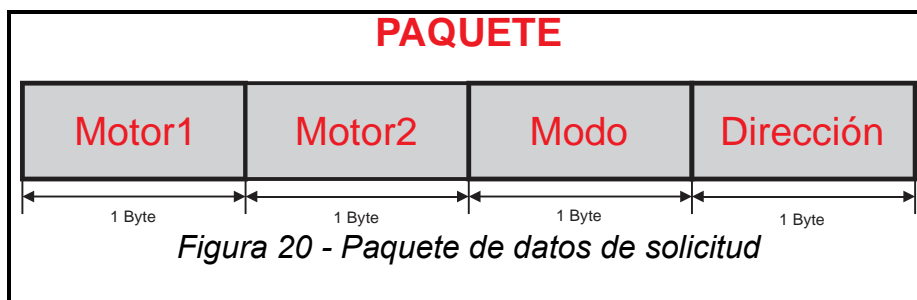
Movimiento a pares:

Estos producen un movimiento manual de los motores de a pares, vinculando dos motores de los tres presentes en el dispositivo.

Cada conjunto de botones tiene asociado de forma independiente una barra de selección, ubicada entre o a los lados de los mismos. Esta barra tiene como función determinar, a criterio del usuario, un ajuste fino en el movimiento ejecutado por la acción solicitada. Los posibles modos a seleccionar son: Bajo, Medio y Alto. En el diagrama siguiente se observa el funcionamiento de una petición por parte del usuario para movimiento individual y de a pares.



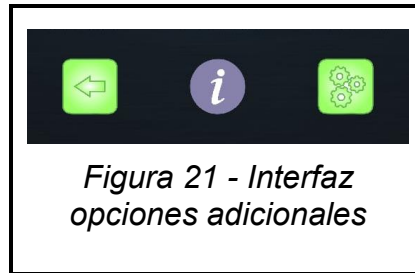
Al momento de seleccionar el botón requerido en la pantalla principal, la aplicación detecta que botón ha sido seleccionado. Una vez detectado, la aplicación se encarga de generar un frame o paquete para ser enviado. La estructura de este paquete es el siguiente:



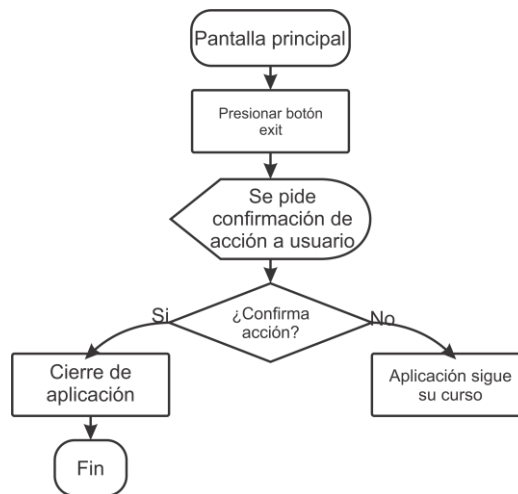
El paquete completo enviado consta de 4 bytes. El mismo posee la información necesaria para realizar la acción solicitada. Esto es:

- 1^{er} Byte - Motor1: corresponde al eje solicitado para desplazar.
- 2^{do} Byte - Motor2: de elegirse un movimiento a pares este byte será enviado con un valor no nulo, correspondiente al segundo eje que se requiere desplazar.
- 3^{er} Byte - Modo: Corresponde a la resolución de movimiento elegida en la barra de selección al momento de seleccionar la acción.
- 4^{to} Byte - Dirección: Corresponde al sentido de giro de los motores de cada eje. Un valor corresponderá a un desplazamiento positivo en el eje, otro corresponderá a un valor negativo.

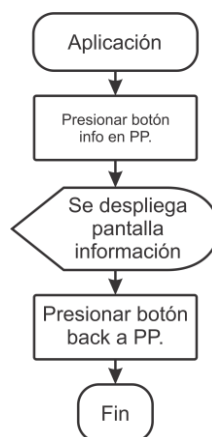
3.1.4 Funciones



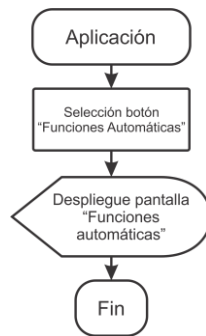
Este sector de la interfaz está compuesto por 3 botones con funciones bien definidas. El elemento ubicado a la izquierda al ser presionado ejecuta un algoritmo que despliega una ventana de confirmación para salir de la aplicación. Se ser afirmativa cierra la aplicación, se ser negativa la aplicación sigue su curso.



El elemento ubicado en la parte central al ser seleccionado desplegará una pantalla de bienvenida, que dará además una breve información de la aplicación. Esta pantalla será la encargada de acercarle al usuario un resumen de las funcionalidades de la aplicación: uso y respuesta de la misma.



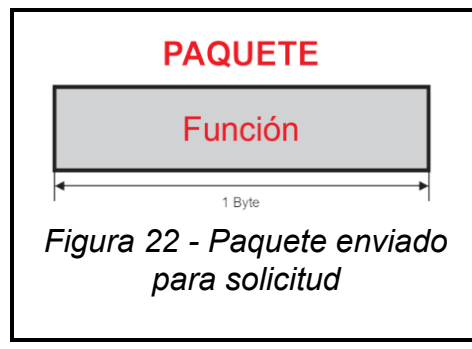
El elemento ubicado en la parte de derecha al ser presionado abrirá la pantalla “Funciones Automáticas” de la aplicación. Esta pantalla poseerá las diferentes funciones automáticas de la plataforma auto nivelada. Cada una de estas funciones posee características diferentes. Una vez que el sistema nivelador las ejecute, en caso de que sea posible, responderá mediante un mensaje correspondiente al estado del dispositivo.



3.1.5 Pantalla Funciones automáticas

Este sector de la aplicación es el encargado de poseer las diferentes funcionalidades automáticas que es capaz de realizar la plataforma auto nivelada. A continuación, se hará una explicación detallada de cada una de ellas.

Cada interfaz al ser seleccionada tiene la función de solicitar una acción a la plataforma mediante el envío de un paquete de datos. Par el caso de la “Pantalla de funciones especiales” la estructura del paquete enviado a través de conexión Bluetooth es la siguiente:



Este paquete tiene la dimensión de 1 Byte. Cada una de las funciones automáticas tiene asociado un valor codificado de esta dimensión el cual es decodificado por el equipo nivelador al momento de recibirlo.

La comunicación entre el sistema nivelador y la aplicación se realiza mediante comunicación Bluetooth. Esta tecnología inalámbrica de comunicación se eligió ya que los dispositivos Smartphones en su totalidad cuentan con esta característica. La aplicación está desarrollada utilizando herramientas nativas del sistema operativo, permitiendo así la compatibilidad con todos los dispositivos que presentan sistema operativo Android con el equipo nivelador.



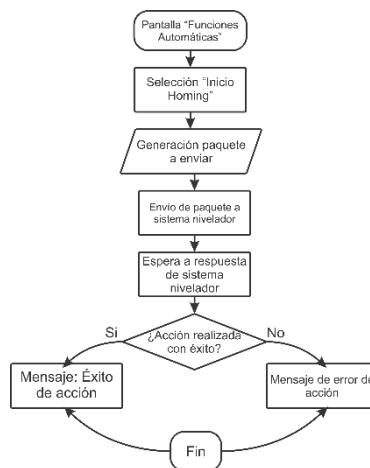
Figura 23 - Pantalla funciones automáticas

3.1.6 Función verificación de suelo

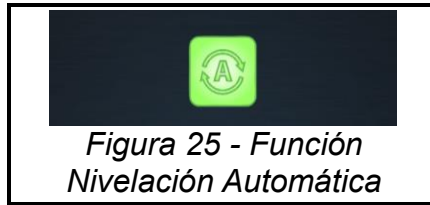


Figura 24 - Función Homing

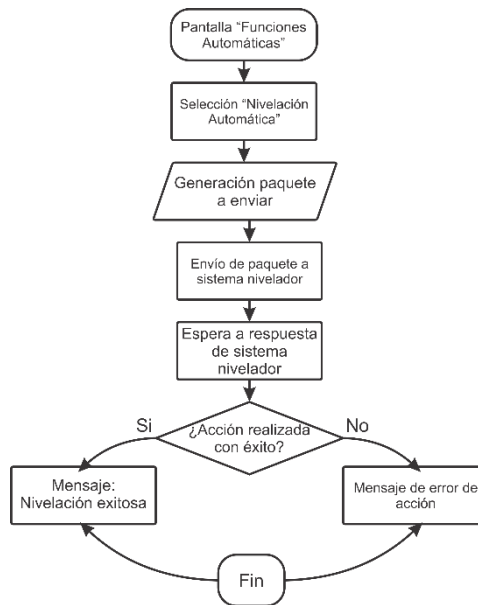
La interfaz presentada en la *Figura N. ° 24* es la encargada de iniciar el ciclo de homing por parte de la plataforma niveladora. Esta función tiene como objetivo colocar al sistema nivelador en su condición inicial a partir del cual se realizan los cálculos de la inclinación presente en la plataforma.



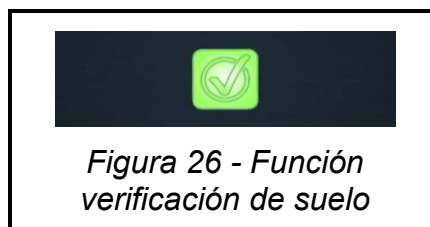
3.1.7 Función nivelación automática



La interfaz presentada en la *Figura N. ° 25* es la encargada de solicitar una nivelación automática. Seleccionando esta opción se arma un paquete de solicitud en base a la disposición de la *Figura N. ° 23* con su código correspondiente. Luego, este es enviado hacia el equipo nivelador. Una vez procesada la solicitud por parte del sistema nivelador, este envía una respuesta al teléfono inteligente informando del estado de la acción.

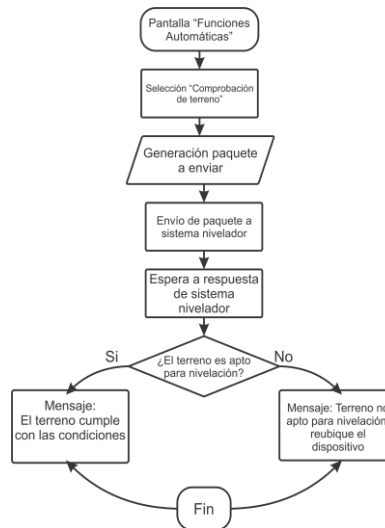


3.1.8 Función verificación de suelo

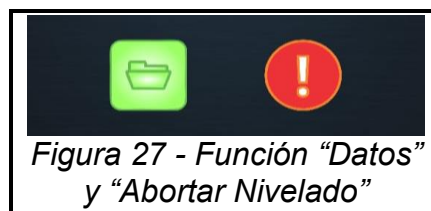


La interfaz presentada en la *Figura N. ° 26* es la encargada de solicitar una comprobación de nivel de suelo. La función de esta acción es la de comprobar si el lugar en donde es colocado el dispositivo nivelador cumple con los límites establecidos para realizar una correcta prueba. Seleccionando esta opción se arma un paquete de solicitud en base a la disposición de la *Figura N. ° 23* con su código correspondiente. Luego, este es

enviado hacia el equipo. Una vez procesada la solicitud por parte del sistema nivelador, este envía una respuesta al teléfono inteligente informando si el lugar en donde se colocó el dispositivo cumple con las condiciones necesarias, o si el mismo presenta un desnivel pronunciado en una dirección en particular y es necesario se reubicado.

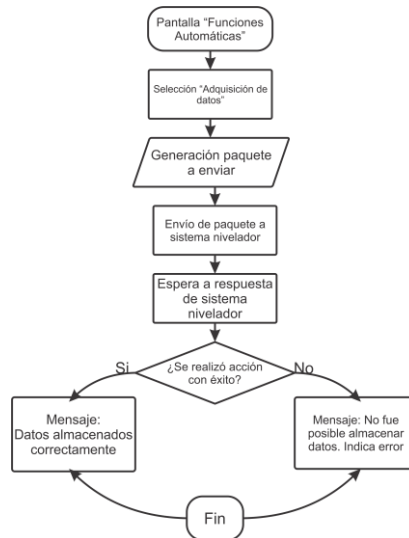


3.1.9 Función Datos

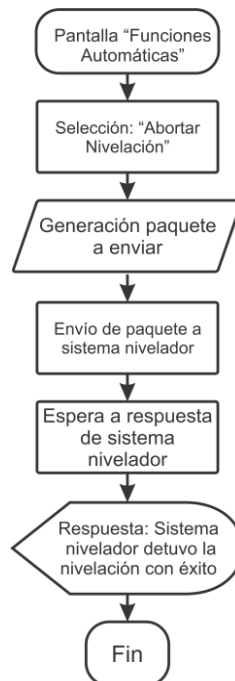


La interfaz presentada en la *Figura N. ° 26* es la encargada de solicitar la toma de datos de temperatura correspondientes a la ubicación de la plataforma niveladora. Una vez realizada la toma de datos es almacenada en una unidad de almacenamiento extraíble, ubicada en la plataforma niveladora, en un archivo **"data.txt"**, conjuntamente con los datos de fecha y hora de la medición. Posteriormente estos datos serán evaluados por el usuario.

Seleccionando esta opción se arma un paquete de solicitud en base a la disposición de la *Figura N. ° 23* con su código correspondiente. Luego, este es enviado hacia el equipo. Una vez procesada la solicitud por parte del sistema nivelador, este envía una respuesta al teléfono inteligente informando la correcta adquisición de datos y su correcto almacenamiento. En caso de no producirse con éxito la acción solicitada, esto será informado al usuario mediante una leyenda en la pantalla de la aplicación indicando el error producido.

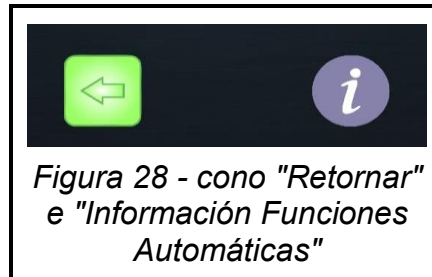


3.1.10 Función abortar



Esta interfaz tiene como finalidad abortar la nivelación en curso que se esté realizando. Si el usuario necesita por alguna razón detener la nivelación, esto es posible realizarlo mediante la utilización de este botón. Una vez presionado, automáticamente se enviará un paquete de correspondiente a la solicitud de “Abortar nivelación”. El dispositivo nivelador detendrá su nivelación y posteriormente enviará a la aplicación celular el éxito de la acción

3.1.11 Información funciones automáticas



Seleccionando el ícono de información se desplegará una pantalla informativa en donde se dará una pequeña descripción de cada una de las funciones automáticas de la plataforma. La pantalla desplegada es la siguiente:

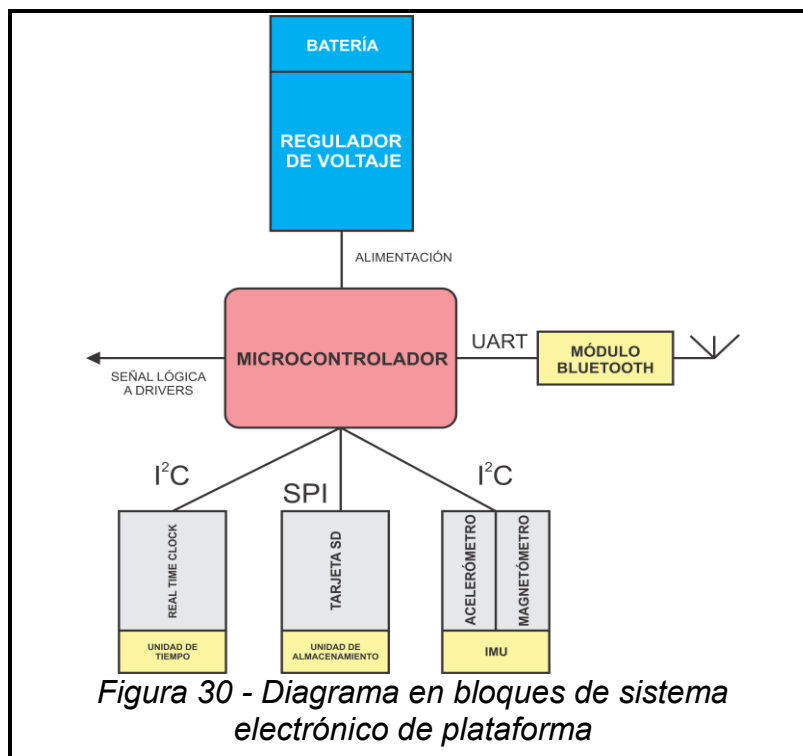
El icono de flecha en la parte inferior central retorna a la pantalla anterior.

