

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Ingeniería Mecánica**

**Diseño y construcción de un sistema IMU para la medición  
de ángulos en extremidades**

**Alejandro Quelal Gualotuña**

**Andrés Molina Vargas**

**Daniel Moreno Mogollón**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Patricio Gabriel Chiriboga Arroyo, PhD., Director de Tesis

Quito, 26 de noviembre de 2023

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingeniería**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Diseño y construcción de un sistema IMU para la medición de ángulos en  
extremidades**

**Andrés Sebastián Molina Vargas  
Alejandro Quelal Gualotuña  
Daniel Moreno Mogollón**

**Patricio Chiriboga, PhD., Director de Tesis**

---

Quito, 26 de noviembre de 2023

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos:

Andrés Sebastián Molina Vargas  
Alejandro Quelal Gualotuña  
Daniel Moreno Mogollón

Código:

00135864

00204078

00203604

Cédula de identidad:

1726613894

1718642687

1717853996

Lugar y fecha:

Quito, 21 de diciembre de 2023

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around thesis publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

El siguiente reporte estudia el diseño y construcción de un sensor inercial para aplicaciones médicas. Se utiliza un sensor de 9 ejes, acelerómetro, giroscopio y magnetómetro, para obtener la orientación angular en los 3 ejes cartesianos. El sensor es programado para obtener un interfaz en tiempo real de la orientación y graficar el ángulo obtenido en cada eje con respecto al tiempo de estudio de forma inalámbrica. Se estudia los precios y capacidades de elementos existentes dentro y fuera del país. Con esta información se eligen elementos que puedan darnos la precisión deseada a un bajo costo. El diseño del prototipo incluye la caja, que tuvo que ser rediseñada y construida varias veces de acuerdo con las necesidades, la sujeción que se ve presentada en el prototipo final y la programación. Se utilizan varios programas como MATLAB, HTML y Arduino IDE para obtener los datos deseados. La caja comprime al sensor, el microcontrolador y una batería, y la transmisión de los datos se realiza vía wifi. Se realizan los cálculos geométricos para obtener las orientaciones. Para poder tener una mejor lectura de los datos se estudian filtros que reducen el error por ruido o deriva que vienen de los sensores. Estos filtros son Kalman, Mahony y Madgwick. También se presentan dos formas de comunicación. La primera es API que nos permite monitorear el sistema remotamente y el segundo es IP fijo que nos da una mejor tasa de muestras por segundo. Los filtros son comparados y se determina que el de Mahony es el mejor en nuestro caso por su eficiencia computacional en comparación a Kalman y por su mayor precisión en comparación a Madgwick. Finalmente, se presentan pruebas en un paciente, estudio de mercado y retroalimentación de expertos que representan nuestros potenciales clientes.

**Palabras Clave:** sensor inercial, orientación, inalámbrica, bajo costo, programas, formas de comunicación, pruebas.

## ABSTRACT

The following report studies the design and construction of an inertial sensor for medical applications. A 9-axis sensor, accelerometer, gyroscope and magnetometer is used to obtain the angular orientation in the 3 Cartesian axes. The sensor is programmed to obtain a real-time interface of the orientation and graph the angle obtained in each axis with respect to the study time wirelessly. The prices and capacities of existing elements inside and outside the country are studied. With this information, elements are chosen that can give us the desired precision at a low cost. The prototype design includes the box, which had to be redesigned and built several times according to the needs, the fastening that is presented in the final prototype, and the programming. Various programs like MATLAB, HTML and Arduino IDE are used to obtain the desired data. The box compresses the sensor, the microcontroller and a battery, and the data transmission is carried out via Wi-Fi. Geometric calculations are carried out to obtain the orientations. In order to have a better reading of the data, filters are studied that reduce the error due to noise or drift that comes from the sensors. These filters are Kalman, Mahony and Madgwick. Two forms of communication are also presented. The first is API that allows us to monitor the system remotely and the second is fixed IP that gives us a better rate of samples per second. The filters are compared and it is determined that the Mahony filter is the best in our case due to its computational efficiency compared to Kalman and its greater precision compared to Madgwick. Finally, tests on a patient, market research and feedback from experts who represent our potential clients are presented.

**Keywords:** inertial sensor, orientation, wireless, low cost, programs, forms of communication, tests.

## ÍNDICE GENERAL

Índice General.....	1
Índice de Figuras.....	2
Índice de TABLAS.....	4
1    Introducción.....	5
1.1.1    Objetivos.....	7
1.1.2    Objetivos Generales.....	7
1.1.3    Objetivos Específicos.....	7
1.2    Estándares y Normativa.....	8
1.3    Gestión del proyecto (Planificación).....	9
2    Desarrollo del tema.....	12
2.1    Matriz de selección de materiales y componentes.....	12
2.1.1    Lenguaje de Programación.....	13
2.1.2    Microcontrolador.....	15
2.1.3    Sensores.....	17
2.1.4    Sujeción a Extremidades.....	19
3    Cálculos.....	21
3.1    Sensores.....	21
3.2    Acelerómetro.....	21
3.3    Giroscopio.....	26
3.4    Magnetómetro.....	28
3.5    Cuaterniones.....	29
3.6    Filtro de Kalman.....	29
3.7    Diseño de case para sensores.....	36
3.8    Discusión en base a los cálculos.....	41
4    Análisis DE RIESGOS.....	43
5    Plan de manufactura.....	47
5.1    Diagramas de flujo.....	47
5.2    Hojas de proceso.....	51
	52
5.3    Construcción Electrónica.....	54
5.4    Procedimiento de pruebas básicas para la unidad de medida inercial (IMU).....	55
5.4.1    Prueba estática.....	55
5.4.2    Prueba Dinámica.....	56
5.4.3    Adquisición de Data.....	56
5.4.4    Interpretación de Data.....	57
6    Interfaz con el usuario.....	58
7    Pruebas del prototipo.....	60
7.1    Filtro de Mahony.....	60

7.2	Filtro de Madgwick .....	61
7.3	Test de Filtros .....	61
7.4	Extensión de Pierna .....	64
7.5	Prueba de Marcha .....	67
8	REspuesta del consumidor .....	71
8.1	Respuesta del consumidor local (Ecuador) .....	71
8.1.1	Encuesta a Profesionales .....	72
9	Costos del prototipo .....	74
10	Trabajos futuros .....	76
11	discusiones y conclusiones .....	77
11.1	Discusiones .....	77
11.2	Conclusiones .....	78
12	bibliografía .....	80
13	anexos .....	82
13.1	Código de Programación .....	82
13.2	Planos de la Caja para el Sistema .....	89
13.3	Manual de Operación y Mantenimiento .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Distribución de las actividades .....	11
Figura 2	Microcontrolador ESP32 (izq.) – Arduino Nano (med.) – PIC (der.) .....	17
Figura 3	Sensores: MPU6050 - MPU9250 - LSM9DS1 - BMX055 .....	18
Figura 4	Ligas (izq.) – velcro (med.) – doble faz (der.) .....	20
Figura 5	Ángulos de Euler .....	21
Figura 6	Acelerómetro en el marco de referencia nivelado .....	22
Figura 7	Rotación del sensor .....	23
Figura 8	Velocidad angular en el eje x .....	27
Figura 9	Norte magnético de la tierra y sus componentes con respecto a la orientación del sensor .....	28
Figura 10	Prototipo de case (caja tipo reloj) .....	36
Figura 11	Diagrama de cuerpo libre para viga de PLA en la caja tipo reloj .....	37
Figura 12	Diagrama de Cortante .....	38
Figura 13	Diagrama de Momento .....	39
Figura 14	Mapa de simbología .....	47
Figura 15	Diagrama de flujo general .....	48
Figura 16	Diagrama de flujo detallado .....	50
Figura 17	Algoritmo filtro extendido de Kalman .....	51



Figura 18 Conexión Eléctrica del sensor MPU9250 y el microcontrolador ESP32 .....	54
Figura 19 PCB del circuito indicado en la figura 18 .....	55
Figura 20 Posicionamiento referencial para prueba estática del sistema IMU .....	55
Figura 21 Posicionamiento referencial para prueba dinámica del sistema IMU .....	56
Figura 22 Estructura de archivos para la creación de la interfaz de usuario .....	58
Figura 23 Diagrama del funcionamiento API.....	59
Figura 24 Funcionamiento general del filtro de Mahony.....	60
Figura 25 Funcionamiento general del filtro de Madgwick .....	61
Figura 26 Datos crudos procesados mediante ecuaciones de orientación y filtros .....	62
Figura 27 Ampliación de gráfica para observación de filtros .....	62
Figura 28 Filtro de Madgwick y Mahony .....	63
Figura 29 Error absoluto entre filtro de Madgwick y Mahony.....	63
Figura 30 Ilustración teórica del ejercicio hiperextensión – flexión .....	64
Figura 31 Ilustración practica del ejercicio hiperextensión – flexión.....	64
Figura 32 Gráfica de la orientación para el ejercicio hiperextensión – flexión.....	65
Figura 33 Primera gráfica obtenida de literatura para la comparación de hiperextensión – flexión .....	66
Figura 34 Segunda gráfica obtenida de literatura para la comparación de hiperextensión – flexión .....	66
Figura 35 Ilustración práctica de la prueba de marcha .....	67
Figura 36 Orientaciones obtenidas a partir de la marcha .....	68
Figura 37 Acercamiento de interés a la orientación roll .....	68
Figura 38 Resultado obtenido por McBrath durante un estudio medico .....	69
Figura 39 Mapa Continental basado en Inertial Unit Market .....	71
Figura 40 Tabulación porcentual de la encuesta.....	73
Figura 41 Uso de Goniómetro en extremidades .....	73
Figura 42 Modelo IMU de la empresa WIT MOTION .....	74
Figura 43 Tabulación porcentual del costo total del prototipo .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cronograma de proyecto integrador .....	10
Tabla 2 Criterios Ingenieriles para la elección del lenguaje de programación .....	14
Tabla 3 Características de los microcontroladores .....	16
Tabla 4 Criterios Ingenieriles para la elección del microcontrolador.....	16
Tabla 5 Características de los sensores .....	17
Tabla 6 Criterios Ingenieriles para la elección de los sensores .....	18
Tabla 7 Criterios Ingenieriles para la elección de la sujeción a las extremidades .....	19
Tabla 8 Características del material (PLA) .....	40
Tabla 9 Monitoreo de riesgos operacionales .....	43
Tabla 10 Monitoreo de riesgos técnicos .....	44
Tabla 11 Monitoreo de riesgos comerciales .....	45
Tabla 12 Monitoreo de riesgos ambientales.....	45
Tabla 13 Monitoreo de riesgos con el manejo de recursos .....	46
Tabla 14 Monitoreo de riesgos de seguridad.....	46
Tabla 15 Hoja de proceso para la elaboración del case (Base) .....	52
Tabla 16 Hoja de proceso para la elaboración del case (Tapa) .....	53
Tabla 17 Respuestas a la pregunta de encuesta .....	72
Tabla 18 Referencias personales .....	72
Tabla 19 Cotización sistema (BWT901BCL High-Precision) .....	74
Tabla 20 Descripción unitario del costo del prototipo .....	75

## 1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas con sensores inerciales para rastrear movimiento en una persona puede tener varios beneficios en atención médica y fabricación de elementos que requieran buena ergonomía. Además, se destaca por ser un tema de suma importancia en la realización de estudios biomecánicos como prótesis, sin embargo, está muy poco presente en Ecuador, por lo que el desarrollo de un buen sistema de rastreo puede llevar a la universidad a realizar convenios con la industria que no tenga acceso a la tecnología extranjera. Para ello se diseñará y se construirá un sistema inercial de bajo costo. Su funcionalidad se basará en la medición de ángulos (pitch, roll, yaw). En cuanto a los requerimientos se necesitará que los sensores que se utilicen envíen los datos vía inalámbrica para que no existan cables que interfieran con el movimiento del usuario y que los datos se muestren en una interfaz en vivo.

Rastrear con precisión el movimiento humano se ha transformado en prioridad para distintas aplicaciones como la biomecánica, fisioterapia, robótica, realidad virtual, etc. Esto ha llevado a un rápido avance tecnológico donde el seguimiento de cualquier actividad física se la puede realizar con varios mecanismos como sistemas ópticos, mecánicos, magnéticos e inerciales. Tanto los ingenieros como los doctores vieron el potencial que esto tiene. Terapeutas, deportólogos e incluso veterinarios observaron que una medición precisa de movimiento y caminata puede identificar problemas que antes pasaban por alto.

Los sistemas de rastreo más comunes consisten de sistemas ópticos que son utilizados en distintas industrias debido a su precisión. Sin embargo, utilizar cámaras es solamente útil cuando se encuentra en un ambiente controlado y la visión no es obstaculizada. Por lo tanto, el sensor IMU (Unidad de Medición Inercial) se ha convertido en el módulo básico en los

sistemas de detección de movimiento. Su auge comenzó el siglo pasado donde se identificaban por su gran tamaño y alto costo, pero rápidamente fueron evolucionando hasta el punto de ser muy precisos, versátiles y fáciles de usar.