3.2 Sistema Electrónico

Es la parte central de dispositivo nivelador. Es el encargado de comandar y gestionar los diferentes periféricos que conforman el sistema nivelador. Todos los datos enviados por los diferentes periféricos son procesados en esta unidad. Los datos sensados y adquiridos por parte de la unidad de medición inercial, IMU, son enviados al microcontrolador el cual es el encargado de adaptar, filtrar y calcular el desnivel en tiempo real presente en la plataforma. Una vez obtenido el resultado de la inclinación sobre cada uno de los ejes es el encargado de calcular el desplazamiento preciso de cada uno de los motores que están acoplados a cada eje de la plataforma, generando las señales lógicas que serán enviadas a los drivers de potencia que alimentan dichos motores. El sistema microcontrolador tiene la función de gestionar la comunicación inalámbrica de la plataforma: recibe los paquetes de datos provenientes de la aplicación celular, los decodifica, ejecuta la acción solicitada y responde mediante un mensaje, en caso de ser necesario.

Un sensor de temperatura, un reloj de tiempo real y una unidad de almacenamiento no volátil complementan el dispositivo. Estos últimos utilizados para las funciones registro de variables de campo.

En el diagrama siguiente se observa cada parte que conforma el sistema electrónico principal.



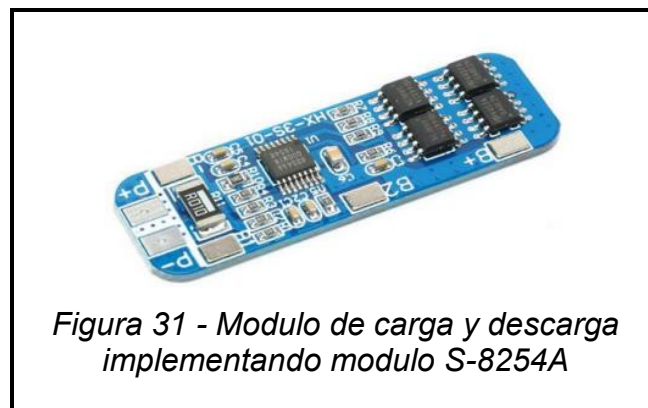
Todo este sistema descrito se encuentra encapsulado en un alojamiento que lo protege de la intemperie.

En base a la configuración del sistema descrita en la *Figura N. ° 27*, la lógica de funcionamiento de sistema es la siguiente:

- a) El microcontrolador al ser energizado, inicializa los diferentes periféricos conectados al mismo: IMU (Unidad de Medición Inercial), Sensor de temperatura, Unidad de Almacenamiento, Unidad de Tiempo (Real time Clock), Modulo Bluetooth.
- b) En caso de generarse algún tipo de error al inicializarse los mismos, el sistema generara las alarmas correspondientes y notificara al usuario.
- c) El microcontrolador queda a la espera de que el usuario establezca conexión con el dispositivo de forma inalámbrica. Al establecerse el enlace, se notifica el éxito o no del mismo.
- d) Una vez enlazada la comunicación entre el sistema y el usuario, el microcontrolador queda a la espera de que este último envíe un comando para ser ejecutado.
- e) Una vez recibido un comando solicitado por el usuario, este es decodificado e interpretado por el sistema. Una vez hecho esto último, el mismo es ejecutado.
- f) En caso de ser un comando especial el que se solicita, una vez que el mismo es ejecutado correctamente, el sistema notifica al usuario el éxito del mismo.

3.2.1. Alimentación

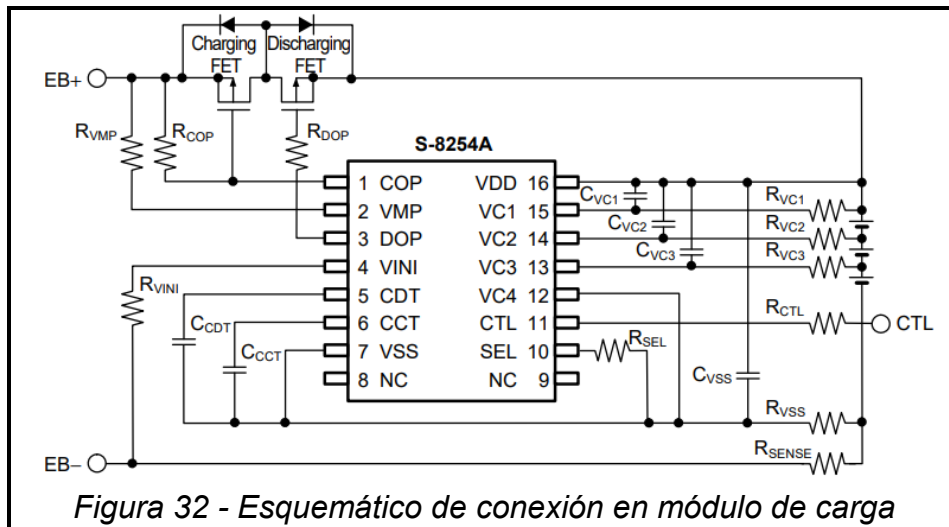
La alimentación de todo el sistema se hace mediante un banco de baterías implementando un arreglo de baterías 18650 de 3,7[V] de 2200 [mAh]. Para la carga y descarga del mismo se implementa un módulo cargador de baterías comercial que tiene la capacidad de proporcionar protección al momento de la carga y descarga de las mismas.



Las características del mismo son:

- Detección de sobre voltaje: 3.9~4.35 [V] ± 0.05 [V].
- Detección de sobre voltaje de descarga: 2.3~3.0 [V] ± 0.05 [V].
- Máxima corriente de operación: 6~8[A].
- Voltaje de carga: 12.6 [V] ~ 13[V].

- Protección contra cortocircuito

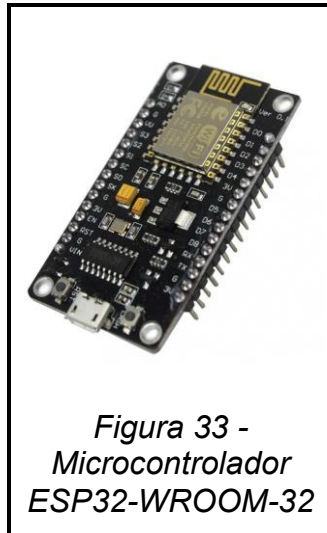


3.2.2 Regulador de voltaje

Para la alimentación lógica de la placa principal se eligió utilizar un regulador lineal comercial LM7805 cuya salida de 5 [V] permite alimentar todo el sistema de forma estable.

3.2.3 Microcontrolador

El microcontrolador encargado de gestionar los periféricos del sistema, realizar las lecturas analógicas de los sensores, gestionar la comunicacional con el usuario e implementar la lógica de control encargada de comandar el sistema electromecánico de la plataforma es el ESP32-WROOM-32. El mismo está montado sobre una placa de desarrollo que permite su montaje en diferentes sistemas electrónicos permitiendo una simple implementación. Dicha placa de desarrollo cuenta con los periféricos que el microcontrolador necesita para su correcto funcionamiento, como así también un regulador de voltaje que adapta internamente la alimentación del micro y un conversor serie-USB que permite su programación y comunicación serial.



*Figura 33 -
 Microcontrolador
 ESP32-WROOM-32*

- Tensión de alimentación : 4.8 [V] ~ 10.3[V]
- Memoria de programa 448 [Kbytes], SRAM de 520 [Kbytes]
- Interfaces de comunicación I2C y SPI
- Comunicación WIFI y Bluetooth
- La frecuencia máxima

3.2.4 Interfaz SPI

El microcontrolador posee 2 interfaces SPI. La interfaz SPI-1, es utilizada para configurar y acceder a la memoria no volátil.

3.2.5 Interfaz I2C

El microcontrolador posee una interfaz I2C el cual es configurado para que el microcontrolador funcione como maestro, comandando los dos periféricos conectados a este puerto, estos últimos funcionando como esclavos:

- Real Time Clock: Encargado de mantener energizado el reloj de tiempo real del sistema y aportar la escala de tiempo necesaria para llevar el control de las acciones realizadas.
- IMU: Unidad de medición inercial encargada de captar la inclinación presente en la plataforma. Esta inclinación es enviada al microcontrolador en base a los datos captados por el giroscopio y acelerómetro del periférico.

3.2.6 Unidad de medición inercial IMU-6050

Es un circuito integrado encargado de medir la inclinación y movimiento que presenta la plataforma.

La evolución de la tecnología ha permitido desarrollar acelerómetros y giróscopos MEMS (Sistemas Micro Electromecánicos). Estos presentan bajo ruido y un alto ancho de banda. Su tamaño reducido, su bajo costo y alta performance los hace especial para su utilización en diferentes campos.

Los componentes MEMS se presentan en encapsulado tipo LGA, que debido a su tamaño, resulta difícil su implementación y soldado. Por esta razón, en su mayoría vienen implementados en placas de desarrollo, junto con diferentes componentes externos que adaptan la señal de alimentación y la comunicación con ese dispositivo.

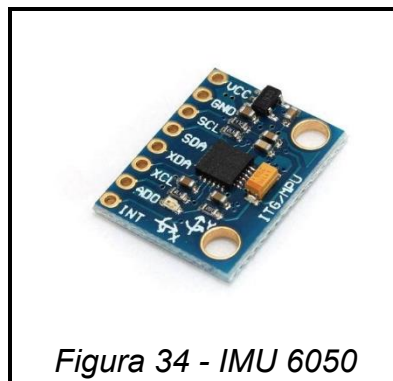


Figura 34 - IMU 6050

En este proyecto, se decidió utilizar el integrado IMU6050 fabricado por la empresa InvenSense el cual está compuesto por un acelerómetro y un giróscopo en un mismo encapsulado, los dos con un grado de libertad de 3 ejes. Además, presenta en la misma placa un procesador digital de movimiento (DMP) encargado de procesar los complejos algoritmos para el cálculo de movimiento de cada uno de los sensores.

Características principales:

- Tensión de alimentación: 2,5 [V] a 6 [V]
- Corriente normal de consumo acelerómetro: 500 [uA]
- Corriente normal de consumo giróscopo: 3,6[mA]
- Interfaz de salida digital: I2C
- Salida de datos de 16 bit para cada eje de los sensores.
- Escala seleccionable de acelerómetro: $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$
- Escala giroscopio: $\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \text{ y } \pm 2000^\circ/\text{sec}$
- Interrupciones programables para detección de movimiento
- Comunicación I2C hasta 400 [Khz]
- Condición de temperatura: -40°C to $+85^\circ\text{C}$

Para la configuración y adquisición de los valores de los sensores se utiliza la interfaz serial I2C. Para configuración del sensor de movimiento, se establecen los siguientes registros con sus valores:

Registro SMPRT_DIV:

SMPRT_DIV							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
SMPLRT_DIV[7:0]							
0	0	0	0	0	1	1	1

Donde:

- **SMPLRT_DIV [7:0]:** La frecuencia de muestreo es determinado dividiendo la frecuencia de salida del giróscopo por el valor en bit ingresado en este registro. Donde la frecuencia de salida del giróscopo es 8 [Khz].

Teniendo en cuenta la formula proporcionada por el datasheet del integrado tenemos:

$$\begin{aligned}
 \text{Frecuencia de muestreo} &= \text{Frecuencia de salida de giróscopo} / (1 + \text{SMPLRT_DIV}) \\
 &= 8 \text{ [KHz]} / (1 + 7) \\
 &= 1 \text{ [KHz]}
 \end{aligned}$$

Registro CONFIG:

SMPRT_DIV							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
-	-	EXT_SYNC_SET[2:0]			DLPF_CFG[2:0]		
-	-	0	0	0	0	0	0

Donde:

- **EXT_SYNC_SET [2:0]:** Se puede muestrear una señal externa conectada al pin FSYNC configurando EXT_SYNC_SET. En este caso se deshabilita.
- **DLPF_CFG [2:0]:** Configura el filtro digital pasa bajo aplicado al acelerómetro y giróscopo. Teniendo como resultado una frecuencia de corte $F_c = 260$ [Hz] para el acelerómetro y una frecuencia de corte $F_c = 256$ [Hz] para es giroscopo

Registro GYRO_CONFIG:

GYRO_CONFIG							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
XG_ST	YG_ST	ZG_ST	FS_SEL[1:0]		-	-	-
-	-	0	0	0	0	0	0

Donde:

- **XG_ST, YG_ST y ZG_ST:** configurando estos bits causa una autocomprobación en los ejes X, Y y Z del giróscopo respectivamente. En nuestro caso la autocomprobación es desactivada.
- **FS_SEL [1:0]:** Configura el rango de escala del giróscopo. En nuestro caso se configura en ± 250 [°/s]

Registro: ACCEL_CONFIG:

ACCEL_CONFIG							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
XA_ST	YA_ST	ZA_ST	AFS_SEL[1:0]	-	-	-	-
-	-	0	0	0	0	0	0

Donde:

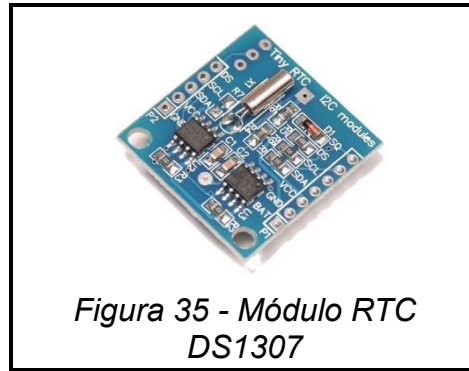
- **XA_ST, YA_ST y ZA_ST:** configurando estos bits causa una autocomprobación en los ejes X, Y y Z del acelerómetro respectivamente. En nuestro caso la autocomprobación es desactivada.
- Configura el rango de escala del acelerómetro. En nuestro caso se configura en ± 2 [g]

3.2.7 Real Time Clock (RTC)

El sistema cuenta con la implementación de un datalogger mediante el cual se registran los diferentes eventos que se realizan en el dispositivo. Ya que es requisito de diseño que los datos estén acompañados de una fecha y hora exactas para un posterior análisis ordenado de los datos, se implementó un módulo comercial RTC.

El módulo utilizado es el DS1307N+. Entre las diferentes características que este dispositivo posee, se destaca:

- Rango de temperatura -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$
- Voltaje de alimentación: 4,5[V] a 5,5[V]
- Voltaje de batería: 2[V] a 3,5[V]
- Corriente máxima de consumo: 1,5[mA]
- Comunicación bidireccional I2C
- Frecuencia de clock de comunicación máxima: 100 [Khz]



Para mantener el funcionamiento y preservar el calendario/reloj en caso de ausencia de alimentación general, se ha conectado una pila estándar de litio CR2032 de 3,3 [V].

Para la configuración y adquisición de los valores del RTC se utiliza la interfaz serial I2C. Para la configuración de su funcionamiento, se establecen los siguientes registros con sus valores:

Registro CONTROL REGISTER:

CONTROL REGISTER							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS2
0	-	-	0	-	-	0	0

Donde:

- **OUT:** Este bit controla el valor lógico de la salida en el pin SQW/OUT, cuando la salida de onda cuadrada por este último pin es deshabilitada. Se establece salida en estado bajo en pin SQW/OUT.
- **SQWE:** Este bit al ser 1 habilita la salida de oscilador por el pin SQW/OUT. Se establece deshabilitado
- **RS1 y RS0:** Establecen la frecuencia de salida del oscilador por pin SQW/OUT. Al ser deshabilitado es indiferente.

HOURS REGISTER							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	12/24	10h/PMAM	10h	HOURS			
0	0	0	0	0	0	0	0

Este registro es utilizado para configurar el modo horario entre 24hs o AM-PM.

Donde:

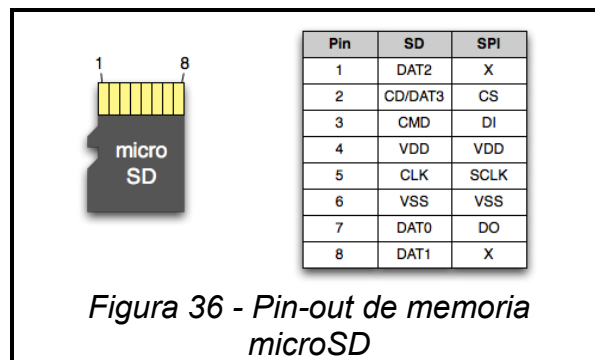
- **12/24 bit:** Establece el modo horario. Se establece nivel lógico 0 equivalente a modo horario 24hs.
- **10h/PMAM:** Al establecer modo horario 24 hs, este es el segundo 10-hours bit (20-23hs)

3.2.8 Memoria no volátil SD

Se hará uso de una memoria no volátil como medio de almacenamiento de los diferentes archivos a utilizar.