El sistema IMU puede superar los problemas generados cuando se obstaculiza la visión de la cámara, sin embargo, tiene sus propias limitaciones. Las diversas conexiones impiden un movimiento natural de las extremidades lo cual arroja un resultado experimental que no refleja la situación real de un paciente. Se está investigando constantemente formas de minimizar las restricciones y desarrollar sistemas que puedan ser utilizados para estudiar movimientos naturales en condiciones reales como el galope de un caballo en su hábitat natural, o la brazada de un nadador en la piscina.

El objetivo de este proyecto es superar las deficiencias presentadas al desarrollar un sensor IMU inalámbrico. El sistema será diseñado para poder acoplarse a distintas extremidades y realizar diversos estudios. Se necesitará un microcontrolador y módulos de sensores para registrar el movimiento y transmitirlo por WIFI volviéndolo portátil.

Además, se requiere contrastar los datos obtenidos del sensor IMU con distintas pruebas computacionales y de registro humano. Por otra parte, para un futuro análisis se recomendaría usar la cámara de detección de movimiento (VICON) instalada en la USFQ. Esta comparación evaluará la exactitud y confiabilidad del sensor desarrollado, lo cual es importante en las aplicaciones que requieren mediciones precisas, como la rehabilitación funcional, médica o en cualquier área de la industria que lo requiera.

A medida que se avance con este proyecto, se explorarán los aspectos técnicos para el diseño e implementación del sensor IMU. Los temas para abordar serán; cálculo

cinemático, la comunicación entre controlador y la máquina para el procesamiento de datos, las técnicas de filtrado de Kalman, y los estándares, normas y guías, necesarios para el diseño e implementación. Se planteará y resolverá el desafío de calcular la forward&inverse kinematic de la extremidad, logrando una comprensión integral del movimiento articular. Se analizarán los resultados obtenidos y se contrastaran con los datos obtenidos con la captura de movimiento mediante cámaras infrarrojas, se discutirá su aplicabilidad en la pierna protésica para la cual será diseñado el sensor, con el objetivo de mejorar la accesibilidad de las soluciones de rastreo de movimiento aplicadas a las extremidades humanas.

### **1.1.1 Objetivos**

Un sistema IMU debe proporcionar datos confiables y en tiempo real que permitan la determinación precisa de la posición y actitud de un objeto en el espacio tridimensional. Esto implica la integración de sensores de aceleración y giroscopios de alta precisión para capturar cambios en la velocidad y orientación del objeto. Además, el sistema IMU busca minimizar los errores acumulativos a lo largo del tiempo, garantizando así una estimación confiable y estable de la posición y orientación, incluso en condiciones dinámicas y entornos adversos.

### **1.1.2 Objetivos Generales**

- Diseñar y construir un sistema inalámbrico para la medición de ángulos por medio de sensores inerciales.

### **1.1.3 Objetivos Específicos**

- **Tamaño y Peso Reducidos:** Diseñar un sistema compacto y ligero que pueda adaptarse a diferentes extremidades.

- **Economía:** Sistema de bajo costo.
- **Precisión de Medición:** Mejorar la precisión a través de algoritmos y filtros que brinden confiabilidad de los datos proporcionados por el sistema.
- **Estabilidad a Largo Plazo:** Garantizar que el sistema mantenga su calibración a lo largo del tiempo. Nota: Para este apartado es indispensable que sus pruebas sean constantes, al ser un análisis de desarrollo continuo y de lenguaje (programación) se podría afinar mucho más.
- **Compatibilidad e Integración:** Facilitar la integración entre el módulo de sensores, el controlador y su interfaz de manera conjunta para su funcionamiento.
- **Consumo de Energía Eficiente:** Optimizar el consumo de energía del sistema para garantizar una vida útil de la batería suficiente para las necesidades del usuario.
- **Interfaz de Usuario Intuitiva:** Desarrollar una interfaz de usuario clara y fácil de usar, lo que facilita su operación y mantenimiento.
- **Resistencia a Condiciones Ambientales:** Asegurar que el sistema pueda funcionar de manera confiable en diversas condiciones ambientales, como cambios de temperatura, vibraciones o exposición en ambientes no controlados.

## 1.2 Estándares y Normativa

Es importante tener en cuenta que la aplicación específica de los sensores inerciales influirá en la relevancia de las normativas y estándares. Además, pueden actualizarse con el tiempo, por lo que es crucial consultar las versiones más recientes y las necesarias para una buena aplicación durante el desarrollo de este proyecto.

- **ISO 5725 (Precision of Test Methods and Results):** provee directrices sobre la precisión de los métodos de prueba y los resultados, lo cual es relevante para los sensores inerciales que se utilizan en entornos de prueba y medición.
- **IEEE 2700-2014 (Sensor Performance Parameter Definitions):** define parámetros de rendimiento para sensores, lo cual es útil para evaluar y comparar el rendimiento de los sensores inerciales.
- **IEC 60068 (Environmental Testing):** especifica procedimientos y requisitos para ensayos de robustez ambiental, que pueden ser relevantes para evaluar la resistencia de los sensores inerciales a condiciones ambientales adversas.

### **1.3 Gestión del proyecto (Planificación)**

A continuación, se presenta un diagrama de Gantt que representa el cronograma seguido en la elaboración del proyecto integrador. Antes de desarrollarlo se realiza un exhaustivo trabajo de investigación donde se revisan otros trabajos y se define claramente el problema que se ha propuesto resolver. El primer Milestone del estudio es la implementación del circuito, donde ya se arma la parte mecánica y se conectan todos los circuitos eléctricos. Para llegar a ello, se debe primero seleccionar los elementos que conformaran el sistema y desarrollar los cálculos cinemáticos de la pierna. Estos cálculos se enfocan en cómo obtener una posición y orientación cartesiana dados los ángulos obtenidos con los acelerómetros y viceversa. De tal forma, se convierte la salida del sensor (aceleración) a ángulos. Esto lleva a la adquisición de los elementos y una simulación donde se prueba el diseño del circuito. El segundo Milestone consiste en desarrollar el código de Python y adquirir los primeros datos. Consecuentemente, se analiza la data se reitera y calibra el programa hasta implementar la interfaz del rastreo de movimiento. Se reitera constantemente hasta obtener resultados precisos y el enfoque cambia

a la construcción del sistema de sujeción y la implementación del segundo sensor. El proyecto finaliza con la presentación en la Feria de Ingeniería de la USFQ 2023<sup>10</sup> y la presentación y defensa final. Finalmente, se entrega el portafolio que contiene el conjunto de todo el trabajo mencionado y desarrollado a lo largo del proyecto integrador.

Activities	Start Date	Finish Date	Duration (Days)
Problem description	21-Aug-2023	25-Aug-2023	4
Literature Review	25-Aug-2023	31-Aug-2023	6
Introduction	31-Aug-2023	7-Sep-2023	7
ASME case studio	7-Sep-2023	12-Sep-2023	5
Selection matrices	12-Sep-2023	17-Sep-2023	5
<b>Calculations 1:</b> Forward and inverse kinematics of leg	19-Sep-2023	4-Oct-2023	15
<b>Calculations 2:</b> Measure angles with the MPU9250, Kalman filter (algorithm)	19-Sep-2023	28-Sep-2023	9
<b>Simulation:</b> Circuit design (Tinkercad)	21-Sep-2023	23-Sep-2023	2
<b>Acquisition:</b> Components for the system	22-Sep-2023	23-Sep-2023	1
<b>Milestone 1:</b> Circuit implementation	23-Sep-2023	26-Sep-2023	3
<b>Milestone 2:</b> Sensor programming for data adquisition	26-Sep-2023	15-Oct-2023	19
<b>Milestone 3:</b> Show data and analysis	3-Oct-2023	18-Oct-2023	15
Results verification and calibration	15-Oct-2023	25-Oct-2023	10
<b>Milestone 4:</b> Implementation of the interface for motion tracking	18-Oct-2023	7-Nov-2023	20
<b>Milestone 5:</b> Design and construction of the sensor case	2-Nov-2023	9-Nov-2023	7
<b>Milestone 6:</b> Implementation of the second sensor	5-Nov-2023	25-Nov-2023	20
Engineering fair	25-Nov-23	30-Nov-23	5
Thesis presentation and defense	1-Dec-2023	15-Dec-2023	14
Project portfolio	19-Sep-2023	20-Dec-2023	92

Tabla 1 Cronograma de proyecto integrador



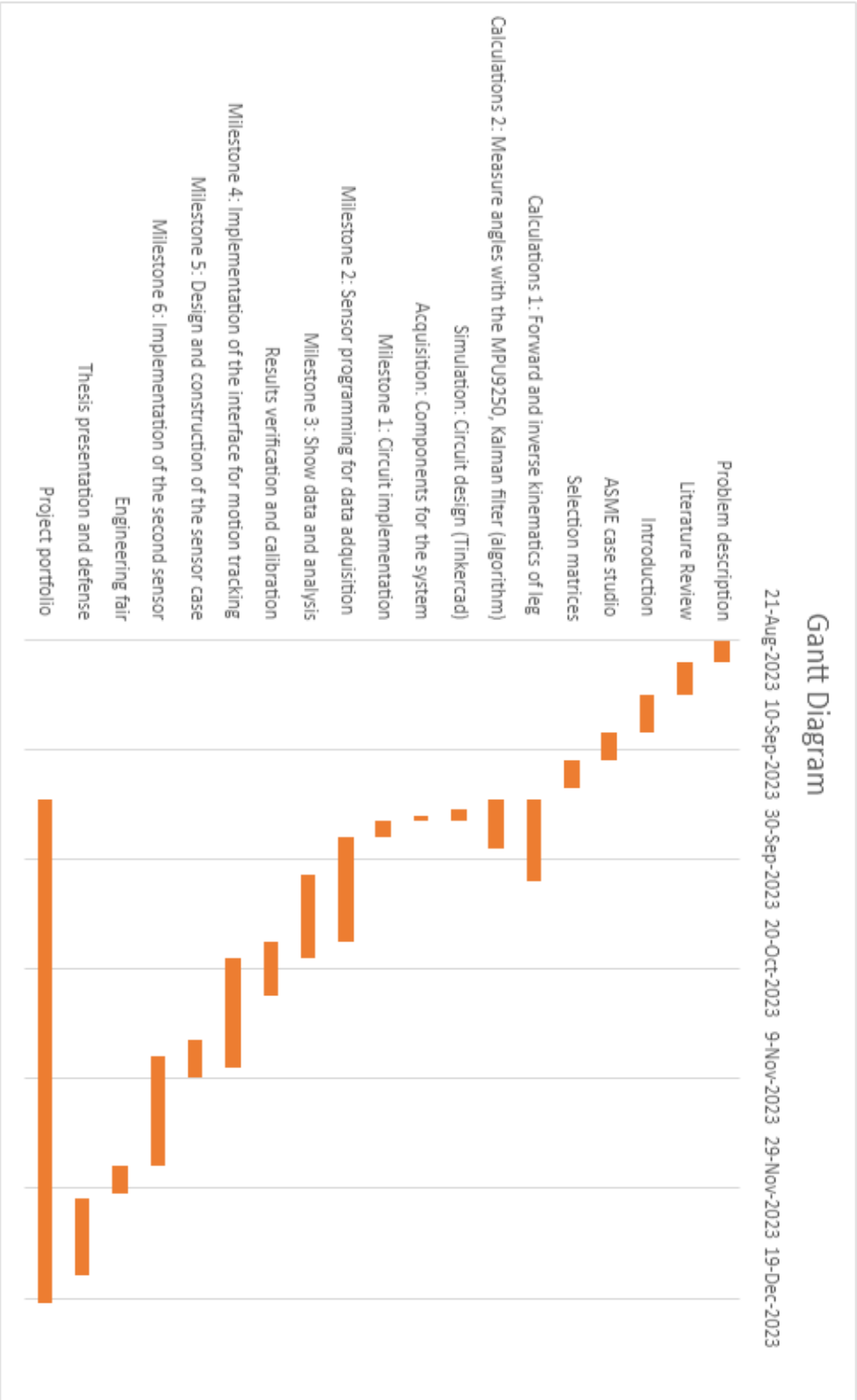


Figura 1 Distribución de las actividades

## **2 DESARROLLO DEL TEMA**

Tras revisar varias reseñas y literatura el enfoque del trabajo es desarrollar un sistema funcional con sensores inalámbricos ya que la mayoría de referencias denotan la realización de prototipos básicos, estos modelos se caracterizaban por el uso de cables, códigos que presentaban resultados con delay y poca precisión. Los sensores alámbricos solamente pueden realizar ciertos estudios donde los cables no afectan movilidad, pero siempre y cuando se encuentren en un ambiente controlado. Por lo tanto, lo ideal es hallar una forma de poder monitorear movimientos sin la necesidad de estar una estación de trabajo, incluso se podría tomar en cuenta espacios de fauna en distintas hábitat para animales y personas fuera de zonas urbanas. Por otra parte, se necesitará de conceptos teóricos de un acelerómetro (tres ejes), giroscopio (seis ejes entre ambos) o nueve ejes con la inclusión de un magnetómetro indispensable para dar orientación respecto a un campo. Estos dispositivos son la base de partida en el proceso del sistema, además de la programación, sujeción y pruebas que demostraran su eficacia más adelante. Cabe recalcar que es un dispositivo de medición existente en el mercado internacional, sin embargo, su alto costo hace que pocos lo puedan adquirir o en muchos casos ni conocerlo.

### **2.1 Matriz de selección de materiales y componentes**

En esta sección se analizarán los elementos que componen el sensor IMU y los criterios que se implementa al seleccionar cada uno. El sensor IMU utilizado para estudios médicos y veterinarios tiene 4 componentes principales que se debe considerar al armarlo. El primero es el lenguaje de programación donde se considerará la facilidad con la que se puede desarrollar el código y su precisión al aplicarlo. Se toma en cuenta el microcontrolador que

se utilizará dado que este es el cerebro del sistema y debe ser compatible con todos los subsistemas relacionados y con el presupuesto adquirido. El tercer elemento que se debe seleccionar es el sensor. Los acelerómetros tienen diferentes alcances a distintas precisiones y costos, por lo que se debe encontrar un equilibrio que permita desarrollar el IMU adecuadamente. Finalmente, se considera el método de sujeción del sistema al acoplarse a un humano debido a que esto puede tener un gran impacto en la ergonomía y en la precisión a lo largo de los estudios.

Para cada elemento, se determina los criterios más importantes al momento de seleccionarlos. Estos reciben un peso porcentual relacionado a su importancia. A continuación, se presentan las matrices de selección para el sistema IMU, en donde se dará una calificación entre 1 & 5, la cual se establece como 1 lo menos aceptable y 5 lo mejor una vez ponderado cada criterio.

### **2.1.1 Lenguaje de Programación**

En primer lugar, debemos determinar el lenguaje de programación en la cual se manejarán y analizarán los datos. Para ello evaluaremos los siguientes criterios:

**Open source:** Es primordial determinar si nuestro lenguaje de programación es de código abierto o pagado.

**Sintaxis:** Debemos conocer las reglas que deben seguirse al escribir en el código fuente, así como, la sintaxis correcta del lenguaje del programa que se elija.

**Manejo de las estructuras de datos:** Se valorará la facilidad de manejo y análisis de datos en el sentido con el propósito de establecer conclusiones acerca de la información obtenida por el sensor.

**Manejo de los cálculos:** se evaluará la facilidad para realizar cálculos matemáticos y herramientas para aplicaciones científicas.

**Aplicación a la interfaz gráfica de usuario:** debemos medir la factibilidad del programa para presentar los datos, obtenidos del sensor, en forma de graficas o imágenes que sean amigables con el usuario.

**Comunicación entre el microcontrolador y el pc:** Valoraremos los protocolos de comunicación, usados por el programa a elegir, necesarios para la comunicación entre la pc y nuestro microcontrolador.

**Información al respecto:** Juzgaremos la literatura, información y recursos que tratan acerca del uso de sensores de medición inercial destinados al rastreo de movimiento.

Crterios ingenieriles	% de Importancia	Arduino IDE	Ponderación	MATLAB	Ponderación
Open source	20%	5	1	0	0
Sintaxis	5%	5	0.25	3	0.15
Manejo de estructuras de datos	20%	5	1	3	0.6
Manejo de cálculos	10%	3	0.3	5	0.5
Aplicación a la interfaz gráfica de usuario	20%	5	1	4	0.8
Comunicación entre microcontrolador y pc	15%	5	0.75	4	0.6
Información al respecto	10%	4	0.4	5	0.5
Evaluación total:	100%	32	4.7	24	3.15

*Tabla 2 Criterios Ingenieriles para la elección del lenguaje de programación*

La principal diferencia entre Arduino IDE y Matlab es que el primero tiene amplia variedad de aplicaciones mientras que Matlab se centra en cálculos y aplicaciones ingenieriles y científicas. En el ponderado de la tabla 2 se da un peso mayor cuando el sistema es open-source, dado que esto significa que todo el mundo tiene acceso al lenguaje y código. El

manejo de estructuras de datos es igual de importante para un proyecto en el que se requiere obtener e interpretar al menos cien datos por segundo en tiempo real. En los dos casos se obtiene una buena razón para utilizar IDE sobre Matlab. De la misma forma, se encuentra que la aplicación a la interfaz gráfica del usuario y comunicación entre microcontrolador y pc es superior al utilizar IDE por lo que se obtiene resultados más completos y simplificados. Matlab saca ventaja en manejo de cálculos e información al respecto, que son dos aspectos menos importantes ya que se puede compensar con investigación y aplicaciones recursivas. Finalmente se pesa con un valor de tan solo 5% la sintaxis ya que puede significar un mejor entendimiento del lenguaje. Sin embargo, no se descarta la utilización de Matlab para plasmar gráficas con los datos obtenidos durante las pruebas del prototipo y así mismo el uso de HTML para la creación de una interfaz básica.

### **2.1.2 Microcontrolador**

Se presenta una tabla previa a la selección donde se evaluará y especificará características de los sensores:

**Precio:** en necesario examinar el precio de cada microcontrolador y su disponibilidad en el mercado.

**Conexión WIFI:** se evaluará la habilidad con la conexión WIFI de cada microcontrolador.

**Conexión con Arduino IDE:** se evaluará la factibilidad de conexión con el programa Arduino.

**Comunicación entre microcontrolador y pc:** se medirá la facilidad de conexión entre el microcontrolador, el pc y Arduino IDE.

**Información al respecto:** Juzgaremos la literatura, información y recursos que tratan acerca del uso de sensores de medición inercial destinados al rastreo de movimiento.

Información	ESP32	Arduino Nano	PIC
Precio	\$14	\$13	\$5
Conectividad bluetooth	SI	N/A	N/A
Conectividad WIFI	SI	N/A	N/A
RAM	512 KB	2 KB	0.5 KB

Tabla 3 Características de los microcontroladores

Criterios ingenieriles	% de Importancia	ESP32	Ponderación	Arduino Nano	Ponderación	PIC	Ponderación
Precio	20%	3	0.6	3	0.6	5	1
Conectividad WIFI	20%	3	0.6	3	0.6	3	0.6
Conexión con Python	15%	4	0.6	3	0.45	2	0.3
Información al respecto	20%	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Comunicación entre microcontrolador y pc	25%	4	1	2	0.5	1	0.25
Evaluación total:	100%	17	3.4	13	2.55	13	2.55

Tabla 4 Criterios Ingenieriles para la elección del microcontrolador

El primer criterio que se observa es precio con un peso de 20%. Es un factor importante debido al presupuesto del proyecto, sin embargo, no hay una gran diferencia entre sensores para hacer una decisión debido solo a eso. El sensor ESP32 obtiene ventaja en el resto de los criterios ya que se tiene una mejor conexión a Arduino IDE, hay más información al respecto y una mejor comunicación con la PC. El factor más importante; conectividad WIFI y el procesamiento de datos rápido para aplicaciones complejas por lo que se decide de forma definitiva usarlo en el proyecto.



Figura 2 Microcontrolador ESP32 (izq.) – Arduino Nano (med.) – PIC (der.)

### 2.1.3 Sensores

Se presenta una tabla previa a la selección donde se especifican características de los sensores:

**Precio:** examinaremos le precio de cada sensor en el mercado nacional.

**Facilidad de adquisición:** evaluaremos la facilidad con la que se consigue cada sensor en el mercado nacional.

**Datasheet:** mediremos cuan claros y explicativos son los datasheet de cada uno de los sensores.

**Información al respecto:** evaluaremos la cantidad de recursos y literatura disponible acerca de cada sensor.

**Precisión:** ponderaremos la sensibilidad y precisión de cada sensor en pro de la aplicación y limitación que tiene el proyecto.

Información	MPU6050	MPU9250	LSM9DS1	BMX055
Acelerómetro	3 ejes	3 ejes	3 ejes	3 ejes
Giroscopio	3 ejes	3 ejes	3 ejes	3 ejes
Magnetómetro	N/A	3 ejes	3 ejes	3 ejes
Precio	\$4	\$13	\$40-500	\$20

Tabla 5 Características de los sensores

Criterios ingenieriles	% de Importancia	MPU 6050	Ponderación	MPU 9250	Ponderación	LSM 9DS1	Ponderación	BMX 055	Ponderación
Precio	20%	5	1	4	0.8	1	0.2	2	0.4
Nivel de facilidad de adquisición	20%	5	1	5	1	3	0.6	2	0.4
Datasheet	15%	5	0.75	5	0.75	4	0.6	2	0.3
Información al respecto	20%	5	1	5	1	4	1	3	0.6
Precisión	25%	3	0.75	4	1	5	1.25	3	0.75
Evaluación total:	100%	23	4.5	23	4.55	17	3.65	12	2.45

Tabla 6 Criterios Ingenieriles para la elección de los sensores

En la tabla anterior se presenta los criterios más importantes para determinar que sensores utilizar y sus respectivos ponderados. A primera vista se observa que el precio de un sensor LSM9DS ya lo elimina como opción. Al comparar la facilidad de adquisición, datasheet e información al respecto los sensores MPU605 y MPU9250 obtienen un puntaje máximo haciéndolos opciones viables. La diferencia se obtiene al comparar la precisión de cada uno, ya que es el aspecto más importante de la tabla. Esto se debe a que los sensores deben medir cambios de posición pequeños con una gran exactitud. El sensor MPU9250 justifica la razón para ser un poco más caro y se lo elige como el sensor a utilizar en el proyecto. Cuenta con 9 grados de libertad y es de presión atmosférica lo que mejora la precisión de la orientación del objeto, es fácil de conseguir y tiene un precio accesible.



Figura 3 Sensores: MPU6050 - MPU9250 - LSM9DS1 - BMX055



### 2.1.4 Sujeción a Extremidades

La sujeción de los sensores depende de tan solo tres aspectos importantes:

**Ergonomía:** condición de adaptación, en beneficio y comodidad del usuario a probar el sistema.

**Costo:** dependerá del mercado, pero en general son productos de fácil acceso.

**Fijación:** que tan firme queda a las extremidades; el de menos vibración en movimiento.

Criterios ingenieriles	% de Importancia	Ligas (bandas elásticas)	Ponderación	Cinta Velcro	Ponderación	Cinta doble faz	Ponderación
Ergonomía	40%	1	0.4	5	2	3	1.2
Costo	20%	5	1	4	0.8	4	0.8
Fijación	40%	3	1.2	5	2	5	2
Evaluación total:	100%	9	2.6	14	4.8	12	4

*Tabla 7 Criterios Ingenieriles para la elección de la sujeción a las extremidades*

El costo, la fijación y la ergonomía tienen un gran impacto en la precisión y comodidad del sistema en las extremidades. El uso de ligas, aunque barato, no cumpliría con los objetivos del proyecto ya que sería dañino en usos prolongados llegando a lastimar. La cinta velcro es fácil de adaptar y cómodo de usar, haciéndola la primera opción en estos casos. Sin embargo, la cinta velcro se hace obsoleta al intentar ponerla alrededor del torso. En este caso se tendrá que dar uso de la cinta doble faz para no incomodar al usuario de forma innecesaria.



*Figura 4 Ligas (izq.) – velcro (med.) – doble faz (der.)*

### 3 CÁLCULOS

#### 3.1 Sensores

Es imprescindible conocer el funcionamiento y los datos que se obtienen del módulo de sensores MPU9250 los cuales serán: fuerza gravitacional (medida por el acelerómetro), velocidad angular (medida por el giroscopio) y campo magnético (medido mediante el magnetrón). Se debe determinar los ángulos que forma con respecto a la posición inicial del plano nivelado la cual vendrá determinada por la gravedad y el campo magnético de la tierra. Cada uno de los sensores integrados tendrá su método de cálculo y determinará los ángulos pitch (inclinación, cabeceo), roll(balaceo), yaw(viraje). Así se observa en la figura 5.

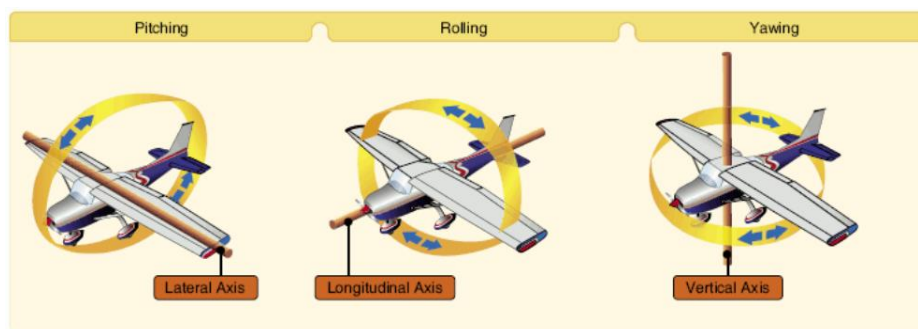


Figura 5 Ángulos de Euler

*Turbulence.* (2023). Weather.gov

[https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU\\_Training\\_Page/turbulence\\_stuff/turbulence/turbulence.htm](https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/turbulence_stuff/turbulence/turbulence.htm)

#### 3.2 Acelerómetro

Un acelerómetro funciona según el principio de la fuerza inercial: dentro del dispositivo hay una masa suspendida que puede moverse libremente. Cuando el dispositivo se acelera en una dirección específica, la masa interna tiende a permanecer en su posición original debido a su inercia, creando una fuerza proporcional a la aceleración experimentada.

Esta fuerza se convierte en una señal eléctrica que se interpreta digitalmente, proporcionando datos precisos sobre la aceleración y su dirección. Dado que la masa es constante cada conductor que entra en contacto con ella conduce una carga directamente proporcional a la fuerza ejercida en el determinado eje.