El sistema tiene la función de administrar un archivo LOG.txt en donde el usuario será capaz de visualizar información relevante a las mediciones y acciones realizadas con el dispositivo. Cada acción será registrada acompañada de fecha y hora en la cual se realizó. Esto último permite un registro ordenado al momento de visualizar la información.

Para esto se utilizó una memoria microSD, las cuales pueden ser alimentadas con una tensión de 2.7 [V] a 3.6 [V]. Las mismas están compuestas por chips de memoria flash como medio de almacenamiento y un microcontrolador que gestiona los recursos y acciones a realizar.



Para la implementación de la tarjeta microSD se utilizó un módulo comercial adaptador de lectura y escritura de la marca CATALEX. Este dispositivo permite una simple implementación de una memoria microSD.



Entre sus características se destaca:

- Tensión de alimentación: 4.5[V] a 5.5[V]
- Corriente de consumo nominal: 80 [mA]
- Interfaz de comunicación SPI

Para la comunicación e inicialización de la tarjeta de memoria se utiliza la interfaz SPI del microcontrolador. El microcontrolador utilizado posee dos interfaces SPI: VSPI y HSPI.

En este caso se utilizó la interfaz VSPI:

SPI	MOSI	MISO	CLK	CS
VSPI	GPIO 23	GPIO 19	GPIO 18	GPIO 5

Tabla 7: Conexión módulo SD a microcontrolador

Al inicializar la tarjeta de memoria se hace una comprobación de existencia de archivo LOG.txt. En caso de que este no sea existente, es creado. En cada operación de lectura escritura esta comprobación es realizada. En caso de que no sea posible la lectura o escritura en el archivo LOG.txt se generará el mensaje correspondiente y se lo notificará al usuario.

El formato de la información almacenada en el archivo tendrá el siguiente formato.

<i>DD/MM/AA_HH-MM-ss:ACCION_ESTADOACCION</i>
--

Tabla 8: Formato datos almacenados en memoria microSD

3.2.9 Desarrollo de software

En los párrafos siguientes se explicará el código que conforma el algoritmo principal del microcontrolador. Este algoritmo está separado en 4 partes: Inicialización, Recepción de datos, Ejecución de tareas, y Transmisión de Respuesta

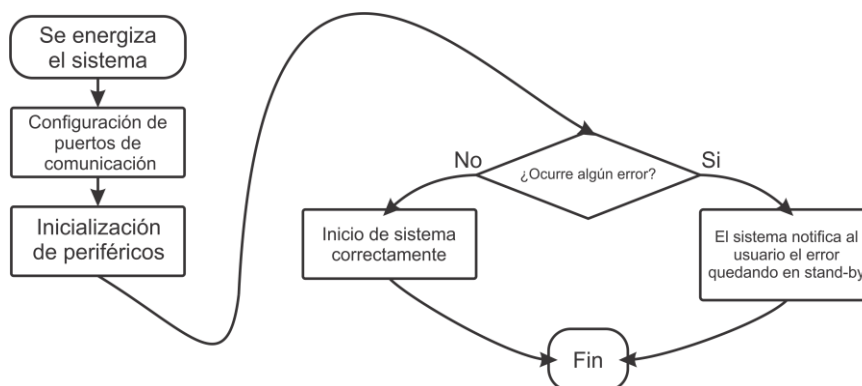
3.2.9.1 Inicialización de software

El dispositivo nivelador al ser energizado inicializa una rutina con la cual se comprueba los diferentes periféricos conectados al microcontrolador principal.

El proceso de inicialización es el siguiente:

- Configura los diferentes puertos de comunicación: I2C y SPI.
- Inicializa los diferentes periféricos conectados al sistema (*Real Time Clock, Memoria no volátil y Unidad de Medición Inercial*) y comprueba su funcionamiento. En caso de un mal funcionamiento se genera una alarma y se notifica el usuario. Esto puede generarse por una mal conexión o falla en el periférico
- Se inicializan las diferentes variables utilizadas en el sistema para almacenar los datos provenientes de los sensores. Estas variables serán las encargadas de almacenar los datos provenientes del giróscopo y acelerómetro de la IMU, las cuales posteriormente serán procesadas con un filtro de Kalman implementado.
- Se inicializa la conexión Bluetooth, quedando a la espera del emparejamiento con el dispositivo por parte del usuario.

A continuación se pondrá como ejemplo un diagrama de flujo detallando el camino de información dentro del programa principal al momento de inicializar:

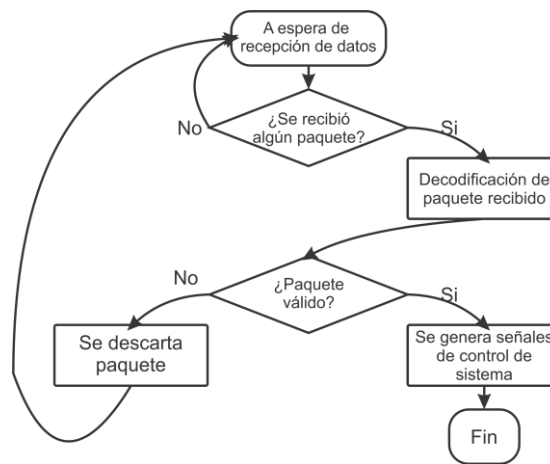


3.2.9.2 Recepción de datos

Una vez que el usuario es emparejado con el sistema a través de la conexión Bluetooth, el sistema queda a la espera de recepción de un paquete de datos con las estructuras mostradas en la *Figura N. ° 20*, correspondiente a un comando manual, y *Figura N. ° 23*, correspondiente a un comando automático. En caso de que el comando recibido sea incorrecto, este es anulado y desestimado.

El proceso de recepción de datos en el siguiente:

- El sistema una vez emparejado con el dispositivo celular del usuario a través de Bluetooth, queda a la espera de un comando manual o automático.
- Al ser recibido, este es decodificado generando las señales y comandos correspondientes a la acción a realizar.

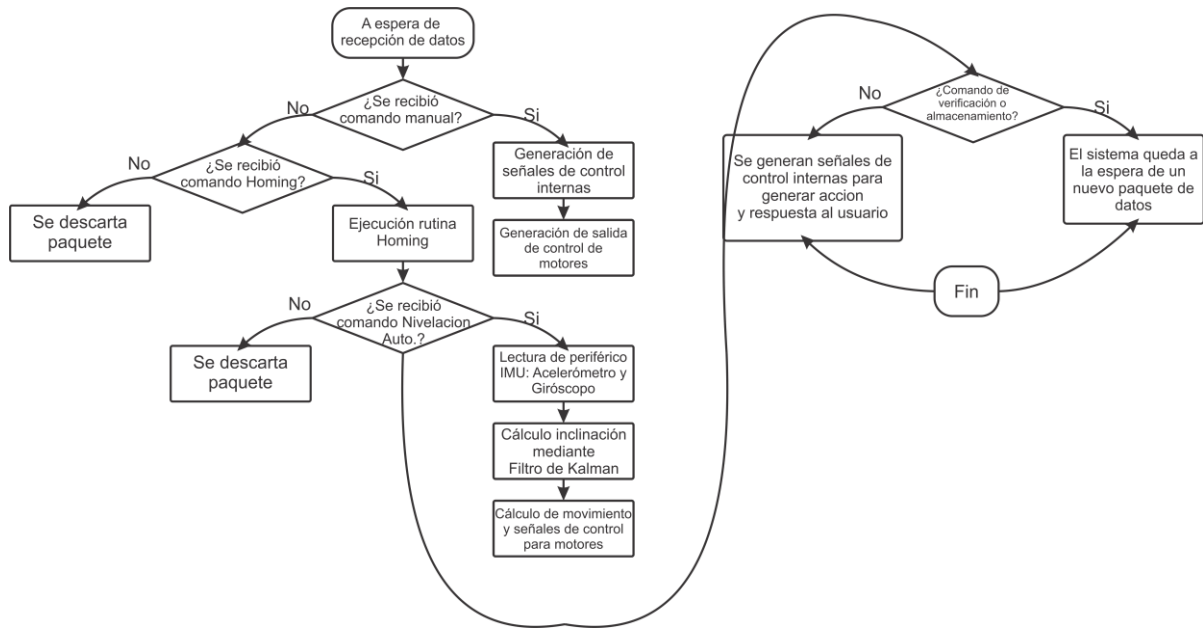


3.2.9.3 Ejecución de tareas

Una vez decodificada la trama de datos recibida, el sistema generará las señales correspondientes al comando recibido. Si es un comando manual generará las señales de control que se encargarán de comandar los motores seleccionados de la plataforma. De ser un comando automático el sistema se encargará de generar las señales de control de los diferentes periféricos hasta que las condiciones de finalización de acción sean alcanzadas correctamente.

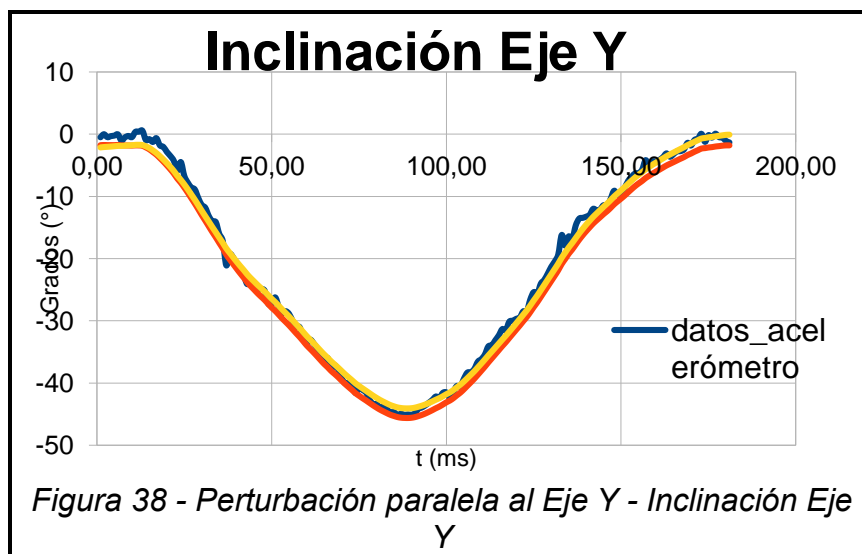
El proceso de ejecución de tareas es el siguiente:

- Una vez decodificado el comando solicitado, se generan internamente las señales correspondientes para realizarlo.
- Si el comando recibido es manual, se generan automáticamente las señales para comandar la plataforma.
- Si el comando es automático, el sistema trabajará internamente comandando los diferentes periféricos y generando las señales de control encargadas de comandar los motores que conforman la plataforma. En este caso una vez finalizada la acción se le notificará al usuario.



3.2.9.4 Respuesta de cálculo inclinación acelerómetro, FC y FK

A continuación se hace una comparación entre las diferentes respuestas de estabilización del sistema en base a los datos obtenidos de diferentes maneras: inclinación obtenida utilizando solo el acelerómetro del dispositivo IMU, y las dos variantes de filtros digitales analizadas en la sección 2.5: Filtro Complementario y Filtro de Kalman. Para esto se realizó una perturbación vertical, paralela al Eje Y y una perturbación horizontal, paralela al Eje X, de la plataforma. Se tomó un total de 180 muestras de los datos obtenidos a partir de las 3 respuestas antes mencionadas. En los siguientes gráficos se observará las tres respuestas obtenidas y su comparación.



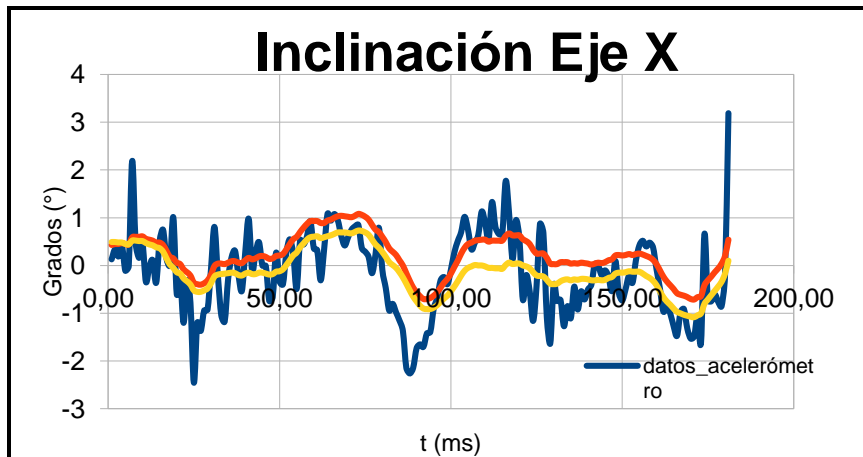


Figura 39 - Perturbación paralela a Eje X - Inclinación Eje

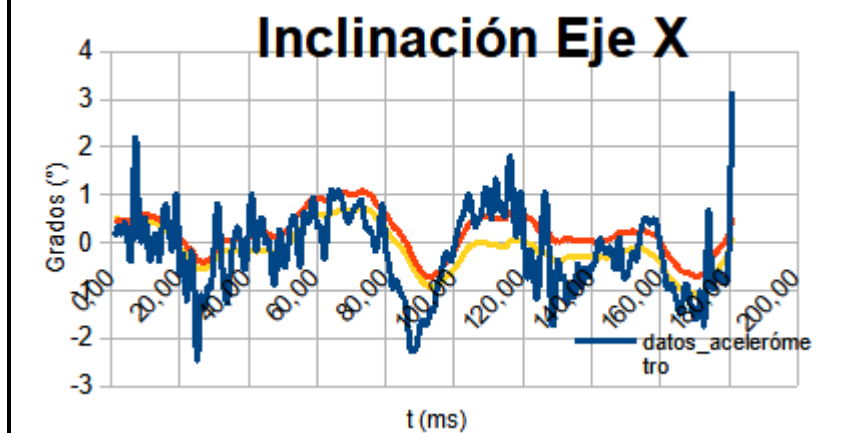


Figura 40 - Perturbación paralela a eje Y - Inclinación Eje X

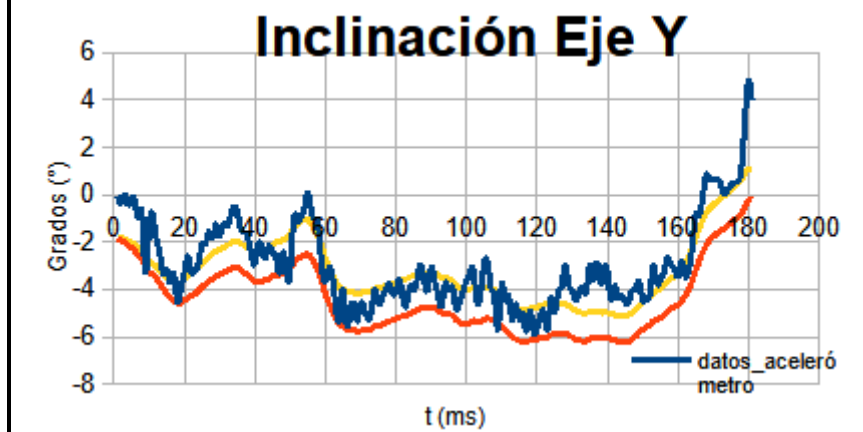


Figura 41 - Perturbación paralela a Eje X - Inclinación Eje Y

Para el cálculo de la inclinación derivada solamente de los datos proporcionados por el acelerómetro del dispositivo IMU, se implementa los datos arrojados por este último y se calcula la inclinación utilizando la siguiente fórmula:

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right)$$

$$\theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}} \right)$$

Figura 42 - Inclinación obtenida de acelerómetro

Ambos datos corresponden a las inclinaciones, en grados, en cada uno de los ejes.

Para el caso de la implementación del filtro complementario, son utilizados los datos arrojados por el acelerómetro y giróscopo de cada uno de los 3 ejes. Posteriormente, se calcula la inclinación, tanto para el Eje X y Eje Y, siguiendo el siguiente diagrama de flujo mostrado en la *Figura N. ° 10*.

Por último, para el cálculo de la inclinación utilizando el FK se utilizan los datos provenientes del acelerómetro y giróscopo. Teniendo estos datos, se aplica un algoritmo recursivo mediante el cual es posible calcular la Ganancia de Kalman (GK), en la Estimación de Kalman (EK) y el Error de la Estimación (EE), vistos en la *Figura N.° 11*, necesarios para la implementación del filtro.

Teniendo esto, es posible resaltar varios puntos importantes que se observan en las gráficas anteriores:

- Las gráficas correspondientes a la respuesta utilizando las formulas de la *Figura N. ° 36*, de color azul en cada una de las gráficas, presenta perturbaciones debido al ruido presente.
- Las gráficas correspondientes a la respuesta utilizando el FC, de color rojo en cada una de ellas, presenta una gran mejora con respecto al anterior. Esto es debido a los filtros PB y PA utilizados en los datos del acelerómetro y giróscopo, respectivamente.
- Las gráficas correspondientes a la respuesta utilizando el FK, de color naranja en cada una de ellas, presenta una mejora aún más notoria que el caso anterior. Esto se debe a dos razones principales: Además de utilizar los filtros PB y PA, como es el caso del filtro complementario, utilizando la GK, la EK y el EE se obtiene una respuesta mucho más rápida gracias a la estimación calculada del filtro.

En base a lo anterior, se decidió utilizar para este proyecto la implementación del FK. Si bien su uso requiere un poder de cálculo mayor, a diferencia del FC, el microcontrolador utilizado es capaz de soportarlo gracias a la frecuencia de ejecución de sus instrucciones.

3.2.9.5 Transmisión de Respuesta

Una vez que el sistema realice con éxito el comando automático solicitado por el usuario, será enviada una respuesta. Esta respuesta será visualizada en el dispositivo mediante el cual el usuario haga uso de la plataforma. Las respuestas por parte del sistema pueden ser

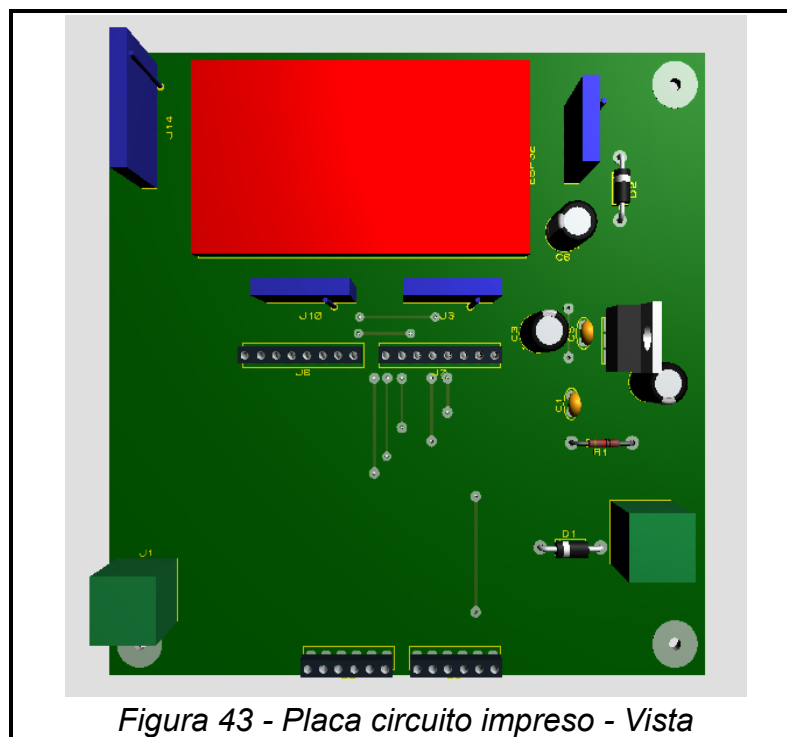
de 2 tipos: Notificación de éxito de acción solicitada, información al usuario sobre estado del equipo.

El proceso de transmisión de respuesta es el siguiente:

- De realizarse con éxito la acción solicitada por el usuario, el sistema genera la trama correspondiente a la respuesta que será enviada notificando el éxito de la misma.
- En caso de ser una solicitud de estado, el sistema evaluará los diferentes periféricos de la plataforma y generará una respuesta al usuario.

3.3.3 Placa de circuito impreso

Ya que la placa no presentaba requisitos de diseño, no se presentaron restricciones de tamaño de la misma y de componentes a utilizar. Por esta razón se utilizaron componentes through-hole. Esta placa integra: los componentes correspondientes a la fuente reguladora de voltaje que alimenta todo el sistema, el microcontrolador que comanda todo el sistema nivelador y genera las señales de control de los elementos electromecánicos del sistema y la parte de potencia que se encarga de alimentar los motores de la plataforma. El tamaño final de la placa resulto de 100x100 [mm].



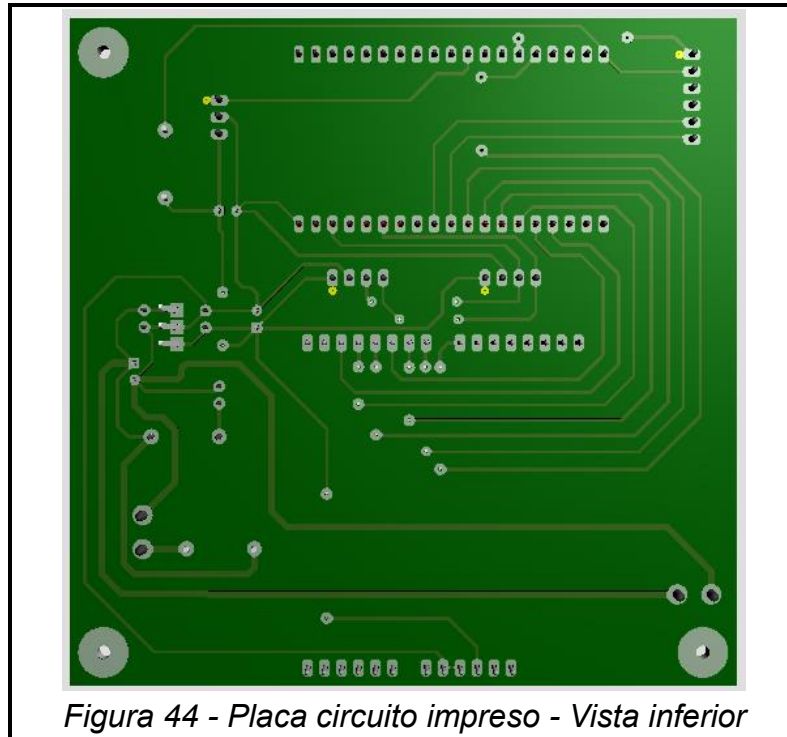
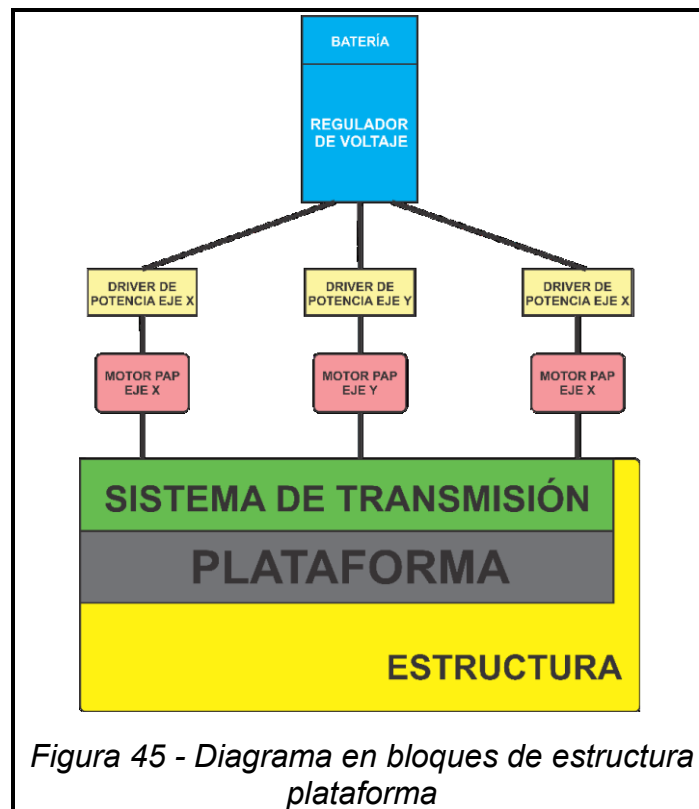


Figura 44 - Placa circuito impreso - Vista inferior

3.3 Sistema Plataforma

Es la parte mecánica que compone la estructura de la plataforma auto nivelada. Esta está compuesta por motores PAP que son comandados por drivers de potencia, cuya señal de control de estos últimos es enviadas por el microcontrolador. Los motores PAP son los encargados de mover cada uno de los tres ejes que componen la plataforma. Para producir este movimiento la estructura consta además de un sistema de transmisión y guías acoplado a los motores que ayudan a obtener un movimiento controlado y estable del sistema. Cada una de las partes antes mencionadas están fijamente unidas mediante una estructura diseñada a medida, cuyas características mecánicas soporta el peso y movimiento de cada una de las partes, además del peso del equipo que será colocado sobre el sistema nivelador. A continuación, se presenta un esquema detallado de las partes que componen esta parte del sistema nivelador.



En el diagrama anterior se observa las diferentes partes que conforman el sistema mecánico. Tanto los motores como los drivers de potencia que los comandan están alimentados desde una misma fuente de alimentación, en este caso un banco de batería.

La alimentación de cada parte se hace mediante el uso de reguladores de voltaje, adaptando el consumo para cada uno de los dispositivos. El sistema está compuesto por 3 ejes, cada uno independiente, cuyo movimiento es generado por su motor PAP. Cada eje lo conforma un conjunto de tornillos sin fin de precisión, rodamientos y guías que permite su movimiento controlado. La plataforma del sistema, sobre la cual se posará el equipo de medición, está acoplada a los tres ejes independientes mediante un segundo sistema de transmisión. En esta plataforma se ubica instalado el sensor de inclinación utilizado,

instalado de tal manera que la inclinación de la plataforma coincida con la inclinación del sensor IMU.

Las etapas de funcionamiento del sistema mecánico son las siguientes:

- a) Al ser enviada la solicitud de nivelación por parte del usuario, el sensor de medición inercial colocado sobre la base de la plataforma envía hacia el microcontrolador la inclinación actual. El microcontrolador procesa los datos recibidos y genera una señal de control que es enviada a los drivers de potencia de cada uno de los motores en relación a la inclinación presente.
- b) Los drivers de potencia generan la señal de alimentación para cada uno de los motores en base a la señal proveniente del microcontrolador, esta señal varía en cantidad de pasos y dirección.
- c) Los motores están acoplados a un tornillo sin fin. Una pieza móvil acoplada a este tornillo, conjuntamente a un sistema de guías y rodamientos lineales, es desplazada en un movimiento lineal una longitud dada por el movimiento rotatorio del dispositivo motor. La longitud y dirección de desplazamiento tiene una relación directa con la cantidad de pasos del motor paso a paso y la dirección de giro de este último.
- d) La pieza móvil descrita anteriormente está unida a una pieza móvil de articulación cilíndrica. En esta última es donde descansa el soporte de la plataforma niveladora.
- e) El movimiento longitudinal que presenta la pieza móvil, es trasladado a la pieza con articulación cilíndrica variando la inclinación del soporte de la plataforma. Al estar cada soporte acoplado a la plataforma del sistema, como resultado se obtiene el cambio de inclinación de esta última.

A continuación, se hará una explicación en detalle de cada una de las partes que conforman el sistema mecánico.

3.3.1 Drivers de potencia y motores

Es necesario para la alimentación de los motores PAP un dispositivo que reciba las señales de control provenientes del microcontrolador y sean traducidas en señales de alimentación. Para esto se utilizó los drivers de potencia Pololu 4988a.

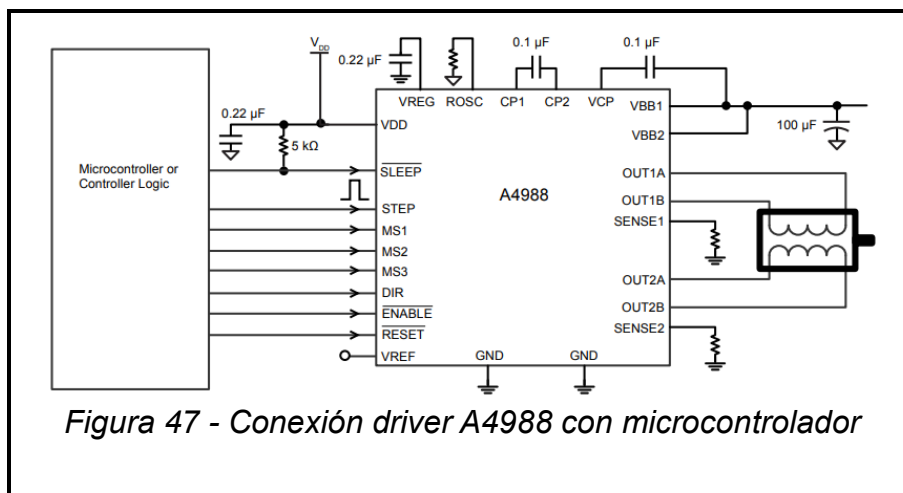


Este dispositivo está diseñado para comandar motores PAP bipolares mediante una sencilla implementación. Presenta diferentes modos de microstepping permitiendo movimientos controlados y muy precisos, lo cual lo hace muy adecuado para la implementación que se quiere realizar. Además, el rango de alimentación de funcionamiento del este dispositivo es muy amplio, posibilitando la utilización de motores con características diferentes. Esto último es un punto muy importante ya que de modificarse en un futuro el dispositivo nivelador, gracias a las características de este componente, la adaptación con otros elementos sería sencilla.

Entre las características más importantes del driver de potencia están:

- Alimentación lógica compatible con 3.3 [V] a 5 [V]
- Protección térmica
- 5 modos seleccionables de microstepping: full, 1/2, 1/4, 1/8, and 1/16
- Capacidad de control de salida de 8 [V] a 32 [V] - 2 [A]
- Protección contra sobre carga y protección cortocircuito a tierra

Las características de funcionamiento de este dispositivo lo hacen adaptable con diferentes tipos de motores PAP. Dependiendo el tipo de motor a utilizar el mismo debe configurarse, adaptando la corriente de carga a un valor deseado que corresponda al motor a utilizar.



Internamente el dispositivo se puede separar en 3 partes:

- Traductor
- Control lógico y de corriente
- Alimentación de motores.

Traductor

En esta parte ingresan las señales de control externas que condicionan el funcionamiento. Estas se separan en dos grupos: señales de control que actúan sobre la

actuación del motor y señales de control que actúan sobre el normal funcionamiento de driver.

Las señales de control que actúan sobre el funcionamiento del motor son STEP y DIR. Estas señales son generadas por el microcontrolador, produciendo un movimiento y en una dirección solicitada del motor PAP conectado. Conjuntamente con estas dos señales se encuentran M1, M2 y M3 que dependiendo sus niveles lógicos generan un movimiento completo o microstepping.

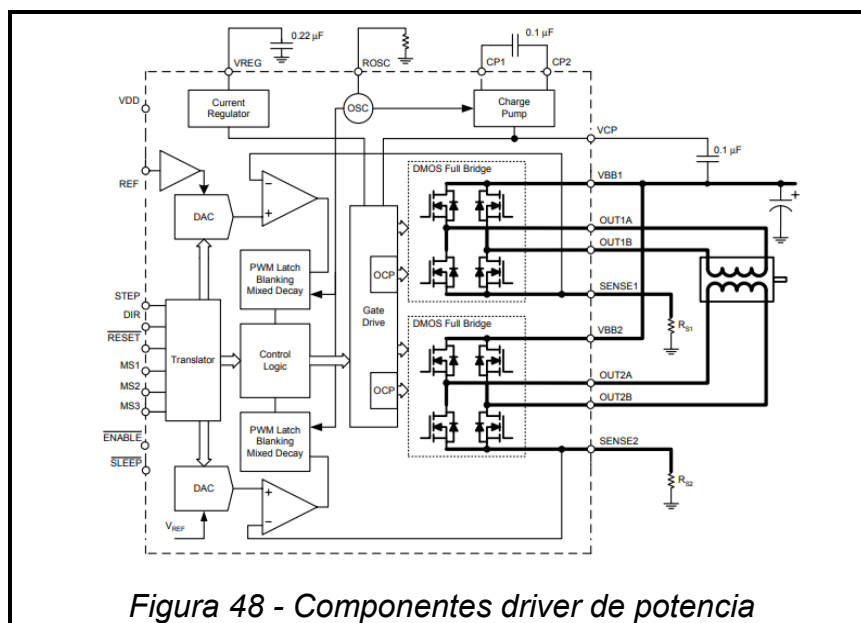
Las señales de control que actúan sobre el normal funcionamiento del driver son ENABLE y SLEEP, estas habilitan el funcionamiento o desactivan gran parte de los componentes internos para un ahorro de energía, respectivamente.