Con este módulo se determina el ángulo de inclinación del sensor con respecto al piso como se muestra en la figura 2. Se asume que el acelerómetro permanece estacionario, por tal razón, solo mide la fuerza debida a la gravedad. El sensor solo puede medir los ángulos de balanceo y cabeceo.

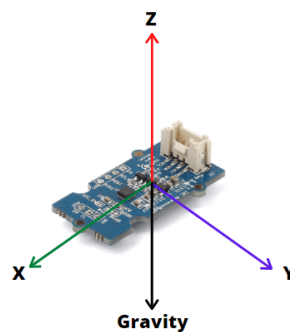


Figura 6 Acelerómetro en el marco de referencia nivelado

Yida. (2020, June 17). *How to use an MPU9250 Accelerometer and Gyroscope With Arduino - Latest Open Tech From Seeed*. Latest Open Tech from Seeed. <https://www.seeedstudio.com/blog/2020/06/17/how-to-use-an-mpu9250-accelerometer-and-gyroscope-with-arduino/>

Ahora imaginemos el módulo MPU9250 inclinado con respecto al suelo como se indica en la figura 6. Para representar la orientación del sensor en el espacio se debe usar ángulos de Euler que es un método para determinar los ángulos formados con los ejes nivelados (x y z), consecuencia de una rotación realizada en un orden específico en cada eje rotado (x' y' z'). Se usa la matriz coseno dirección de ángulo de Euler 3-2-1 (la rotación 321

se realizará primero rotando el eje z en segundo lugar el eje y' y finalmente se rotará con respecto a x'') para transformar el marco de referencial inclinado a un marco referencial nivelado. Las rotaciones con respecto a cada uno de los ejes vendrán dadas por las siguientes matrices. Donde la expresión  $c\theta$  expresa el coseno del ángulo  $\theta$  de la misma forma con el  $s\theta$  que es el  $\sin\theta$ .

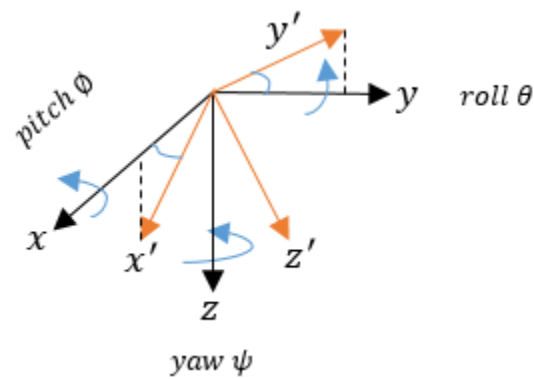


Figura 7 Rotación del sensor

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix}$$

$$R_y = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrices de rotación para cada eje

Ignoramos la matriz de rotación con respecto al eje z,  $R_z$ , debido a que el sensor no revela información acerca de la rotación en el eje z yaw (viraje) pues la referencia de la

gravedad siempre apunta en la misma dirección lo que no es suficiente para conocer la orientación. Por ello se necesitará un magnetómetro que se analizará posteriormente.

Ahora la matriz de rotación viene dada por la ecuación 1

$$R = R_y * R_x = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ -s\phi s\theta & c\phi & -s\phi c\theta \\ c\phi s\theta & -s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix}$$

Ecuación 1: Matriz de Rotación 321

Si tomamos en cuenta que la única fuerza que actúa es la fuerza de la gravedad debida al peso de las masas de pruebas móviles que se encuentran en el sensor. Podemos expresar esa aceleración gravitacional en el marco de referencia nivelado del suelo con la siguiente expresión

$$\vec{g} = [0 \quad 0 \quad g]$$

Ahora expresamos las medidas del acelerómetro en cada eje como en la expresión

$$\vec{a} = [a_x \quad a_y \quad a_z]$$

Ahora mediante la ecuación 2 convertiremos el marco de referencia inclinado a uno nivelado.

$$\vec{a} = R * \vec{g}$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ -s\phi s\theta & c\phi & -s\phi c\theta \\ c\phi s\theta & -s\phi & c\phi c\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{pmatrix}$$

Ecuación 2: rotación 321 marco de referencia inclinado

Ahora resolviendo en Matlab obtenemos que:

$$a_x = g \sin(\theta) \quad (a)$$

$$a_y = -g \sin(\phi) \cos(\theta) \quad (b)$$

$$a_z = -g \cos(\phi) \cos(\theta) \quad (c)$$

De la ecuación  $a$  resolviendo para el ángulo theta obtenemos la siguiente expresión

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a_x}{g}\right)$$

Debido a que el sensor es estacionario no existe aceleración. Solo existe la aceleración gravitacional y esta expresión del módulo de la gravedad vendrá dada por la siguiente ecuación.

$$g = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Ecuación 3: módulo de la gravedad en el plano inclinado

Por lo tanto, el ángulo de cabeceo vendrá dado por la ecuación 4:

$$\mathbf{Pitch} = \theta = \arcsin \left( \frac{\mathbf{a}_x}{\sqrt{\mathbf{a}_x^2 + \mathbf{a}_y^2 + \mathbf{a}_z^2}} \right)$$

Ecuación 4: ángulo pitch calculación acelerómetro

Usamos la ecuación *b* y *c* las dividimos entre sí y obtenemos, la ecuación 5, el ángulo de roll

$$\frac{a_y}{a_z} = \frac{-g \sin(\phi) \cos(\theta)}{-g \cos(\phi) \cos(\theta)} = g \tan(\phi)$$

$$\mathbf{Roll} = \phi = \arctan \left( \frac{\mathbf{a}_y}{\mathbf{a}_z} \right)$$

Ecuación 5: ángulo roll calculación acelerómetro

### 3.3 Giroscopio

El sensor de giroscopio en el módulo MPU9250 utiliza tecnología MEMS para medir la velocidad angular en tres ejes (X, Y y Z). Consiste en una estructura microscópica suspendida que se mueve cuando el módulo se rota, generando una señal eléctrica proporcional a la fuerza de Coriolis. Esta señal se convierte en valores digitales que representan las tasas de rotación en los tres ejes, proporcionando información precisa sobre la velocidad angular y la orientación del dispositivo en el espacio tridimensional.

Para calcular el ángulo mediante las lecturas del giroscopio como se muestra en la figura 4 y podemos valerlos de la ecuación



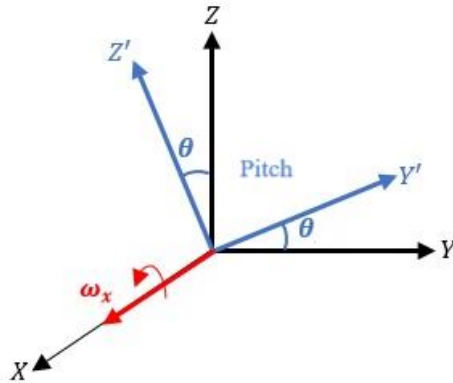


Figura 8 Velocidad angular en el eje x

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuación 6: Velocidad angular

Desarrollando y resolviendo la ecuación 6. Para el pitch angle  $\theta$  obtenemos la ecuación 7

$$\mathbf{Pitch} = \theta = \theta_0 + \omega_x \Delta t$$

Ecuación 7: ángulo pitch calculación giroscopio

De la misma forma, desarrollando y resolviendo la ecuación 6 para el roll angle  $\phi$  obtenemos la ecuación 8.

$$\mathbf{Roll} = \phi = \phi_0 + \omega_y \Delta t$$

Ecuación 8: ángulo roll calculación giroscopio

### 3.4 Magnetómetro

Es un sensor que mide la intensidad y la dirección del campo magnético en su entorno. Funciona utilizando principios físicos como el efecto Hall o la inducción electromagnética. Cuando el magnetómetro se expone a un campo magnético, genera una señal eléctrica proporcional a la intensidad del campo magnético en esa ubicación específica. Al combinar múltiples mediciones de diferentes direcciones, el magnetómetro puede determinar la orientación y la fuerza del campo magnético en el espacio tridimensional

Con el magnetómetro obtendremos el ángulo yaw (viraje). Podemos observar en la figura 9 el diagrama para determinar el ángulo que forma el norte magnético de la tierra con respecto a la orientación del sensor.

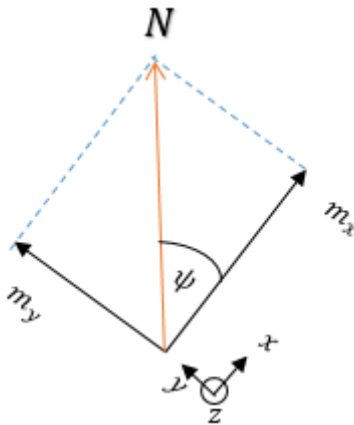


Figura 9 Norte magnético de la tierra y sus componentes con respecto a la orientación del sensor

De la figura 9 podemos determinar la ecuación 9

$$Yaw = \psi = \arctan\left(\frac{m_y}{m_x}\right)$$

Ecuación 9: ángulo yaw cálculo magnetómetro

### 3.5 Cuaterniones

La única manera de representar rotaciones no solo es mediante los ángulos de Euler existe una herramienta matemática llamada cuaterniones. Esta forma de representar rotaciones tiene ventajas significativas con respecto a los ángulos de Euler, eliminan el bloqueo de gimbal (para ciertas secuencias específicas de rotaciones alrededor de ejes fijos pueden llevar a la pérdida de un grado de libertad) así como la capacidad de interpolar entre dos rotaciones de manera suave y eficiente (interpolar entre dos cuaterniones para crear una animación o una transición suave de una orientación a otra, encontrar la ruta más corta entre dos orientaciones para evitar movimientos innecesarios o giros largos). Los cuaterniones son representados como la siguiente ecuación:

$$a + bi + cj + dk$$

Donde a, b, c, d representan números reales mientras que **i**, **j**, **k** son los vectores base que satisfacen las reglas:

$$i^2 = j^2 = k^2$$

$$ijk = -1$$

### 3.6 Filtro de Kalman

Las fórmulas presentadas anteriormente de pitch, roll and yaw dan una posición y un ángulo resultante con los datos obtenidos de los sensores. Estos sensores, sin embargo, como cualquier herramienta está sujeto a dos tipos de errores. El primer error es el de ruido, donde los datos varían ligera y aleatoriamente y solo al sacar una media se estima un resultado real. El segundo error es el sesgo, donde la herramienta proporciona resultados con una imprecisión puntual. Estos errores no generan, en nuestro caso, problemas al comienzo. Sin

embargo, si se utilizan las fórmulas con el tiempo los datos van a irse alejando del resultado real por lo que hay que iterar y compensar constantemente. Para este propósito se utiliza el Filtro de Kalman. Si bien hay varios filtros que pueden aproximar los resultados estos tienen sus límites. Los datos que obtenemos deben ser considerados que tienen una media móvil por lo que se consideró un filtro de Media Móvil. Sin embargo, el filtro no reacciona a tiempo real, es decir, que cuando la posición varía mucho el filtro responde a ello y entrega los datos con demora. En aplicaciones de tiempo real se requiere un algoritmo que en vez de reaccionar a los resultados anteriores pueda predecir su comportamiento para llegar a una aproximación certera. Para compensar lo mencionado se considera el filtro de media móvil exponencial donde se determina que los datos deben tener un peso o importancia determinado. Se aplica un valor (alfa) definido entre 0 y 1 que sirve, “como un peso que determina la cantidad de información de la nueva medición debe contribuir al valor medio actual” (Franklin. W, 2022, p. 13). La ecuación 10 muestra que mientras mayor sea el alfa menos contribuye ese valor a la nueva estimación.

$$\bar{y}_k = \alpha \bar{y}_{k-1} + (1 - \alpha) \bar{y}_k \quad (10)$$

Es decir, que el algoritmo itera para cada nueva estimación y determina el peso que este debe tener. De tal forma, la ecuación 10 se reemplaza por:

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_p + k_2(z_2 - H\bar{x}_p) \quad (11)$$

Determinar el valor de alfa que se debe usar es distinto para cada estudio dado que hacerlo incorrectamente significa que va a reaccionar mal a cambios inmediatos o no va a compensar para el ruido.

El Filtro de Kalman que se utiliza tiene una aborda una estimación muy similar al filtro de media móvil exponencial (Ecuación 11) pero “la ponderación de las medias y la estimación anterior está determinada por la Ganancia de Kalman en lugar de un valor alfa puntual” (Franklin. W, 2022, P.14). En términos generales el Filtro de Kalman consiste en 5 pasos:

- 1) Inicialización
- 2) Reiniciación
- 3) Predicción
- 4) Computación de la Ganancia de Kalman
- 5) Estimación

Para iniciar el algoritmo se debe primero definir las variables de estado iniciales. Estas incluyen posición velocidad, ángulo y orientación. El sistema se va a iniciar y calibrar siempre cuando la extremidad se encuentra estirada completamente de forma vertical. De tal manera se inicia con una velocidad y ángulo 0. También se toma esa posición inicial como la posición 0 en los 3 ejes.

El algoritmo presenta la posición en espacio cartesiano en una columna vectorial para la parte superior e inferior de la pierna donde el subíndice u representa la parte superior y el subíndice l representa la parte inferior. El subíndice m representa que es una medida.

$$z_{um1} = \begin{bmatrix} X_{1mk} \\ Y_{1mk} \\ Z_{1mk} \end{bmatrix}; z_{lm1} = \begin{bmatrix} X_{2mk} \\ Y_{2mk} \\ Z_{2mk} \end{bmatrix}.$$

De la misma forma se debe definir la orientación o ángulos de Euler que representan el “roll, pitch and yaw” asociado.

$$w_{um1} = \begin{bmatrix} \varphi_{1mk} \\ \theta_{1mk} \\ \psi_{1mk} \end{bmatrix}; w_{lm1} = \begin{bmatrix} \varphi_{2mk} \\ \theta_{2mk} \\ \psi_{2mk} \end{bmatrix}.$$

De tal forma, el vector de estado  $x$  es:

$$x = \begin{bmatrix} X_{1k} \\ Y_{1k} \\ Z_{1k} \\ \varphi_{1k} \\ \theta_{1k} \\ \psi_{1k} \\ X_{2k} \\ Y_{2k} \\ Z_{2k} \\ \varphi_{2k} \\ \theta_{2k} \\ \psi_{2k} \\ \beta \end{bmatrix}$$

Donde el ángulo inicial entre los señores ( $\beta$ ) es igual a 0.

El siguiente paso es definir el Modelo de Transición de Estado (P). El modelo de transición de estado describe cómo evolucionan las variables con el tiempo en función de la dinámica del movimiento de la extremidad. Esta matriz va a relacionar las ecuaciones de movimiento o relaciones cinemáticas que rigen el comportamiento de la extremidad. De tal forma, es ahí donde computan las relaciones obtenidas anteriormente en las ecuaciones para pitch, roll and yaw. Se inicializa el modelo de estimación de estado y covarianza  $X_0$  tomando en cuenta las suposiciones iniciales.

$$x_0 = \begin{bmatrix} X_{1k} \\ Y_{1k} \\ Z_{1k} \\ \varphi_{1k} \\ \theta_{1k} \\ \psi_{1k} \\ X_{2k} \\ Y_{2k} \\ Z_{2k} \\ \varphi_{2k} \\ \theta_{2k} \\ \psi_{2k} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La varianza y covarianza asociada (P) y el desfase de tiempo (t) desde que se tomó la medida también se proporciona con el algoritmo donde m define que el parámetro viene de una medición y k es el número de medida tomado.

$$t_k = t_{mk}$$

$$P_k = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\psi1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{x2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{y2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{z2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\phi2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\theta2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\psi2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\beta}^2 & 0 \end{bmatrix}$$

Para la siguiente predicción se utiliza el cambio de tiempo ente las medidas y la relación anterior relacionada al vector  $x$  inicial dado que todavía los datos son insuficientes y se deben tomar en cuenta las suposiciones iniciales.

Cuando se toma la tercera medición la estimación del estado del sistema se propaga hacia adelante en el tiempo para alinearse con la medición. De tal forma, se las puede combinar.

$$x_p = Ax_{k-1} \quad (12)$$

$$P_p = APx_{k-1}A^T + Q \quad (13)$$

Para recapitular, los primeros 2 datos se basan en las condiciones iniciales y asunciones para tener las primeras aproximaciones (P). Con el sistema ya corriendo, sin embargo, se empieza a utilizar la Ganancia de Kalman como un filtro que determina el peso



que tendrá cada dato nuevo a partir de la matriz de covariancia (A) y la matriz de Covarianza de Ruido del Proceso (Q) que representa el ruido aleatorio del modelo del sistema. El modelo del sistema es un valor aproximado que fluctúa en precisión, por lo que Q representa la incertidumbre.

La siguiente matriz utilizada es la Matriz de Medición (H) que relaciona las variables del estado del sistema con las mediciones realizadas por los sensores. Cada fila de esta matriz define cómo reacciona una medición específica con las variables de estado. En resumen, la matriz (Q) se utiliza para modelar la incertidumbre en la evolución del estado del sistema con el tiempo en la fase de predicción. Mientras tanto, la matriz H se utiliza en la fase de actualización para relacionar las variables de estado con las mediciones. Define cómo las mediciones se esperan basadas en el estado estimado actual. La elección adecuada de estas dos matrices es crucial para el funcionamiento eficaz del filtro, por lo que se las van modificando y replanteando en el desarrollo práctico para llegar a resultados más precisos.

Con las matrices ya determinadas se puede empezar a computar la Ganancia de Kalman,

$$K_k = P_p H^T (H P_p H^T + R_k)^{-1} \quad (14)$$

Donde la matriz P representa el último estado de covarianza y R las últimas mediciones tomadas. La ganancia, que se calcula para cada medición y predicción, se utiliza para estimar el estado del sistema y la matriz de covarianza de error para el tiempo de la medición de entrada.

$$x_k = x_p + K_k(z_k - Hx_p) \quad (15)$$

La ecuación (15) da el resultado final de cada estimación.  $x_k$  es un vector conformado por el output actualizado de cada variable inicial.

$$P_k = KHP_p \quad (16)$$

La ecuación (16) se utiliza para actualizar la matriz de varianza y covarianza asociada ( $P_k$ ) que se utiliza para iterar nuevamente las estimaciones, la Ganancia de Kalman y finalmente el output resultante.

### 3.7 Diseño de case para sensores

En esta sección se presentará el diseño de la caja que guarda los componentes electrónicos para la colocación en las extremidades del usuario:

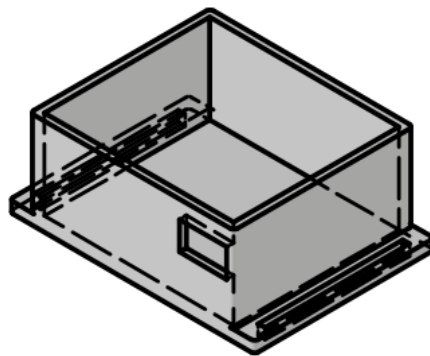


Figura 10 Prototipo de case (caja tipo reloj)

Para encontrar el esfuerzo ejercido por la cinta velcro hacia la rodilla tendremos que analizar la fuerza aplicada: se tiene un caso a flexión con una carga puntual. Teniendo en cuenta que es un amarre y que podría variar, la literatura de pruebas realizada para ajuste y agarre de mano realizadas con un dinamómetro se tiene en promedio 20 kg lo que en fuerza serian 196 N.

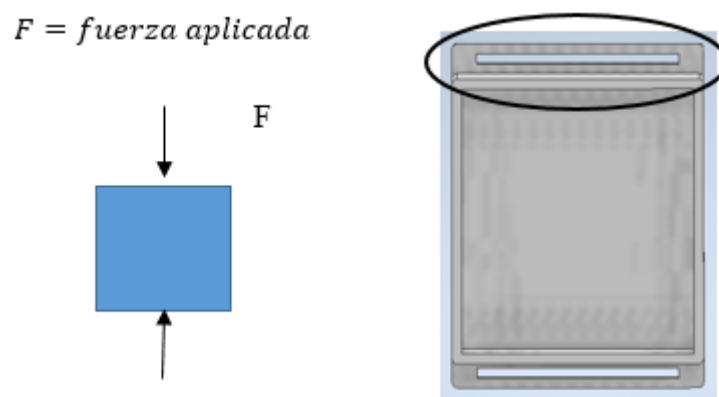


Figura 11 Diagrama de cuerpo libre para viga de PLA en la caja tipo reloj

Las longitudes que tenemos son:



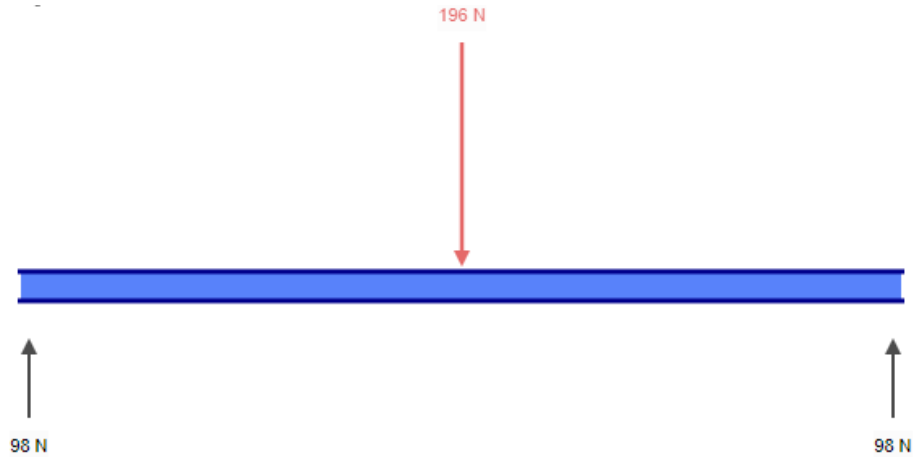


Diagrama cortante:

Esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de una viga.

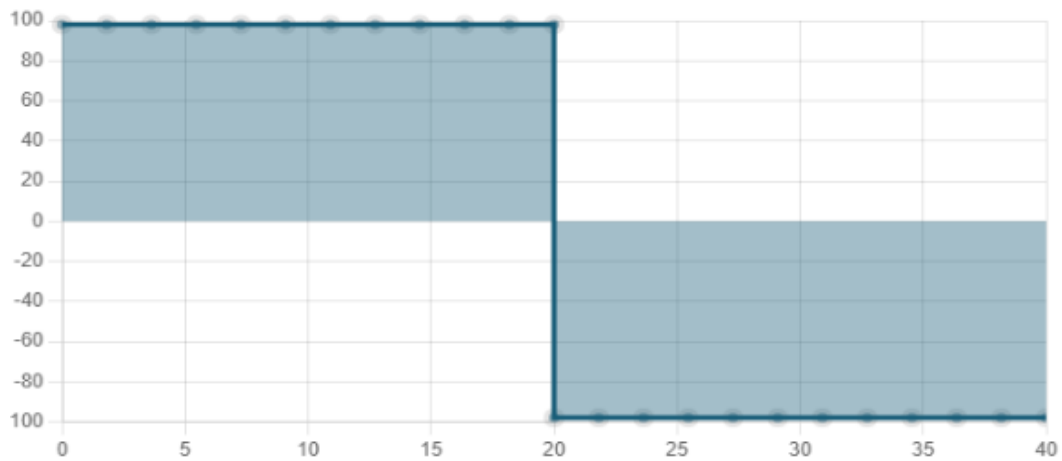


Figura 12 Diagrama de Cortante

Diagrama de Momento:

Corresponden siempre a secciones de fuerza constante nula y pueden obtenerse a partir de igualar a cero la derivada de la solución analítica la cual siempre la distribución de la fuerza cortante.

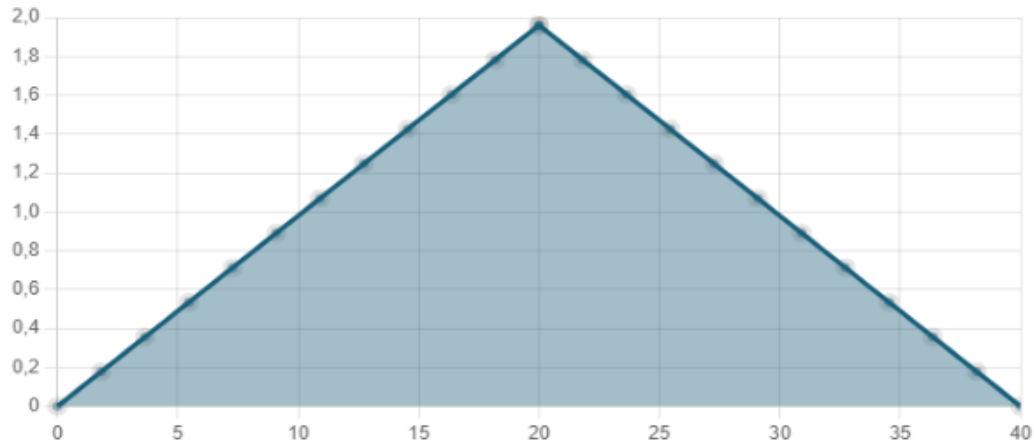


Figura 13 Diagrama de Momento

Para calcular el momento máximo tenemos que sacar el área del rectángulo del diagrama cortante, por lo que tenemos base por altura:

$$M_{max} = 20 \text{ mm} \times 98 \text{ N} = 1960 \text{ Nmm}$$

Inercia:

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{40 \times 3^3}{12} = 90 \text{ mm}^4$$

Esfuerzo:

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma = \frac{1960 \text{ Nmm} \times (1.5 \text{ mm})}{90 \text{ mm}^4} = 32.67 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad:

El material elegido es con el que se realizara la impresión 3D, para ello se decidió un PLA y sus características son las siguientes:

Mechanical properties of polylactic acid (PLA).

Mechanical Property	Value
Yield strength	60 MPa
Elongation at break	6%
Tensile modulus	3600 MPa
Flexural strength	83 MPa
Flexural modulus	3800 MPa

Tabla 8 Características del material (PLA)

La tabla 8 es referente al (NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH,2019), sin embargo, las propiedades mecánicas son fluctuantes dependiendo del origen del material, por lo que es recomendable contactar directamente con el proveedor o realizar un ensayo de tracción.