Control lógico y de corriente

Este sector es el encargado de generar las señales de control lógico que serán enviadas al driver interno de disparo conectado a los DMOSFET que componen los dos puentes H completos internos. La salida de estos dos puentes H estarán conectados a las bobinas del motor PAP y serán los encargados de definir el flujo de corriente sobre estas determinando su giro y dirección.

Las corrientes en cada uno de los dos puentes H y todos los FET DMOS de canal N se regulan con un circuito de control PWM de tiempo de inactividad fijo. En cada paso, la corriente para cada puente completo se establece por el valor de su resistencia externa de detección de corriente (RS1 y RS2), un voltaje de referencia (VREF)

Cuando el voltaje en RSx es igual al voltaje de salida del DAC, el comparador de detección de corriente resetea el latch del PWM. El latch luego apaga el controlador de fuente apropiado e inicia un modo de caída de tiempo de apagado fijo.



El cálculo de la corriente limitante será dada además por las características de los motores a utilizar, entre las cuales se destacan:

- Voltaje de trabajo
- Grados por paso
- Corriente por fase

La corriente por fase del motor paso a paso será considerada para el cálculo siguiente:

$$I_{LimMAX} = V_{REF} / (8 * R_S)$$

Figura 49 - Cálculo de tensión de referencia en driver



Figura 50 - Ubicación resistencias limitadoras

Donde V_{REF} es el valor de tensión fijado externamente y R_S (R_{S1} y R_{S2}) es el valor de cada una de las resistencias de sensado conectadas a cada uno de los puentes H internos del dispositivo.

En la *Figura N. ° 50* se observa la posición física de las dos resistencias de sensado R_S y un potenciómetro con el cual se regula la tensión V_{REF} .

El motor PAP a utilizar es el NEMA 17:



Figura 51 - Motor NEMA 17

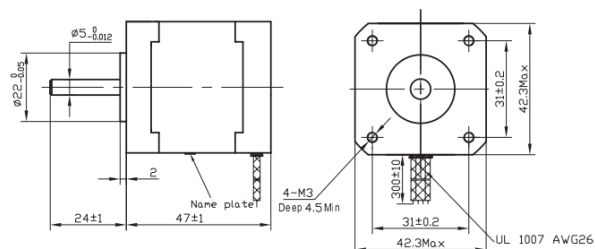


Figura 52 - Dimensiones de motor NEMA 17

Las características principales de este motor son las siguientes:

- Tipo de motor: Bipolar

- Ángulo de pase: 1.8°
- Voltaje de operación: 12 [V]
- Corriente nominal/fase: 0.4 [A]
- Torque: 2.6 [Kg.cm]
- Resistencia/fase: 30ohm

Dada la corriente nominal por fase que presenta el motor a utilizar podremos calcular la tensión de referencia que será colocada en el driver de potencia que los comandará. En base a la ecuación representada en la *Figura N. ° 49* calculamos este valor:

Corriente por fase: 0.4 [A]

Resistencia limitadora:

$$V_{Ref} = I_{LimMAX} * (8 * R_S)$$

$$V_{Ref} = 0.4[A] * (8 * 0.1[\Omega])$$

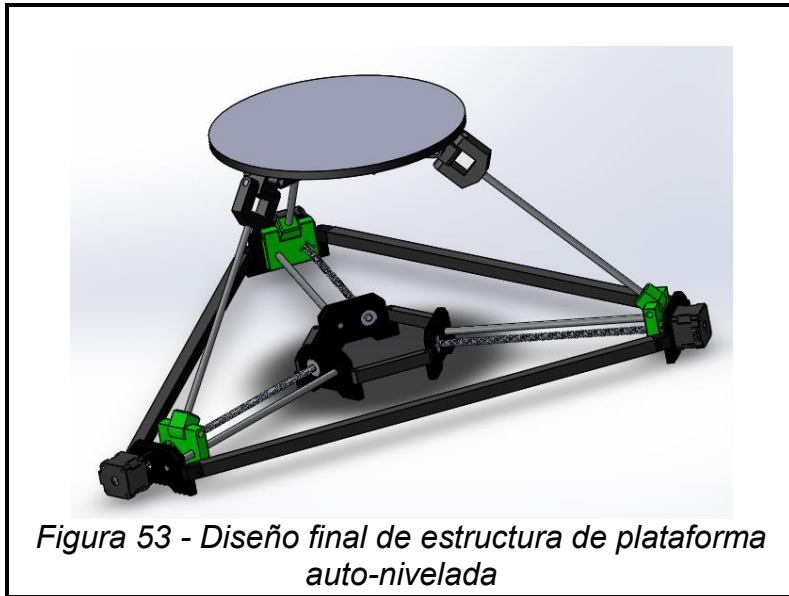
$$V_{Ref} = 0.32[V]$$

Ya que el driver será utilizado en modo pasos completos, la tensión de referencia aplicada deberá ser limitada a un %70 como lo recomienda la hoja de datos del componente. De esta forma la tensión de referencia colocada será:

$$V_{Ref} = 0.224[V]$$

Teniendo esto configurado es posible realizar la conexión dada por la *Figura N. °48*.

3.3.2 Estructura



La estructura del sistema está compuesta por varias partes fijas y móviles las cuales fueron fabricadas utilizando impresión 3D. Esto último se decidió ya que este método de fabricación permite rápidas modificaciones de cada diseño, a su vez que el material presenta una rigidez mecánica apta para el uso que se requiere. El material utilizado fue PLA. Las mismas fueron diseñadas en su totalidad utilizando el software SolidWorks. Además de estas partes, la estructura cuenta con guías, rodamientos y tornillos sin fin que complementan la estructura. A continuación, se detallará los componentes individuales de la plataforma, empezando con una descripción general del mismo.

En la figura anterior se puede observar los componentes que conforman la plataforma auto niveladora. Como se observa, el sistema está compuesto por un sistema de ejes triple idénticos. Cada eje presenta un movimiento controlado independiente dado por la acción de los motores PAP que los conforman. El eje de estos motores está acoplado a un sistema de transmisión que actúa sobre unas piezas móviles generando un movimiento longitudinal horizontal a través de cada eje, el movimiento de estos últimos es reflejado en los soportes de la plataforma, transformando un movimiento longitudinal horizontal en un movimiento vertical. Este movimiento finalmente altera la inclinación presente en la plataforma.

A continuación, se observa en detalle cada una de las piezas que conforman el sistema fabricadas en impresión 3D:

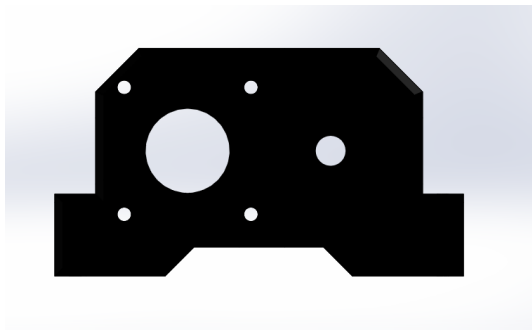


Figura 54 - Soporte motor NEMA 17

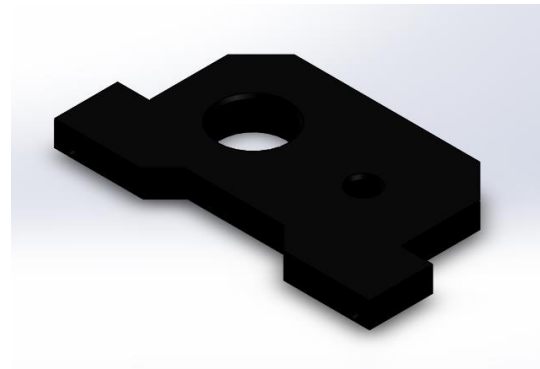


Figura 55 - Vista soporte motor NEMA 17

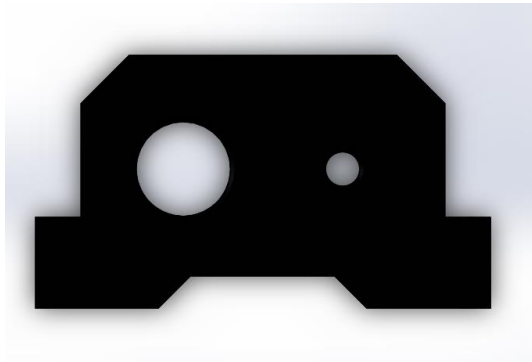


Figura 56 - Soporte cojinete

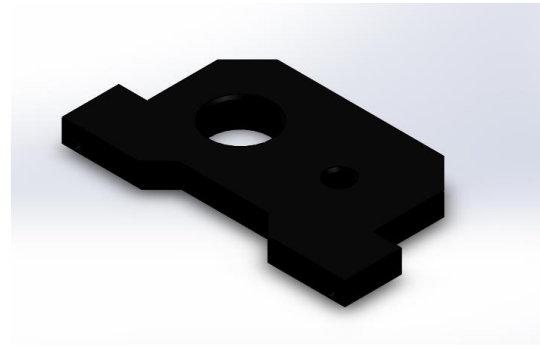


Figura 57 - Vista soporte cojinete

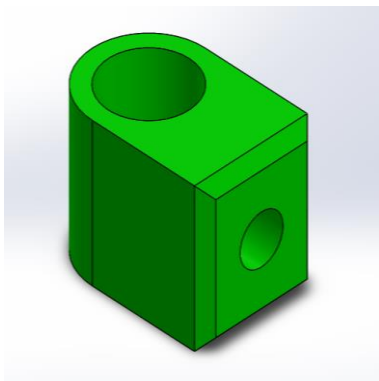


Figura 58 - Articulación soporte plataforma

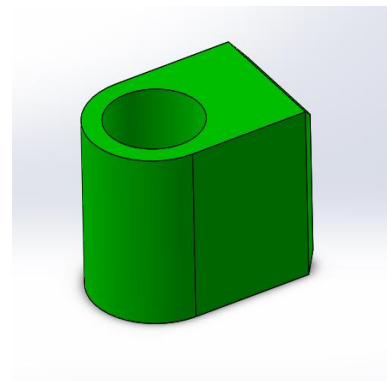


Figura 59 - Vista soporte articulación plataforma

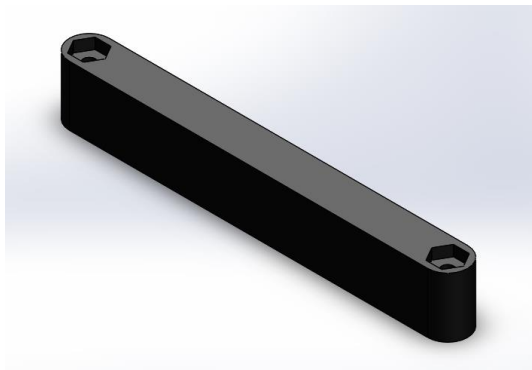


Figura 60 - Unión soporte cojinete

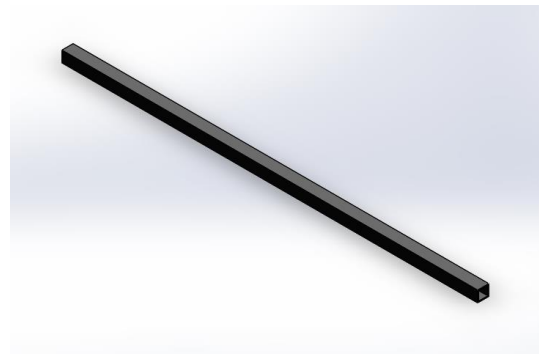


Figura 61 - Unión soporte motores

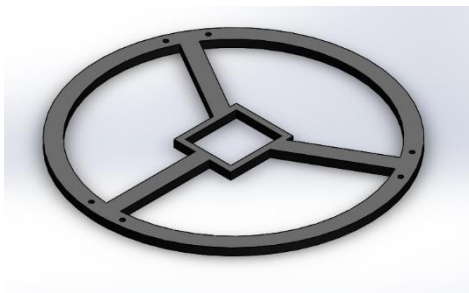


Figura 62 - Soporte base plataforma

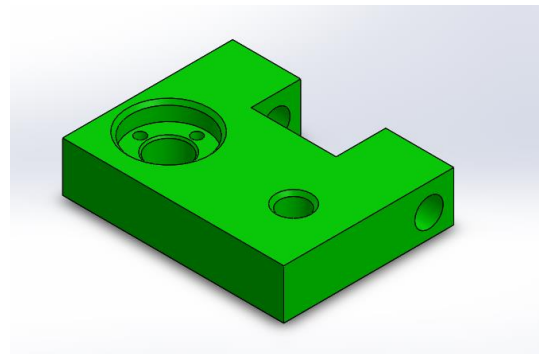


Figura 63 - Soporte eje lineal

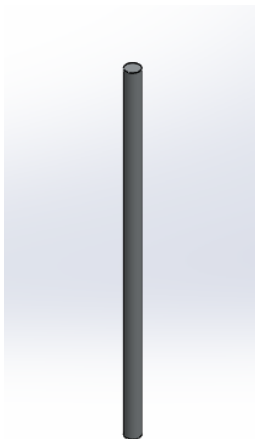


Figura 64 - Soporte plataforma

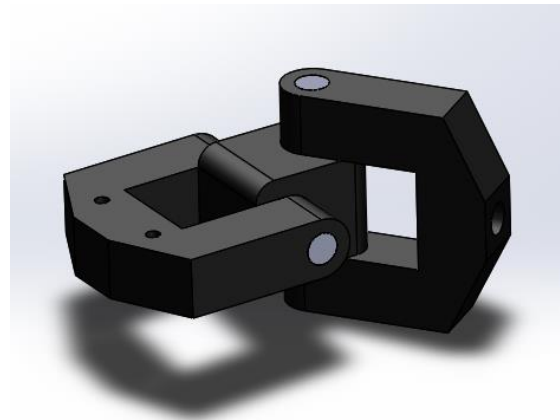
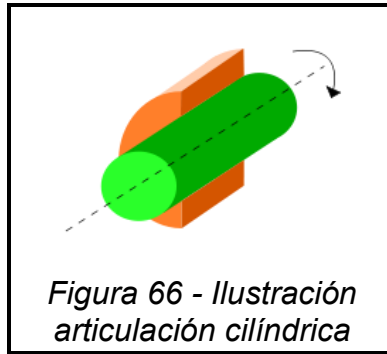


Figura 65 - Junta cardán plataforma

La *Figura N. ° 54 y 55* representa el soporte del motor de cada uno de los tres ejes idénticos. En ella se puede observar los orificios de sujeción del motor, el orificio pasante en donde será ubicado el eje del motor y el orificio correspondiente a la guía utilizada como soporte de movimiento lineal.

En la *Figura N. ° 56 y 57* es el soporte de cojinete del tornillo sin fin acoplado al motor PAP, además cuenta con un orificio en donde se acopla la guía de soporte lineal.

Las *Figura N. ° 58 y 59* corresponden a la pieza móvil en la cual esta acoplado el soporte de la plataforma. La unión con el eje principal del sistema está hecho mediante una articulación cilíndrica.



La *Figura N. ° 65* corresponde al acople entre el soporte de la plataforma y la plataforma en sí. El acople se hace mediante una junta de Cardán. Esta junta permite un grado de libertad de movimiento muy amplio tanto lateral como verticalmente, además de poseer una gran rigidez mecánica. Esto último es muy importante ya que esta pieza deberá soportar el peso del equipo que será colocado encima de la plataforma.