Resolviendo tenemos que el factor de seguridad es:

$$n = \frac{S_y}{\sigma}$$

$$n = \frac{60 \text{ MPa}}{32.67 \text{ MPa}} = 1.84 > 1.2$$

Teniendo en cuenta que se consiguió un valor mayor a 1.2, el diseño es seguro.

### 3.8 Discusión en base a los cálculos

La realización de los cálculos asociados a la estimación de la orientación y movimiento mediante sensores puede descomponerse en tres etapas fundamentales. Inicialmente, se aborda la resolución de matrices vinculadas a cada sensor, desempeñando un papel crucial en la interpretación precisa de los datos provenientes del giroscopio, acelerómetro y magnetómetro. Estas matrices proporcionan teóricamente la orientación exacta del sensor con respecto al punto inicial, permitiendo una base sólida para la estimación inicial.

No obstante, es esencial reconocer que los sensores, con el tiempo, están expuestos a diversos factores que afectan su precisión. Esta pérdida de precisión motiva la segunda fase de los cálculos, que implica la aplicación del Filtro de Kalman. Este filtro se incorpora a los cálculos vectoriales como un método destinado a mitigar errores y reducir el ruido inherente a los datos. Como se mencionó previamente, la implementación de matrices debe ajustarse de acuerdo con cada caso específico, y este ajuste se realiza iterativamente mediante retroalimentación y pruebas para calibrar la precisión.

En este punto, es crucial resaltar que el algoritmo del Filtro de Kalman se configura de manera que la Ganancia de Kalman se calcula para derivar una estimación (ecuación 15), que se convierte en el resultado final del proceso. Sin embargo, el algoritmo no termina aquí. La misma Ganancia de Kalman se utiliza para actualizar la matriz de varianza y covarianza asociada, lo que a su vez conduce al cálculo de una nueva Ganancia de Kalman. Este ciclo iterativo permite una mejora continua en la estimación, ya que la precisión del sistema se ajusta dinámicamente en respuesta a la retroalimentación y la experiencia acumulada.

Este enfoque adaptativo garantiza que la estimación final sea altamente refinada y sensible a las condiciones cambiantes a las que los sensores pueden estar expuestos. La aplicación cuidadosa del Filtro de Kalman, junto con la iteración en la calibración de matrices, no solo mejora la precisión inicial, sino que también mantiene la robustez del sistema en entornos dinámicos o sujetos a variaciones externas. La combinación de estos dos aspectos en el proceso de cálculo ofrece una metodología integral para la estimación de la orientación y movimiento mediante sensores, proporcionando resultados confiables y adaptables a diversas situaciones.

Finalmente, se procede al cálculo del factor de seguridad de la caja diseñada, una medida clave para asegurar que la estructura pueda soportar esfuerzos sin comprometer su integridad. Este análisis incluye la generación de diagramas de cortante y momento, herramientas esenciales para identificar el punto crítico de la caja en términos de carga y esfuerzos aplicados. Con una fuerza máxima estimada de 196 N, se calcula un factor de seguridad de 1.84, indicando un margen significativo de resistencia frente a las fuerzas previstas. Este resultado confirma la seguridad del diseño ya que se busca un factor de seguridad mayor a 1.2.



## 4 ANÁLISIS DE RIESGOS

Se realizó un análisis detallado para cada riesgo identificado, donde se presentará una descripción, evaluación y decisión tomada para contrarrestar los peligros. Estos son los aspectos más importantes y para ello se ha determinado la siguiente tabla de evaluación.

CRITICO	$\geq 20$
MEDIO	$>10$ y $<20$
BAJO	$\leq 10$

### Operacionales

Hace referencia a las posibles fallas de construcción o mal funcionamiento del sistema.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
001	Fallos en la comunicación entre WIFI y el sensor MPU9250. Además la posible pérdida del lenguaje de programación.	$5 \times 5 = 25$	Alejandro Quelal	Probar varias alternativas funcionales de lenguaje y algoritmos. Respalda los documentos a una nube segura.	Vigente	Retraso del tiempo establecido en el cronograma.
002	Impresión defectuosa de armaduras (cases) para la colocación de los sensores.	$5 \times 3 = 15$	Andrés Molina	Transferir esta acción a una empresa de impresión en 3D.	Vigente	Elegir un material resistente.

Tabla 9 Monitoreo de riesgos operacionales

## Técnicos

Amenazan la calidad y el objetivo de su implementación.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
003	Diseños inadecuados de las armaduras.	4x4=16	Alejandro Quelal	Buen dimensionamiento con referencia a medidas varias para extremidades de diferentes personas.	Vigente	Retraso del tiempo establecido en el cronograma.

*Tabla 10 Monitoreo de riesgos técnicos*

## Comerciales

Los componentes electrónicos que se requieren son de fácil acceso comercial a nivel nacional, sin embargo, muchos de estos son de alta demanda por lo que podrían encontrarse en otras regiones del país.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
004	Retraso en la adquisición del sensor MPU9250 por tema de transporte local.	5x4=20	Andrés Molina	Preparar varios proveedores nacionales.	Vigente	Aumento del costo y retraso con el cronograma.
005	Adquisición de componentes electrónicos defectuosos o sin garantía.	5x2=10	Andrés Molina	Evitar adquirir sensores en lugares de dudosa procedencia o sin emisión de factura	Vigente	Aumento de costos.

Tabla 11 Monitoreo de riesgos comerciales

### Ambientales

Según las naciones unidas se generan cerca de 50 millones de toneladas de desechos electrónicos al año. En su mayoría peligrosos por su composición de metales pesados. En su mayoría no pasan por un sistema de reciclaje óptimo. En Ecuador la empresa Vertmonde es una gestora especializada en reciclaje.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
006	Mal manejo de residuos electrónicos.	5x2=10	Andrés Molina	Reciclaje en un centro de productos electrónicos.	Vigente	Capacitación

Tabla 12 Monitoreo de riesgos ambientales

## Manejo de recursos

Generalmente se da cuando el mismo grupo de trabajo no brinda soporte y ayuda con las compras e incluso por la falta de comunicación.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
007	Mala distribución de recursos económicos por compras innecesarias	3x3=9	Daniel Moreno	Establecer reuniones continuas para tener un consenso de los mismos.	Vigente	Generar un previo estudio o matriz de selección.

Tabla 13 Monitoreo de riesgos con el manejo de recursos

## Exposición, salud y seguridad

No existen casos críticos en la realización de este proyecto ya que no se implementan procesos complejos de manufactura o el uso de algún tipo de herramienta que puedan generar daños físicos tanto a los integrantes como a los usuarios.

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observaciones
008	Rose prolongado por la interacción entre la extremidad y la caja de los sensores de movimiento llegando a provocar algún tipo de corte leve y molestia en el usuario.	5x4=20	Daniel Moreno	Agregar una almohadilla o algún tipo de material que brinde comodidad.	Vigente	Revisar los acabados de esta caja después de su impresión. Eliminar cualquier tipo de aspereza.

Tabla 14 Monitoreo de riesgos de seguridad

## 5 PLAN DE MANUFACTURA

### 5.1 Diagramas de flujo

A continuación, se presentan los diagramas de flujo del proceso de manufactura. El primer diagrama es uno general representando los pasos a seguir. El segundo diagrama tiene los pasos específicos que se realizan para la producción de todo el sistema. Este empieza con la obtención de los sensores y la conexión electrónica. Esto continua con la programación y la impresión de los cases. Finalmente, se realiza el ensamble y la prueba de usuario. En el diagrama se visualiza lo importante de la retroalimentación. En cada paso se puede volver atrás si el resultado no es el deseado. Por lo tanto, esta es una herramienta valiosa para la planificación y la resolución de problemas.

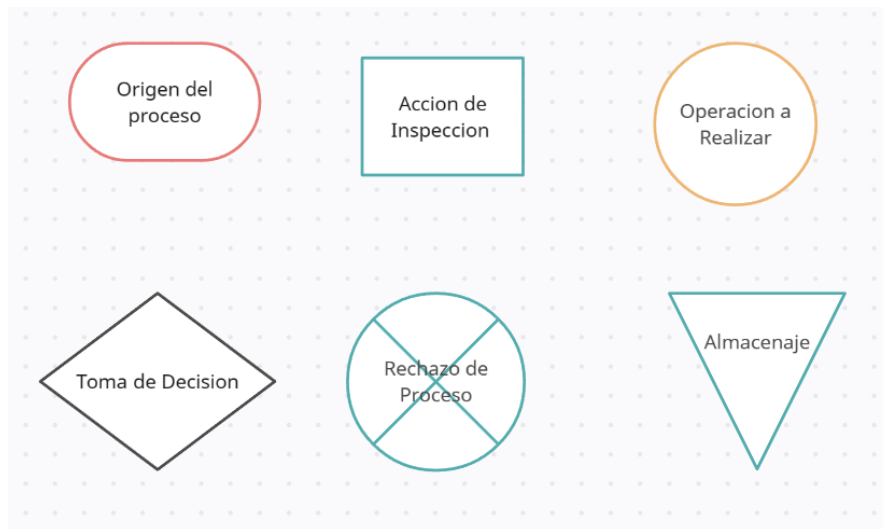


Figura 14 Mapa de simbología

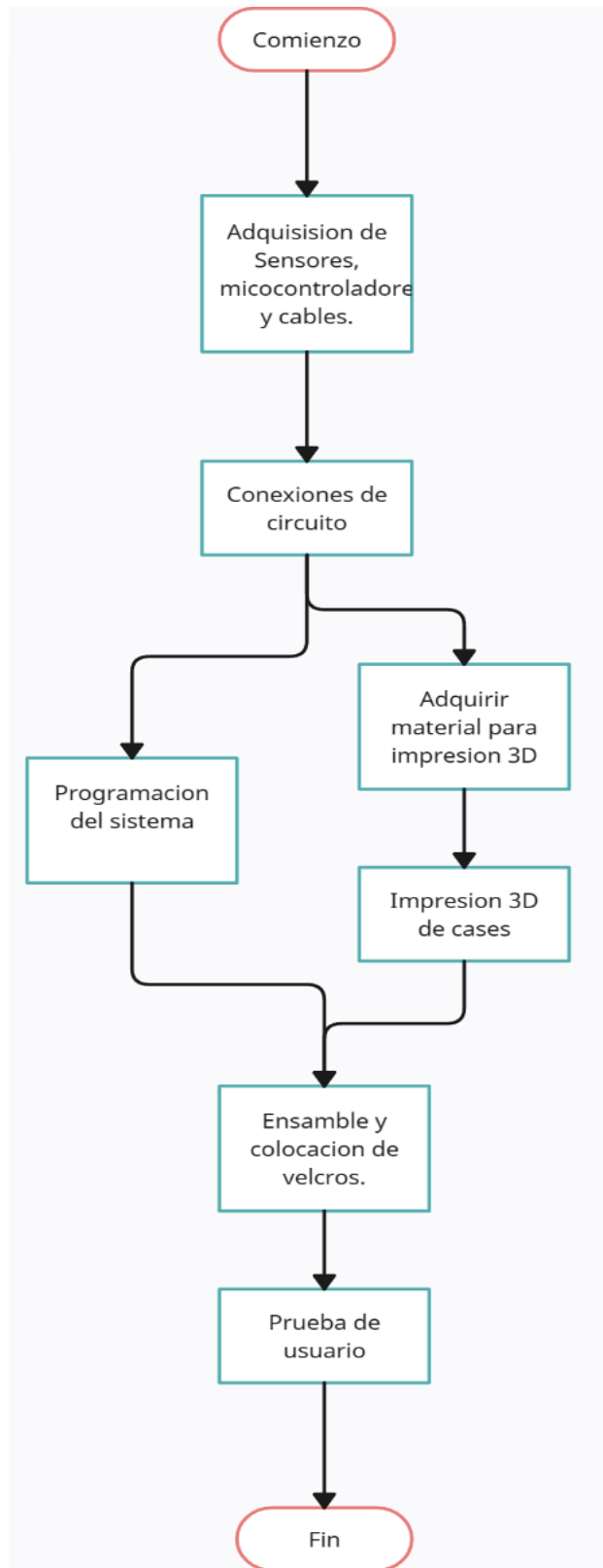
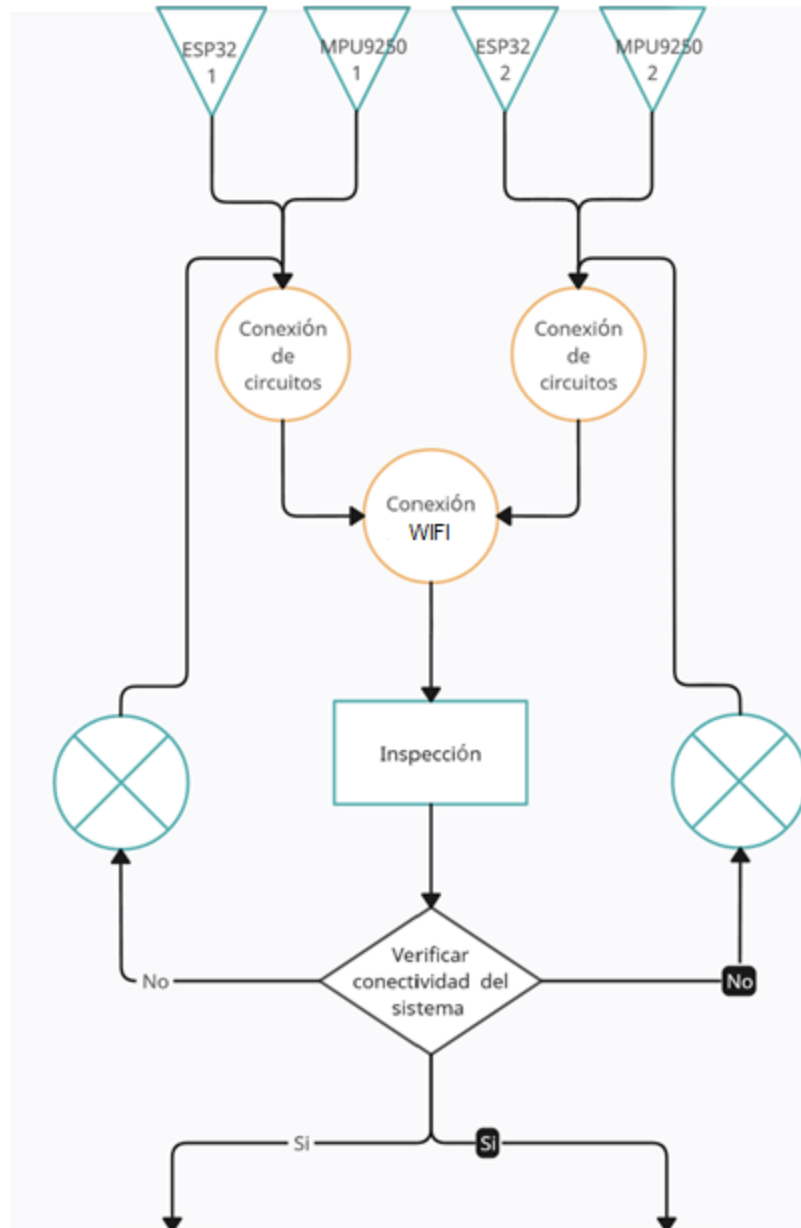


Figura 15 Diagrama de flujo general



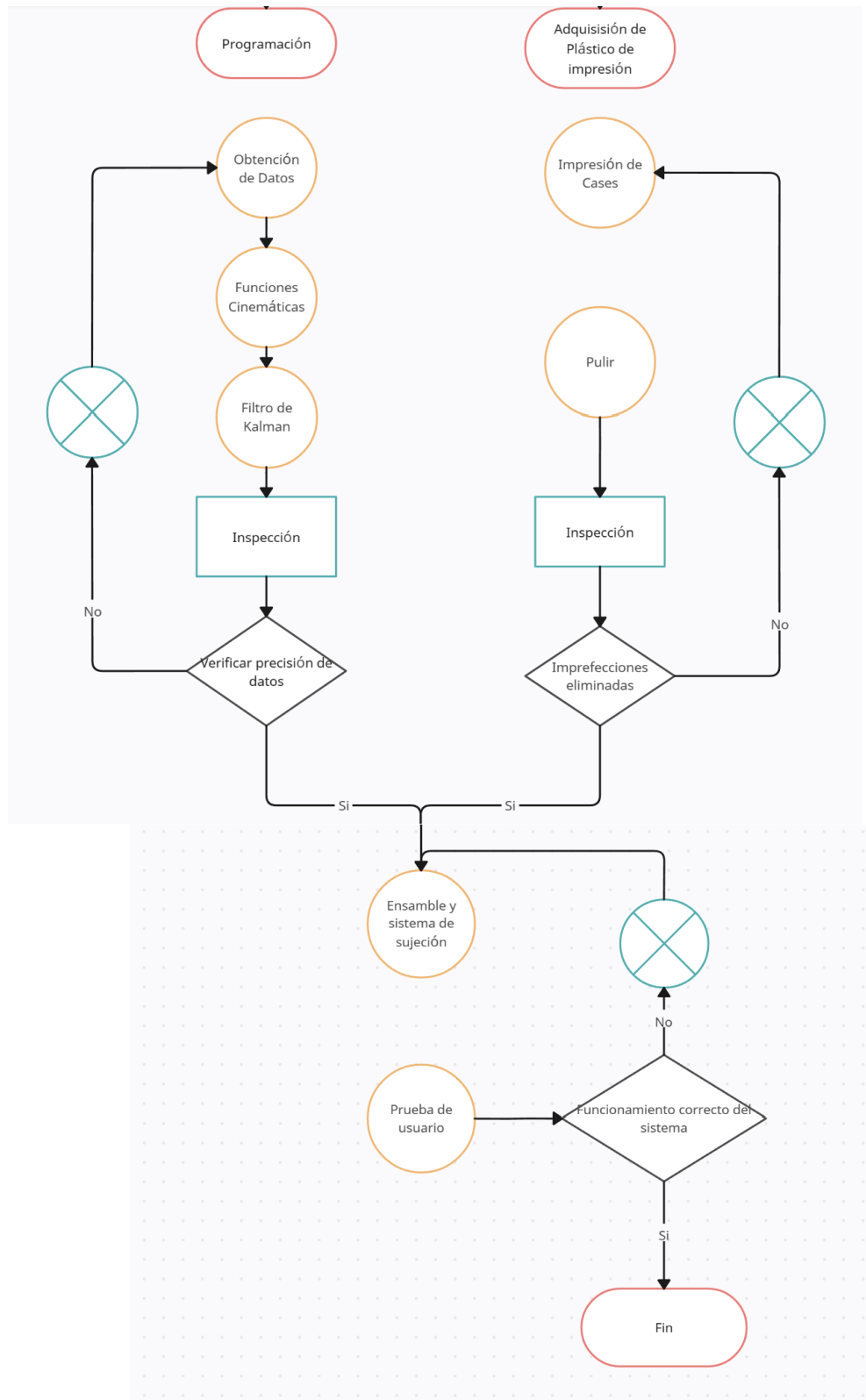


Figura 16 Diagrama de flujo detallado



En la figura 17 se indica el diagrama de bloques del algoritmo del filtro extendido de Kalman. Las entradas del filtro son el giroscopio que nos ayudara en la etapa de predicción mientras que las entradas de las medidas del acelerómetro y del magnetómetro entran a la etapa de corrección finalmente como salida se obtiene los ángulos que determinan la orientación de nuestro IMU.

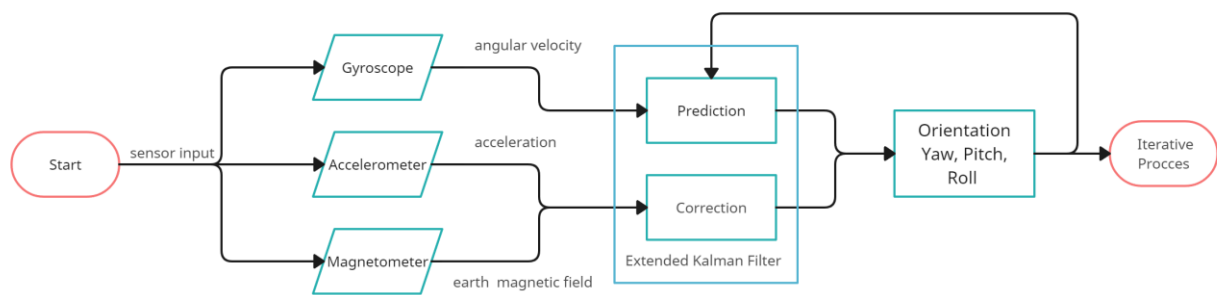


Figura 17 Algoritmo filtro extendido de Kalman

## 5.2 Hojas de proceso

A continuación, se presentan dos hojas de proceso para el único componente a fabricar que es la armadura que consta de una caja y una tapa, encargada de guardar a los sensores inerciales y junto con la cinta velcro para posteriormente colocarla en alguna extremidad del usuario. En este caso se realizará un proceso de manufactura moderno, de fácil uso y de buen costo. Para ello se detallan dimensiones, equipos de medición, procedimientos estandarizados y todo lo necesario para su hechura por el encargado.


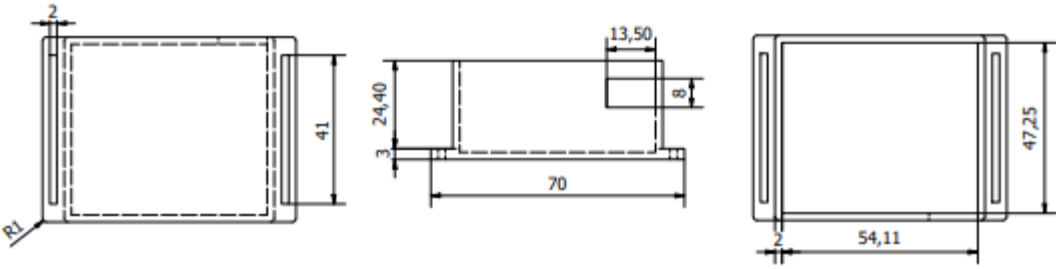


HOJA DE PRODUCCIÓN				
<b>Responsable:</b>	Andrés Molina	 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO	<b>Cantidad:</b>	2
<b>Pieza:</b>	Caja tipo reloj		<b>Descripción:</b>	Caja cuadrada para guardar sensores
<b>Material:</b>	PLA (estándar)		<b>Tolerancia general:</b>	$\pm 0.25$
				
PROGRAMA N°	Parámetros	TOOL	Esquema	Control por:
1	<b>Rango de temperatura:</b> 190 a 220 °C <b>Velocidad recomendada para alta calidad:</b> Entre 30 y 60 mm/s <b>Infill (densidad de relleno):</b> >50%	<b>Impresora:</b> Anycubic I3 MEGA S		Calibrador
2	Realizarlo de forma manual sin aplicar presión, únicamente retirar posibles asperezas	<b>Lija súper fina:</b> Entre 360 a 600 granos		Calibrador

Tabla 15 Hoja de proceso para la elaboración del case (Base)


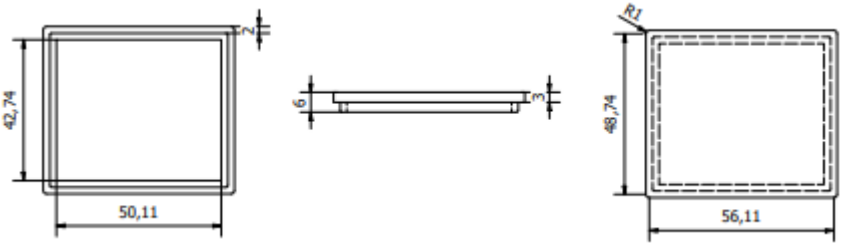

HOJA DE PRODUCCIÓN				
<b>Responsable:</b>	Andrés Molina		<b>Cantidad:</b>	2
<b>Pieza:</b>	Tapa para caja reloj		<b>Descripción:</b>	Tapa de encaje a presión
<b>Material:</b>	PLA (estándar)		<b>Tolerancia general:</b>	± 0.25
				
PROGRAMA N°	Parámetros	TOOL	Esquema	Control por:
1	<b>Rango de temperatura:</b> 190 a 220 °C <b>Velocidad recomendada para alta calidad:</b> Entre 30 y 60 mm/s <b>Altura de capa o resolución:</b> 0.32 mm <b>Ancho de línea:</b> 0.44 mm <b>Refrigeración:</b> 100% a 1 mm <b>Infill (densidad de relleno):</b> >50%	<b>Impresora:</b> Anycubic I3 MEGA S		Calibrador
IMPRESIÓN 3D				

Tabla 16 Hoja de proceso para la elaboración del case (Tapa)



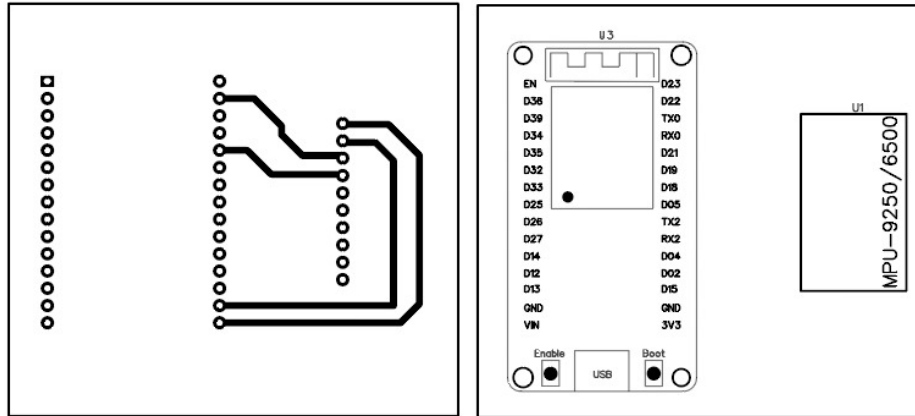


Figura 19 PCB del circuito indicado en la figura 18

#### 5.4 Procedimiento de pruebas básicas para la unidad de medida inercial (IMU)

Los sensores IMU requieren de distintos métodos de prueba para verificar su precisión. Estos métodos se aseguran de que el sensor en si entregue información confiable y que el programa los transforme a información útil correctamente. Los métodos que se utilizan se dividen en 4 partes.

##### 5.4.1 Prueba estática

En la prueba estática los dos sensores son sujetos a un elemento vertical simulando una pierna recta o directamente a la extremidad del usuario como se muestra en la figura 20, sin embargo, se debe procurar mantenerla totalmente quieta para no general algún tipo de ruido.