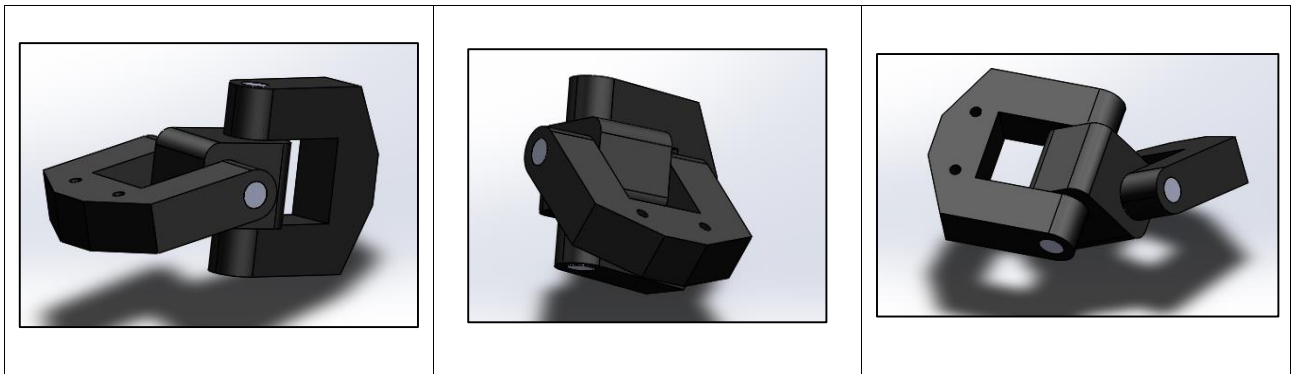


Tabla 9: Grados de libertad de junta de Cardán

La *Figura N. ° 63* representa la unión mecánica entre el eje de movimiento longitudinal horizontal y entre el soporte de la plataforma de movimiento vertical. El acople, como se explicó con anterioridad se hace mediante una articulación cilíndrica.

Además de las piezas fabricadas en impresión 3D, fueron necesarias piezas como guías aceradas, tornillos sin fin y rodamientos que permiten la unión de cada uno de los componentes. A continuación, se presenta en detalle cada componente.



- **Diámetro del tornillo:** 8mm
- **Espaciado del tornillo:** 2mm
- **Avance de rosca:** 8mm



- **Diámetro de la varilla:** 8mm



- **Diámetro externo:** 24 mm
- **Diámetro interno:** 8 mm



- **Diámetro externo:** 22 mm
- **Diámetro interno:** 8 mm

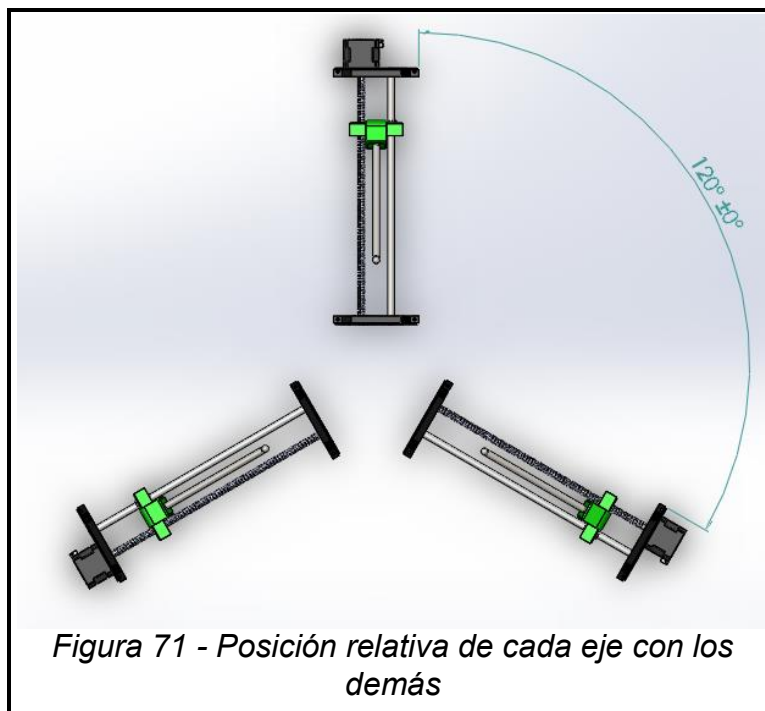
Cada componente anteriormente descrito fue utilizado principalmente por su fácil obtención en el mercado y por su bajo costo, además de las buenas prestaciones que estos poseen. Los mismos están desarrollados y altamente testeados siendo esta la razón por la

cual estos componentes son fácilmente encontrados en cada una de las maquinas CNC desarrolladas en la actualidad, como ser pantógrafos, fresadoras e impresoras 3D.

La pieza ilustrada en la *Figura N. ° 63* es utilizada para el movimiento longitudinal horizontal de cada eje. Este componente permite un movimiento fluido y estable sobre las guías utilizadas, en este caso las varillas aceradas mostradas en la *Figura N. ° 68*. El elemento de la *Figura N. ° 56* y *57* es utilizado como cojinete, sobre el cual es acoplado la varilla roscada visualizada en la *Figura N. ° 67*.

3.3.3 Construcción y diseño.

Cada eje independiente que conforma la plataforma niveladora presenta dimensiones y una estructura que responde y se adapta a la electrónica empleada. El sistema está compuesto por tres ejes idénticos independientes, cada uno de estos están firmemente sujetos a una base. La disposición de cada uno de los ejes en relación a los demás se muestra en la figura siguiente:



Como se muestra en la figura anterior, cada eje está equiespaciado un ángulo de 120° , esto permite una correcta distribución de fuerzas debido al peso del equipo de medición que será ubicado sobre la plataforma. El peso del equipo será distribuido uniformemente, con lo cual cada eje soportará $1/3$ del peso total del dispositivo de medición.

Estructuralmente cada eje individual está compuesto de la siguiente manera:

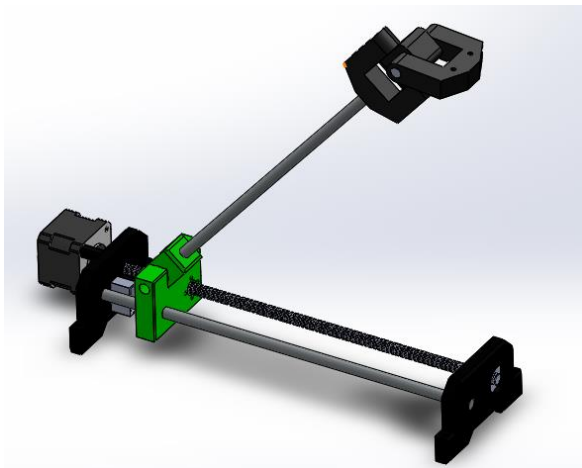


Figura 72 - Vista eje individual de plataforma

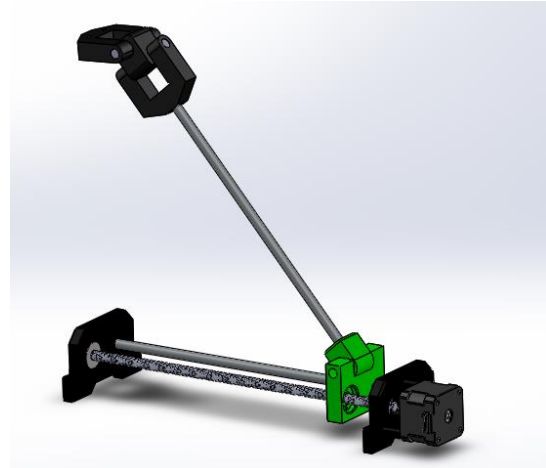


Figura 73 - Vista eje individual de plataforma

En la figura anterior se puede ver la composición de cada eje individual y detalladamente las partes que lo componen. Cada eje tiene definido un grado de libertad determinado, sobre el cual será capaz de desplazarse. Cada eje se desplaza por acción de los motores de forma horizontal, un movimiento vertical es provocado por esta última acción generando un cambio de inclinación en la plataforma del dispositivo.

Como se estableció en la sección **3.1.8** el sistema tiene establecido una inclinación máxima sobre la cual es capaz de responder correctamente. En base a lo establecido anteriormente, el sistema presenta aproximadamente 20° de libertad por cada eje individual en función del desplazamiento horizontal establecido. Esto último es logrado estableciendo las dimensiones correctas en cada componente mecánico. A continuación, se dará en detalle las dimensiones de cada uno de los componentes de cada eje.

3.3.4 Sistema de transmisión

El sistema de transmisión de la plataforma está compuesto por las piezas representadas en las *Figuras N.º 72 y 73*, principalmente. La varilla roscada de la *Figura N.º 67* es la pieza que se acopla al motor de la *Figura N.º 51*, la varilla acerada representada en la *Figura N.º 68* funciona como guía. Estas dos piezas funcionan como soporte de la pieza representada en la *Figura N.º 63* cuyo movimiento es generado por la rotación del motor.

Teniendo en cuenta las especificaciones del motor a utilizar y de la varilla roscada se define lo siguiente:

- Ángulo por paso de motor: 1.8° .
- Avance por giro de rosca completa en varilla: 8 [mm]

Teniendo esto se deben realizar **200** pasos para lograr un giro de **360°** grados en nuestro motor, o que es lo mismo, para realizar un avance de **8 [mm]** lineal de nuestra pieza.

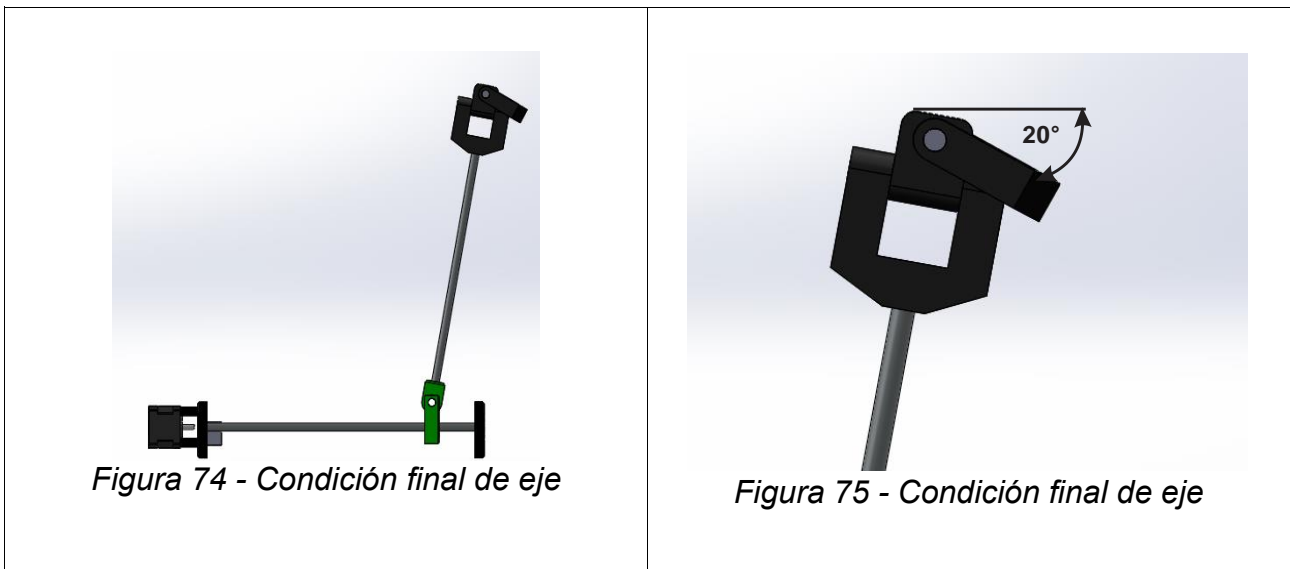
A raíz de esto tenemos:

- **0,04 [mm]** de avance por paso de motor.

Las condiciones principales de diseño que cada eje presentan se muestran en la siguiente figura:

La condición inicial de funcionamiento de cada eje está representada en la figura anterior, como es establecido en la sección **3.1.6...** El recorrido longitudinal capaz de realizar cada eje es de 200 [mm], por lo tanto tenemos:

$$200[mm] \rightarrow 50000[pasos]$$



En base a la condición inicial de funcionamiento y al recorrido máximo establecido por las condiciones de diseño, la inclinación máxima lograda en cada eje individual es de 20°. Esta inclinación o elevación, es la inclinación máxima que el dispositivo es capaz de nivelar al momento de ser utilizado, funcionalidad establecida en el apartado **3.1.8..**

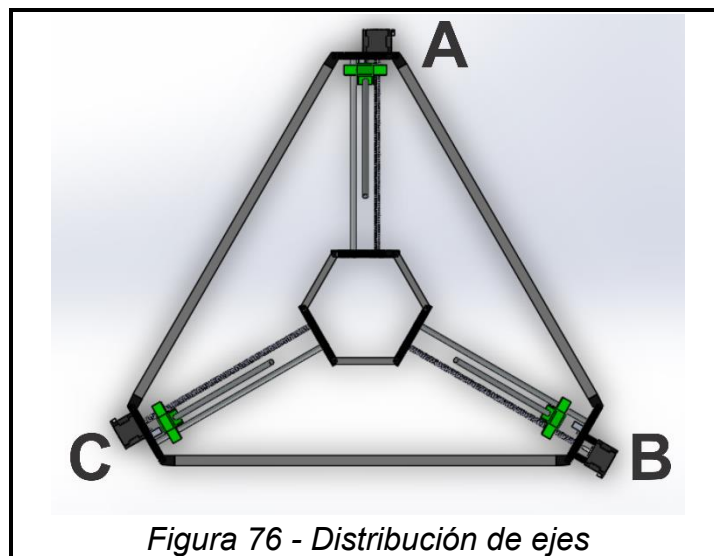
3.3.5 Movimiento de ejes

Dada las condiciones de diseño que se observan en la *Figura N. ° 71*, los 3 ejes están equiespaciados 120° respecto de los demás. Además de esto, se estableció por convención que el eje denominado **A** sea paralelo al **Eje Y** correspondiente al sensor de inclinación IMU utilizado. De esta forma, el movimiento del Eje **A** solo afectará a la inclinación en el eje **Y** de la plataforma.

Para la variación en la inclinación en Eje **X** de la plataforma, los Ejes **B** y **C** son los responsables. Sin embargo, el movimiento de estos dos ejes afecta la inclinación tanto en Eje **X** y Eje **Y** de la plataforma simultáneamente. Debido a esto, al variar la inclinación en Eje **X** de la plataforma, es necesario compensar la inclinación que se produce también en Eje **Y**. Para poder hacer esto último, nos valemos de la relación definida que presentan los tres ejes **A**, **B** y **C**.

Para explicar de forma sencilla el funcionamiento principal que se produce al momento de nivelar, se expone el siguiente ejemplo:

Si queremos mover el Eje **A** una cantidad de 200 pasos verticalmente, que en base a las condiciones de diseño equivale a un desplazamiento lineal de **8 [mm]**, el sistema generará las señales de control para este motor y mediante la etapa de potencia de los drivers del motor se energizarán los mismos.



Si queremos generar este mismo desplazamiento vertical, pero utilizando los Ejes motores **B** y **C**, es necesario realizar el siguiente cálculo trigonométrico:

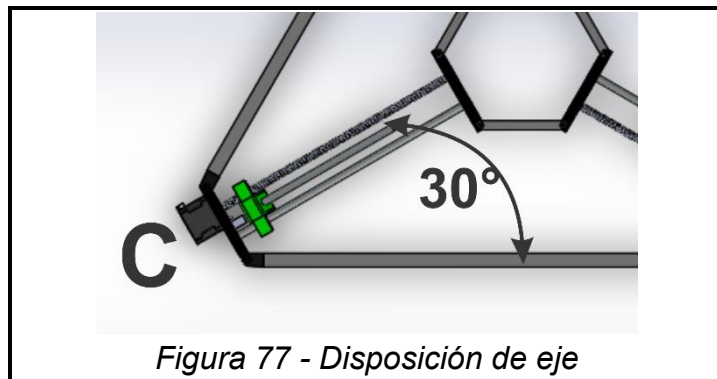
$$200 / \sin(30) = 400$$

Es decir, para poder realizar un desplazamiento vertical igual al realizado con el Eje **A**, los ejes motores **B** y **C** deben hacer el doble de pasos para igualar el desplazamiento.

Si deseamos realizar un desplazamiento horizontal, los Ejes motores **B** y **C** son los responsables ya que son los únicos que pueden realizar este movimiento. Sin embargo, igual que en el caso expuesto anteriormente, es necesario utilizar el siguiente cálculo trigonométrico.

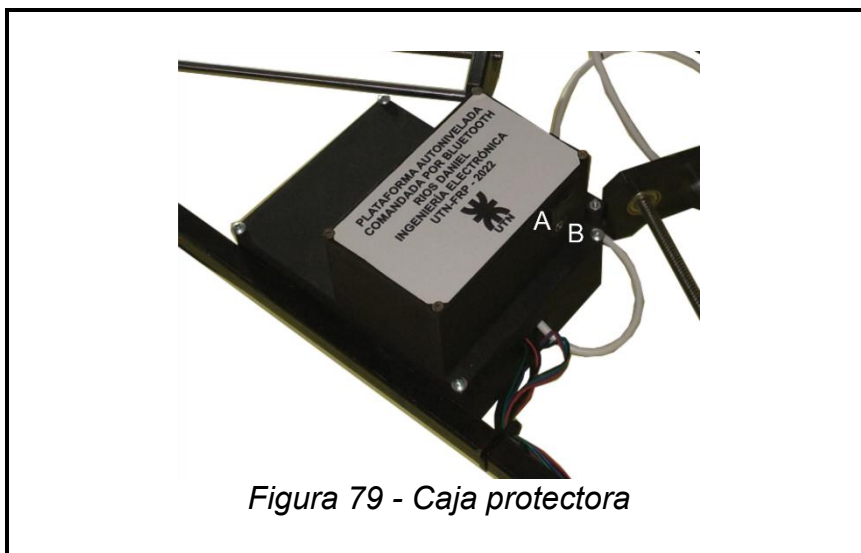
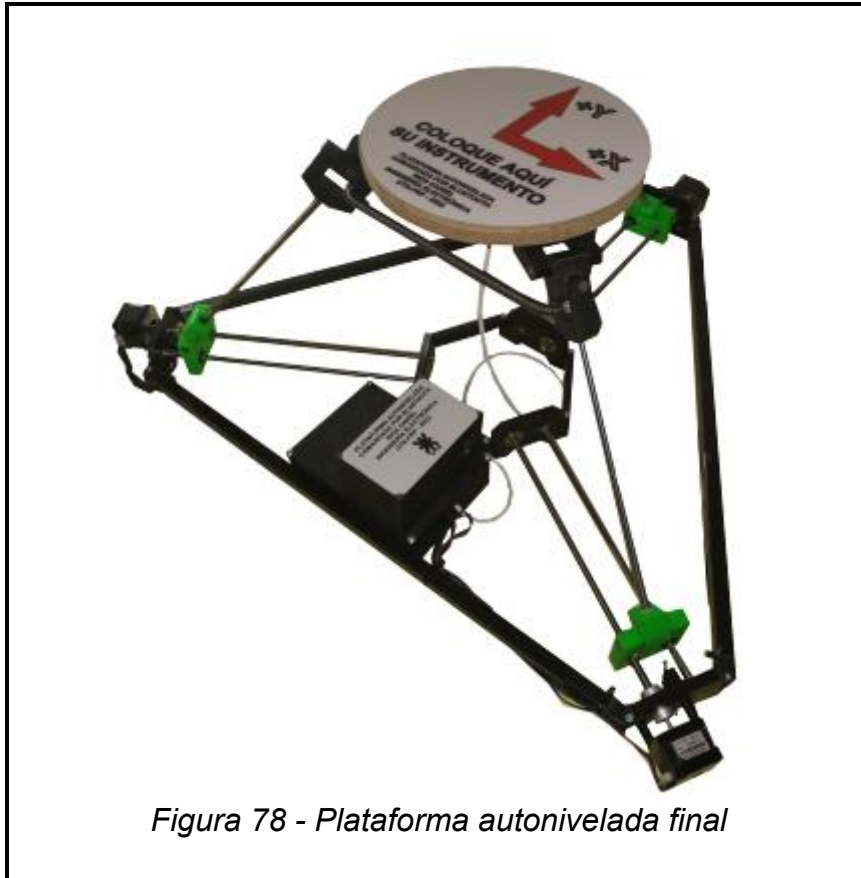
Si queremos desplazar horizontalmente el Eje **C** una distancia de 8 [mm] hacia la derecha, que equivale en un desplazamiento lineal a 200 pasos, es necesario realizar una cantidad de pasos dada por:

$$200 / \cos(30) = 230,94 \approx 231$$



En base a lo expuesto anteriormente, cada desplazamiento horizontal o vertical realizado en el sistema con el movimiento de los Ejes **A**, **B** y **C**, teniendo en cuenta que a la plataforma se la observa desde una vista superior, está relacionado directamente con un cambio en la inclinación de la plataforma. Teniendo en cuenta las relaciones descritas, fue realizado el algoritmo y programa principal expuesto en el apartado **3.2.9.3**

Capítulo 4: Resultados



En la *Figura N. ° 78* se presenta el equipo terminado, de construcción robusta, simple y liviana permitiendo un fácil transporte y traslado del mismo, como así también un reducido espacio utilizado por el instrumento. El dispositivo está construido en base a las especificaciones dadas por el usuario y siguiendo el diseño presentado en la *Figura N. ° 53*.

La implementación de guías y soportes metálicos dan rigidez a la estructura, siendo un complemento importante de las piezas plásticas de las demás piezas.

El sistema electrónico de control, el sistema electrónico de potencia y el banco de baterías están alojados en la caja visualizada en la *Figura N.º 79*, dando una protección a cada uno de los componentes y protegiéndolos del medio ambiente. El sistema cuenta con un interruptor el cual energiza el sistema (A) y un conector hembra tipo Jack hembra 5.5 [mm] mediante el cual se carga el banco de baterías que alimenta todo el sistema (B). Por último, sobre la superficie de la plataforma se indican los sentidos de los ejes del sensor de inclinación para la orientación del usuario.

4.1 Puesta en funcionamiento

Para la correcta aplicación y funcionamiento de la plataforma auto niveladora la misma debe ser colocada y montada en un sitio que presente irregularidades de terreno, teniendo en cuenta que las mismas no deben superar los límites dispuestos. De no cumplirse esto último el sistema avisara al usuario y no se podrá realizar la nivelación, siendo necesario reubicar el sistema en otro sitio.

Luego, mediante el accionar del interruptor alojado en el dispositivo se energiza el sistema, quedando en espera a que el usuario se empareje mediante Bluetooth.

El usuario deberá instalar la aplicación celular en su equipo personal, mediante el cual será capaz de emparejarse con la plataforma y comunicarse con la misma por este medio. La comunicación entre la aplicación y la plataforma es bidireccional, por esta razón es necesario que el mismo este corriendo en primer plano. De esta forma, las alertas y mensajes serán visualizados de manera correcta.

Una vez que el emparejamiento es realizado, se pueden hacer uso de las funciones descritas en el apartado **3.1**

4.2 Pruebas de funcionamiento

Para las pruebas de funcionamiento y respuesta del equipo ante una situación normal de nivelación se implementó la siguiente metodología:

- Se colocó sobre la plataforma del dispositivo nivelador un objeto cuyas características son similares a las que posee el dispositivo real a nivelar (peso, dimensión)
- Se sometió al dispositivo nivelador a un desnivel conocido en cada uno de sus ejes representados en la *Figura N° 76*, simulando un desnivel real.
- Se realizó nivelaciones consecutivas del dispositivo nivelador
- Luego de cada nivelación realizada se midió mediante un nivel patrón el error presente en la nivelación respecto del eje X y eje Y

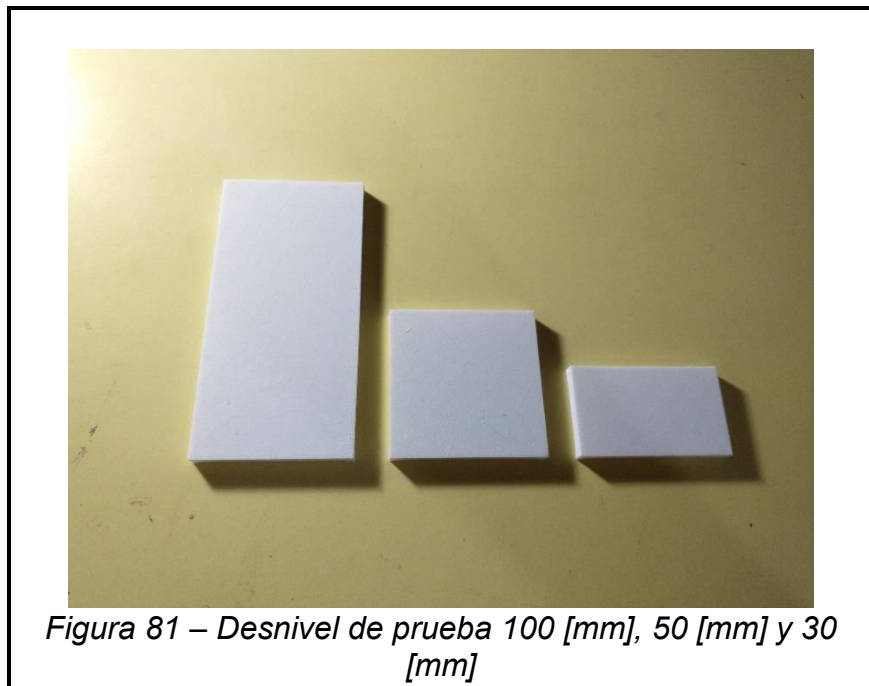
El objeto cuyas dimensiones y peso representa al equipo de medición a nivelar, mostrado en la *Figura N° 1*, se observa en la figura siguiente



Peso: 1,5 [Kg]

Dimensiones: 40 [cm] x 27 [cm] x 22 [cm]

Para la implementación de un desnivel conocido se hizo uso de 3 piezas diferentes, cuyas dimensiones representan desniveles de 30 [mm], 50 [mm] y 100 [mm]. El modelo de estas piezas se hizo a medida implementando impresión 3D.



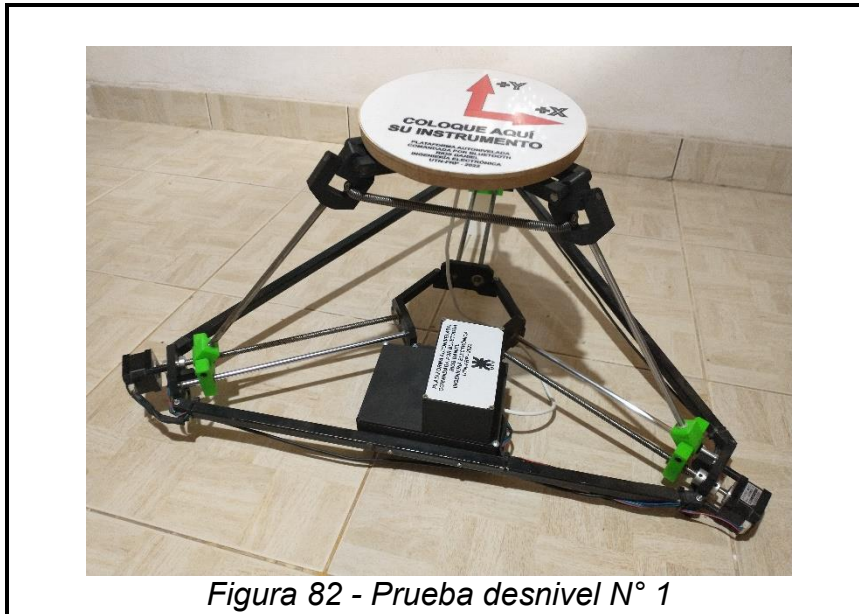
A continuación, para las pruebas de nivelación se sometió el equipo a tres pruebas diferentes, donde en cada una de ellas se colocó un desnivel distinto en cada uno de los puntos de apoyo del sistema nivelador. Una vez hecho esto, se realizaron 3 nivelaciones consecutivas con cada desnivel, midiendo el desnivel resultante y por lo tanto el error en cada una de ellas.

Siguiendo la distribución de ejes visualizada en la *Figura N° 76*, tenemos:

Punto de apoyo A: 100 [mm] desnivel

Punto de apoyo B: sin desnivel

Punto de apoyo C: 30 [mm] de desnivel



	Nivelación N° 1	Nivelación N° 2	Nivelación N° 3	Valor Medio
Desnivel Eje X (°)	-0.6	-0.3	-0.4	-0.43
Desnivel Eje Y (°)	-0.6	-0.9	-0.8	-0.73

Punto de apoyo A: sin desnivel

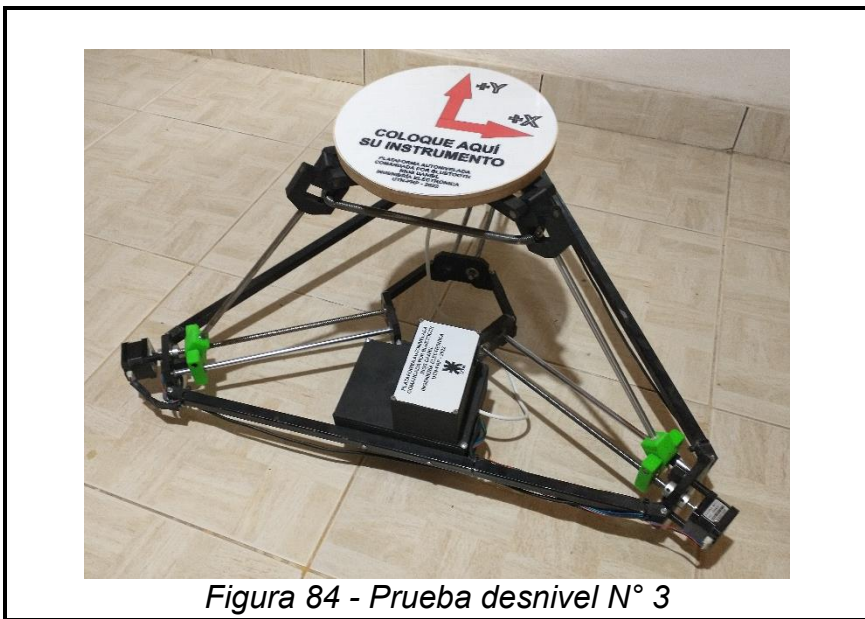
Punto de apoyo B: 50 [mm] desnivel

Punto de apoyo C: 100 [mm] desnivel



	Nivelación N° 1	Nivelación N° 2	Nivelación N° 3	Valor Medio
Desnivel Eje X (°)	0.1	-0.3	-0.3	-0.16
Desnivel Eje Y (°)	-0.4	-0.4	-0.3	-0.36

Punto de apoyo A: 100 [mm] desnivel
Punto de apoyo B: 50 [mm] desnivel
Punto de apoyo C: 30 [mm] de desnivel



	Nivelación N° 1	Nivelación N° 2	Nivelación N° 3	Valor Medio
Desnivel Eje X (°)	-0.3	-0.5	-0.8	-0.53
Desnivel Eje Y (°)	0.3	0.1	-0.1	0.1

En base lo anterior, se puede determinar que el error promedio obtenido al momento de nivelar la plataforma en cada uno de los dos ejes está comprendido entre ± 1 [°]. Este error previsto al momento de realizar una acción de nivelación se debe a varios factores, dentro de los cuales se puede considerar aquellos descritos en la sección 2.4.1.. Entre ellos, los más predominantes son:

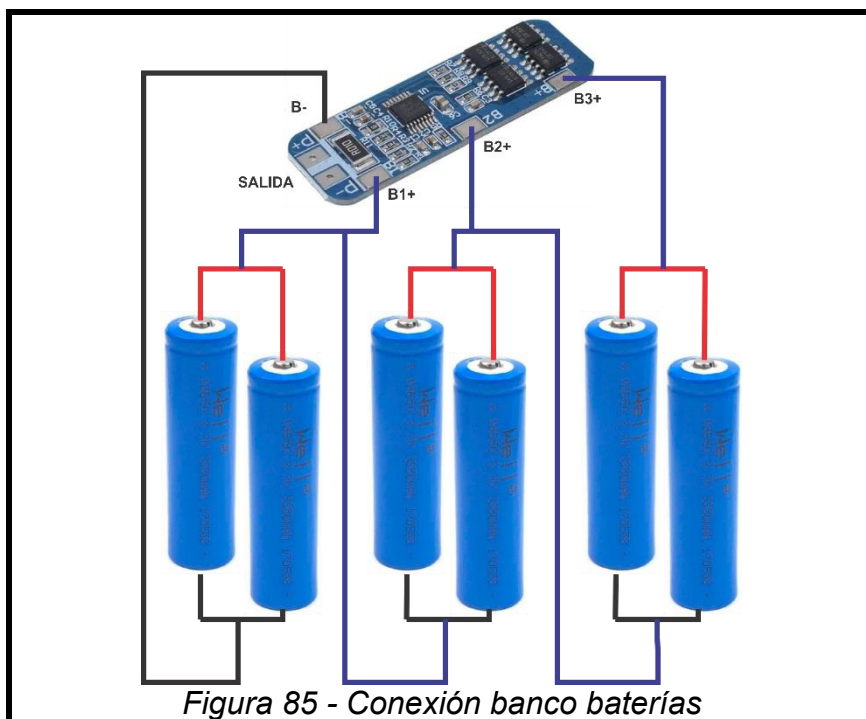
- Sesgo en giróscopo y acelerómetro
- No ortogonalidad del sensor
- Desnivel presente en sensor adosado a base de plataforma

Además, un error mecánico es producido al momento de realizar las nivelaciones. Este error mecánico se debe a los juegos presentes entre las diferentes piezas que componen el sistema nivelador. Si bien al momento de diseño y fabricación de cada una de las piezas se minimizó al máximo este error, la aparición de este es inevitable y se traslada al error final presente en la nivelación.

4.3 Autonomía

El banco de baterías utilizado para la alimentación completa del sistema está compuesto por 6 baterías 18650 Li-ion de una capacidad de 2000 [mAh] y 3.7 [V] cada una.

El diagrama del banco de baterías utilizado se muestra en la figura siguiente:



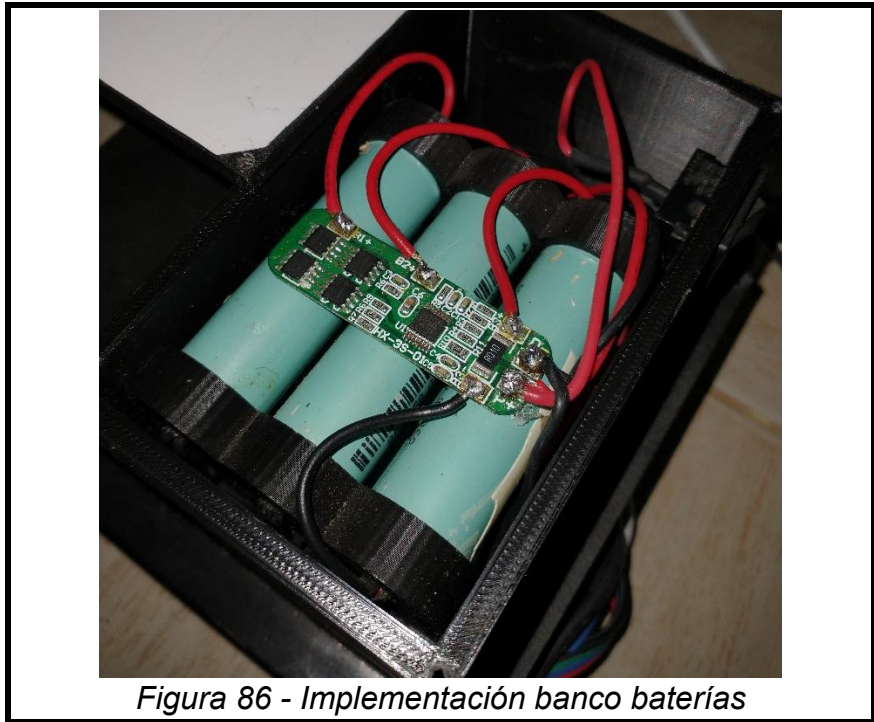


Figura 86 - Implementación banco baterías

Dada la conexión presente en la del banco de baterías tenemos lo siguiente:

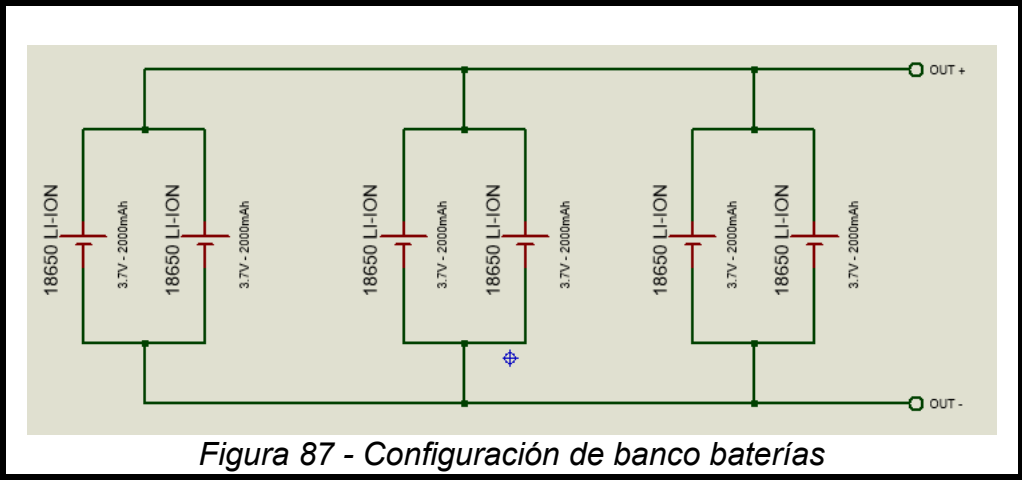


Figura 87 - Configuración de banco baterías

Teniendo esto último se calcula la carga total presente:

$$\begin{aligned}
 Q_{BAT} &= 4000 \text{ [mAh]} \\
 Q_{RAMA} &= (Q_{BAT} * 2) \\
 Q_{RAMA} &= 8000 \text{ [mAh]} \\
 Q_{TOTAL} &= Q_{RAMA} * 3 \\
 Q_{TOTAL} &= (8000 \text{ [mAh]} * 3)
 \end{aligned}$$

$$Q_{TOTAL} = 24000 \text{ [mAh]}$$

Teniendo este dato se midió mediante un amperímetro patrón el consumo del dispositivo nivelador en dos situaciones normales de funcionamiento: Consumo en estado de espera, consumo en modo nivelación. Una vez teniendo estos valores de consumo en las dos situaciones se calculó la autonomía del dispositivo en ambos casos:

Consumo en estado de espera: 0.125 [A]

Consumo en modo nivelación: 0.89 [A]

Autonomía de equipo en modo espera:

$$Autonomía_{M. \text{ espera}} = \frac{24000 \text{ [mAh]}}{125 \text{ [mAh]}}$$

$$Autonomía_{M. \text{ espera}} = 192 \text{ [Hs]}$$

Autonomía de equipo en modo nivelación:

$$Autonomía_{M. \text{ nivelación}} = \frac{24000 \text{ [mAh]}}{890 \text{ [mAh]}}$$

$$Autonomía_{M. \text{ nivelación}} = 26.96 \text{ [Hs]}$$

Se debe aclarar que estos valores de autonomía se calculan teniendo en cuenta que las baterías están cargadas completamente, el estado de las mismas es óptimo y las condiciones ambientales en donde se encuentran son favorables para su correcto desempeño.

4.4 Características técnicas de aplicación celular “Plataforma Autoniveladora”

- **Sistema operativo:** Android
- **Tamaño de aplicación:** 5,56 [Mbytes]
- **Distancia máxima de enlace con dispositivo:** 15 [m]
- Interfaz amigable y fácil uso
- Comunicación bidireccional
- Sistema de aviso mediante vibración y mensajes de alerta
- Instrucciones e información de uso para el usuario
- Visualización de estado actual y acciones del sistema,

4.5 Características técnicas de estructura plataforma.

- **Material constructivo:** PLA y acero.
- **Tipo de estructura:** Trípode
- **Peso máximo de soporte:** 2 [Kg]
- **Peso dispositivo:** 5 [Kg]
- **Dimensiones:** 77 [cm] x 77 [cm] x 33 [cm]
- Desmontable y fácil transporte

4.6 Características técnicas de sistema electrónico.

- Interruptor de encendido y apagado
- **Ejes de medición:** 2, X e Y
- **Error de nivelación:** ± 1 [°]
- **Comunicación inalámbrica:** Bluetooth Classic.
- **Distancia máxima de conexión:** 15 [m] (en espacio abierto)
- **Batería:** 12 [V] / 24000 [mAh]. 6 baterías 18650 Li-ion 3.7 [V] 4000 [mAh]
- **Consumo total en stand-by:** 0.125 [A]
- **Autonomía en modo espera:** 192 [Hs]
- **Consumo total en modo funcionamiento:** 0.89 [A]
- **Autonomía en modo funcionamiento:** 26.96 [Hs]

Capítulo 5: Análisis de Costos

A continuación se dará en detalle los costos para la fabricación de la plataforma niveladora. Estos serán, como se aplicó anteriormente, separados en tres partes

5.1 Costo de materiales en aplicación celular “Plataforma Niveladora”

Para el desarrollo de la aplicación celular no se utilizaron insumos, sino se hizo uso de una aplicación de código abierto App Inventor, por esta razón solo se considerarán las horas invertidas para su terminación.

5.2 Costo de materiales en estructura de plataforma

Ítem	Cantidad	Costo Unitario (U\$D)	Costo (U\$D)
Acople Cojinete Base	3	1,68	5,04
Acople Base Externo	6	0,68	4,08
Acople Motor Nema 17	6	0,2	1,2
Caja Placa	1	20,12	20,12
Junta Cardan Inferior	3	1,87	5,61
Junta Cardan Medio	3	1,35	4,05
Junta Cardan Superior	3	1,98	5,94
Cojinete Motor	3	2,62	7,86
Acople Eje Lineal	3	2,75	8,25
Eje Soporte Lineal Vertical	3	1,28	3,84
Soporte Final De Carrera	3	0,29	0,87
Base	1	6,65	6,65
Motor Acople	3	2,62	7,86
Tapa Caja Placa	1	5,46	5,46
Guía Acerada	3	5,105	15,315
Tornillo acerado	3	9,58	28,75
Rodamiento Radial	3	2,435	7,305
Rodamiento Lineal	6	2,01	6,03
Final de carrera	3	0,71	2,13

Acople Motor-Tornillo	3	2,857	8,57
Motor Nema 17	3	15,012	45,036
TOTAL			199,966

El costo total de materiales para la construcción de la estructura de la plataforma es de U\$D 199,966 que al cambio actual (U\$D1 = 103,25) corresponde a \$20.646,48

5.3 Costo materiales sistema electrónico

Ítem	Cantidad	Costo Unitario (U\$D)	Costo (U\$D)
Placa Desarrollo ESP32 Wifi+BT	1	23,35	23,35
Shield Pololu	1	12,54	12,54
A4988 Pololu	3	4,34	13,02
Placa Pertinax	1	1,05	1,05
Regulador de tensión Lm7805	1	1,21	1,21
Batería 18650	6	10,14	60,82
Módulo de carga baterías 18650	1	12,59	12,59
IMU Mpu 6050	1	10,25	10,25
Resistencias Through Hole	3	0,1	0,3
Capacitores Through Hole	6	0,2	1,2
Pines hembra	50	0,04	2
Módulo RTC Ds1302	1	10,16	10,16
Modulo tarjeta de memoria	1	9,01	9,01
Pila 2032	1	0,75	0,75
Cables y conectores	10	0,5	5
TOTAL			163,25

El costo total de materiales para la construcción del sistema electrónico es de U\$D 163,25 que al cambio actual (U\$D1 = 103,25) corresponde a \$16.855,56

5.4 Costos Totales

Además del costo de los materiales utilizados para la construcción de la plataforma niveladora, se debe tener en cuenta las horas dedicadas al proyecto. Aquí se contempla las horas dedicadas a la investigación, diseño, construcción, pruebas y puesta en marcha. Además, se tiene contempla los diferentes ajustes que se fueron realizando a lo largo del mismo.

Para esto se tomó un costo por hora promedio de un técnico electrónico sin experiencia de \$230=USD2, 27. La carga horaria del proyecto fue de 720 hs. Obteniéndose un costo por horas de \$165600=USD1.603, 87.

Dada la descripción de los costos de los materiales más la horas de trabajo invertidas de desarrollo del proyecto tenemos un total de \$203.102,04=USD1.967, 09

Como el desarrollo de este proyecto fue pensado para complementar el desarrollo de otro, no tiene finalidades comerciales. Por esta razón, no se consideran planes de amortización para el producto final obtenido.

Capítulo 6: Discusión y Conclusión.

6.1 Resultados obtenidos

Se logró obtener un dispositivo funcional a la altura de los requisitos planteados desde el inicio. Teniendo en cuenta que su desarrollo se realizó teniendo recursos limitados tanto en herramientas e insumos. Se logró combinar tecnología MEMS, sistemas electromecánicos y programación tanto en sistemas microcontroladores como en dispositivos celulares.

Para el caso del diseño de la aplicación celular, gracias a que se utilizó un entorno de desarrollo libre, altamente conocido y con el cual se cuenta con mucha información para su uso, fue posible obtener una aplicación de entorno agradable y de fácil uso, compatible con cualquier dispositivo celular con SO Android.

El diseño de la placa PCB logró integrar en un mismo lugar todo el sistema electrónico que comanda el sistema nivelador. La parte lógica y de potencia conviven en un espacio reducido resguardado de la intemperie gracias a la caja diseñada para ello.

En una etapa inicial, para el diseño de la plataforma se pensó 4 ejes móviles de un diseño convencional, hasta que se llegó a una de 3 ejes móviles implementando un diseño innovador, que es mucho más simple que el primero y utiliza menos materiales.

Respecto al diseño de la estructura de la plataforma, a través de una extensa investigación acerca del diseño que conviene: simpleza, rigidez y rápido montaje, se llegó al diseño final obtenido. Varios ensayos fueron realizados, probando el diseño de diferentes piezas, hasta dar con la elección correcta.

El transporte del equipo final, como así también el instrumento de medición utilizado en complemento, es a través de aeronaves, tales como helicópteros. Dentro de estas máquinas el espacio y el peso que ha de ser introducido deben ser reducidos y limitados. Debido a esto se obtuvo un producto final de dimensiones y peso inferiores a los pensados en un principio, cumpliendo con esos dos requisitos principales de diseño.

6.1.1 Operatividad

Si bien el dispositivo fue diseñado para dar soporte a un instrumento electrónico en particular, con un diseño y peso definidos, la plataforma autonivelada desarrollada también puede ser utilizada en conjunto con otros dispositivos. Un ejemplo de esto son los vehículos no tripulados drones, que para realizar un despegue y aterrizaje controlado es necesario contar con una superficie plana y nivelada respecto al suelo. Otros instrumentos de medición que necesiten de las mismas prestaciones y condiciones de suelo también pueden hacer uso del equipo. Esto da un ejemplo de la versatilidad del instrumento desarrollado y de las diferentes opciones de uso que presenta.

6.2 Futuras mejoras

Entre las posibles mejoras que pueden desarrollarse y ser motivo de futuros proyectos finales, se mencionan:

- Implementación de piezas metálicas en su totalidad. Al ser utilizadas piezas constructivas de materiales blandos y de resistencia mecánica media, el sistema con el tiempo es propenso a sufrir desgaste propio del uso y de la intemperie. Si bien las piezas desarrolladas y diseñadas para este proyecto cumplen con los requisitos propuestos, la construcción de las mismas utilizando metales resistentes, como ser una aleación de aluminio, no solo reforzara la estructura del dispositivo, sino que también eliminará el juego mecánico existente dando aún más precisión al dispositivo.
- Utilización de componentes SMD en su totalidad. El uso de componentes de montaje superficial permitirá obtener una placa PCB de un tamaño más reducido y de mejor terminación. La selección correcta de estos componentes permitirá, además, obtener un mejor aprovechamiento de energía ya que el sistema se alimenta con un banco de baterías.

Los magnetómetros de fluxgate utilizados por los científicos mediante los cuales se miden las líneas de campo magnético terrestre, además de necesitar una posición completamente horizontal respecto del suelo para realizar mediciones validas, los mismos deben ser apuntados al norte geográfico terrestre, el cual es diferente al norte magnético en donde se realiza la medición, los cuales presentan grandes variaciones entre uno y otro en algunos puntos del globo terrestre. Un cuarto eje adicional capaz de realizar un movimiento giratorio de la plataforma en donde el equipo de medición es colocado, sería necesario instalar en el dispositivo desarrollado, cuya función sería la de alinear el magnetómetro con respecto al norte geográfico. Esto último haría aún más fiables las mediciones realizadas.

Capítulo 7: Literatura Citada

- (1) The US/UK World Magnetic Model for 2020-2025: *Technical Report*, National Centers for Environmental Information, NOAA
- (2) SHELDON BREINER GeoMetrics (1999). APPLICATIONS MANUAL FOR PORTABLE MAGNETOMETERS. Geometrics 2190 Fortune Drive San Jose, California 95131 U.S.A.
- (3) Behdad Geranmehr, Kamran Vafae & Aliakbar Sadeqi (2014). *High Precision Electro-Hydraulic Self Leveling Platform system*. School of Mechanical Engineering Iran University of Science and Technology Tehran, Iran