Figura 20 Posicionamiento referencial para prueba estática del sistema IMU

Source: propia

Los sensores recopilan información en esta posición estática para verificar la tasa de derivación, es decir, que tanto se desvían los datos con el tiempo debido a algún error interno del sensor.

#### 5.4.2 Prueba Dinámica

Para la prueba estática se utiliza el mismo elemento de la prueba estática pero ahora se lo mueve como un péndulo como se muestra en la figura 21.

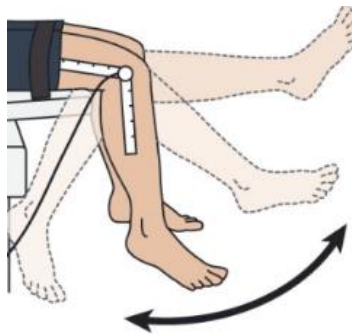


Figura 21 Posicionamiento referencial para prueba dinámica del sistema IMU

*Source: EMC, (2013); Artículo; Proposal of multisegment foot model for gait analysis*

Se hace la prueba hasta que el péndulo termine de moverse y se repite tres veces para tener un tamaño de muestra adecuado. El propósito principal de la prueba dinámica es de, “ver si la frecuencia y amplitud del movimiento tienen algún efecto sobre la tasa de deriva o las señales de salida producidas por los sensores” (Chaulk, M., 2011, p. 4).

#### 5.4.3 Adquisición de Data

Las dos pruebas anteriores se enfocan en que los componentes individuales de cada sensor funcionen correctamente. En la tercera fase se verifica que se tenga una correcta adquisición de datos de los dos sensores en conjunto. Esta prueba nos permite saber si el microcontrolador

obtiene los datos de los dos sensores en simultaneo y con un retraso aceptable. De esta forma se prueba la eficiencia de la transmisión de los datos vía Wifi.

#### **5.4.4 Interpretación de Data**

La cuarta fase se enfoca en verificar que los datos obtenidos son transformados y analizados correctamente. Ya que se tienen los datos registrados se realiza una prueba de uno y dos grados de libertad para verificar los resultados. Se utiliza el mismo sistema de péndulo anterior y definen tres puntos que serán analizados. El punto de origen (0 grados) y cuando el péndulo se encuentra a 45 y 90 grados. Se verifica que los datos no se desvíen con el tiempo y que mientras los ángulos obtenidos se miden correctamente se mantenga en 0 grados el ángulo entre ellos. Como segunda fase ya se amarran los sensores a una pierna. Se determinan puntos en los que la pierna esta doblada a 45 grados y 90 grados para ver que el ángulo entre los sensores se interprete correctamente.

## 6 INTERFAZ CON EL USUARIO

Para el diseño de la interfaz del usuario se usaron 2 métodos cada uno con sus pros y contras.

El primer método trata de la creación de una IP fija mediante un archivo JSON. Como podemos observar en la figura 22 en la carpeta del programa se debe tener por un lado el archivo.ino para cargar el programa en la placa ESP32. Aparte, en la carpeta “data” se necesitan 3 archivos. El archivo script.js es un archivo JSON (JavaScript Object Notation) que es un formato ligero utilizado para el intercambio de datos entre sistemas que puedan entender este formato. Así mismo, el archivo index.html nos indica la estructura y organización de la página web con los datos obtenidos del archivo JSON. Finalmente tenemos el archivo style.css. Los archivos CSS (Cascading Style Sheets) son utilizados para definir el estilo y la presentación de documentos HTML. De esta forma obtenemos la página web que nos indica los datos que se requiere, así como a orientación del cuerpo en tiempo real con una animación.

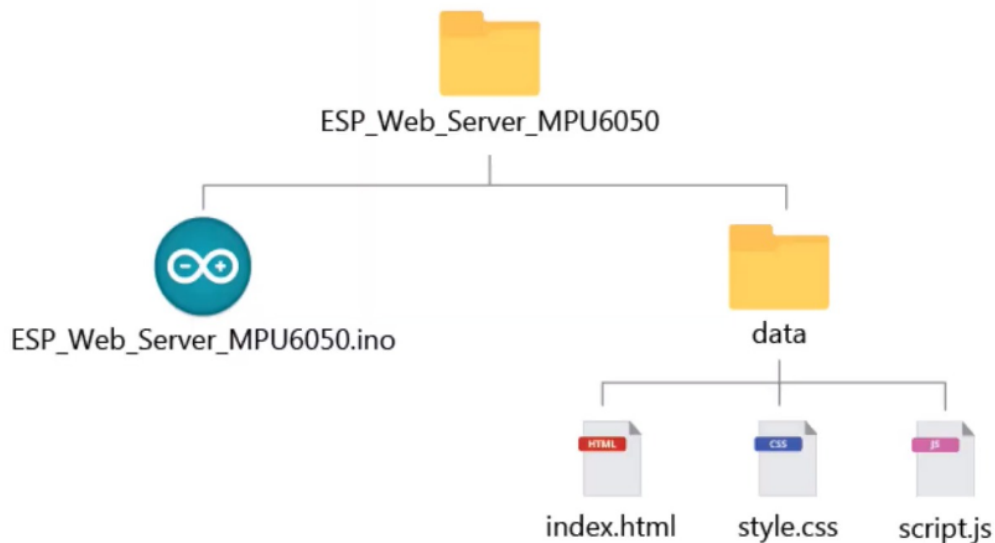


Figura 22 Estructura de archivos para la creación de la interfaz de usuario

Source: Propia



El segundo método se basa en el uso de una API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) es un conjunto de reglas y herramientas que permite que diferentes aplicaciones de software se comuniquen entre sí. Como podemos observar en la figura 23 tenemos que el API mediante el método PUT registra los datos, del sensor MPU9250, y los guarda en una base de datos llamada Postgres. Después la página web mediante el método GET llama a los datos a la página web para visualizarlos.

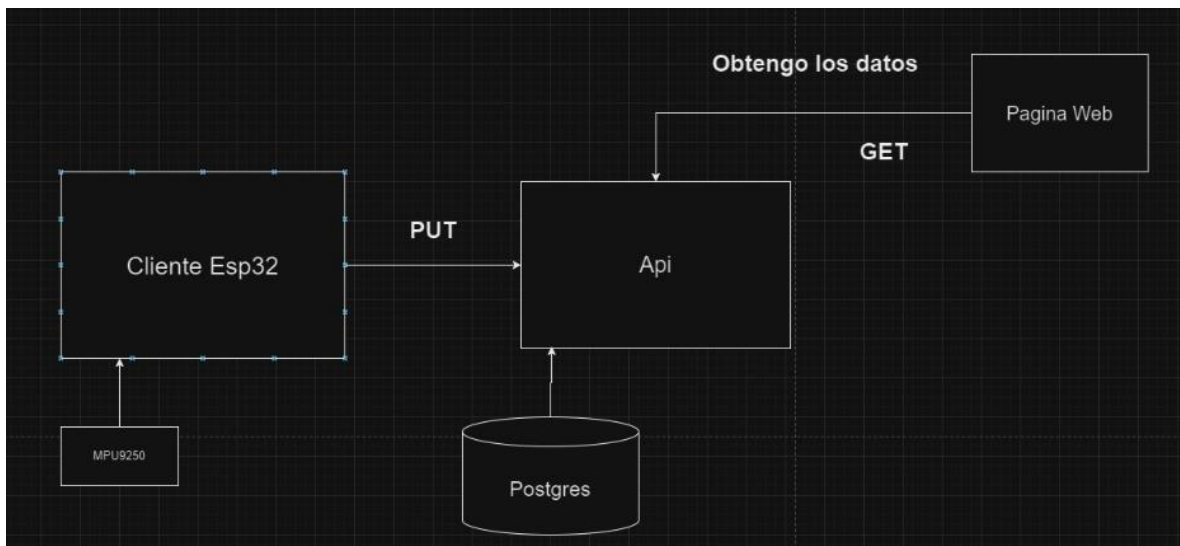


Figura 23 Diagrama del funcionamiento API

*Source: Propia*

Como se mencionó existen pros y contras entre métodos. Por un lado, el método de IP fija nos permite mayor tasa de muestreo, así como menos desarrollo de programación. Pero nos limita en cuanto al desarrollo de la interfaz. Por otro lado, tenemos el método de API con base de datos que nos permite un monitoreo remoto desde cualquier lado, pero nos limita la tasa de muestreo por lo que existe mayor delay de las lecturas. En este sentido el mejor método será la creación de IP fija para la visualización en tiempo real de los datos y la animación

## 7 PRUEBAS DEL PROTOTIPO

Antes de entrar netamente a las pruebas se pondrá en contexto una pequeña parte teórica del funcionamiento básico de los filtros, que posteriormente serán utilizados y comparados.

### 7.1 Filtro de Mahony

El Filtro de Mahony representado en el diagrama utiliza, al igual que los otros filtros, los datos previos para realizar predicciones y aproximaciones que constantemente retroalimentan el algoritmo. En este caso, el filtro toma los datos del acelerómetro y magnetómetro y estima un error en la orientación. Al tomar los datos del giroscopio, sin embargo, los integra para eliminar la deriva giroscópica que vienen de los datos. Los datos estimados de cada uno son comparados y se predice un valor para el grado de orientación del sensor. El filtro utiliza cuaterniones para representar la orientación y aplica una combinación de la información de los tres sensores para corregir los errores acumulativos en la estimación de la orientación. Como se menciona anteriormente, su diseño busca minimizar la deriva giroscópica a largo plazo, proporcionando una orientación más precisa y estable del sensor inercial en entornos dinámicos y estáticos.

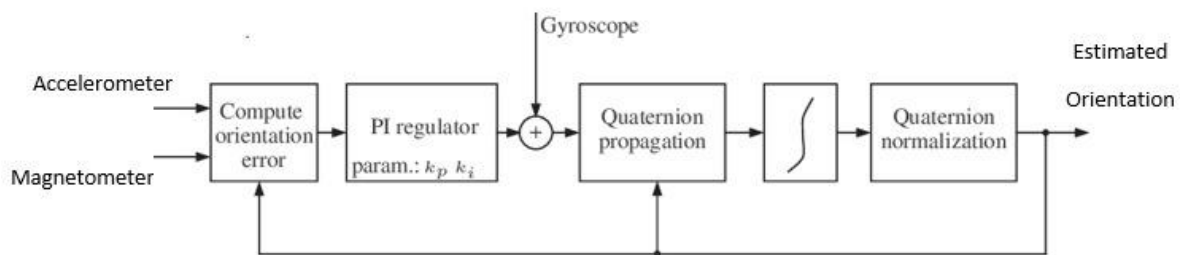


Figura 24 Funcionamiento general del filtro de Mahony

Source: UTP, (2017); Artículo; *Evaluation of data fusion algorithms for attitude estimation*

## 7.2 Filtro de Madgwick

Representa la orientación por cuaterniones y el algoritmo de gradiente descendente para calcular la dirección del error de medición a partir de los datos del giroscopio. Este filtro consta de cuatro partes: cálculo de orientación a partir de la velocidad angular (giroscopio), y el cálculo de las orientaciones por los vectores medidos del campo gravitacional y magnético; la fusión de estas dos estimaciones anteriores y por último la normalización del cuaternión de la medición.

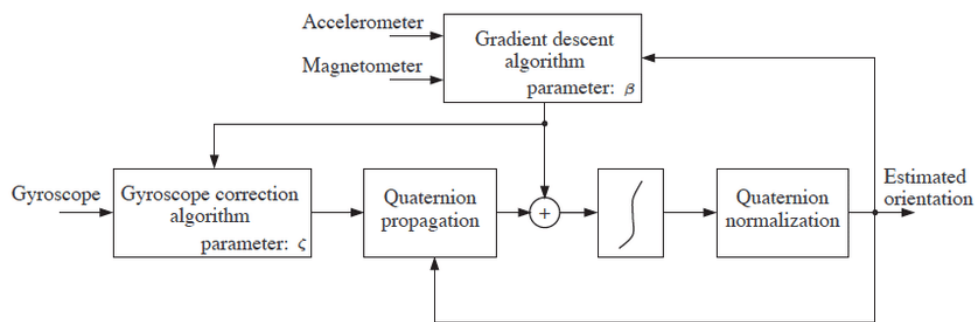


Figura 25 Funcionamiento general del filtro de Madgwick

Source: UTP, (2017); Artículo; *Evaluation of data fusion algorithms for attitude estimation*

## 7.3 Test de Filtros

El objetivo de esta prueba es comparar algoritmos de procesamiento, los cuales implementan procesos de filtrado y fusión de datos. Actualmente existen varios tipos de sensores IMU comerciales, sin embargo, son muy costosos, por lo que al usar uno de costo medio, como es el caso de nuestro proyecto, debemos garantizar que el procesamiento de datos proporcione con exactitud los ángulos y cuaterniones de salida deseados. A continuación, se observa el procesamiento de cada uno de los filtros usados de manera clara

y sencilla, mediante gráficas, pues matemáticamente son complejos, además que la finalidad es hacerlo de manera computacional donde existen librerías (open source) que se aplican directamente a los datos crudos para determinar la orientación. Las gráficas de comparación se realizaron mediante Matlab.

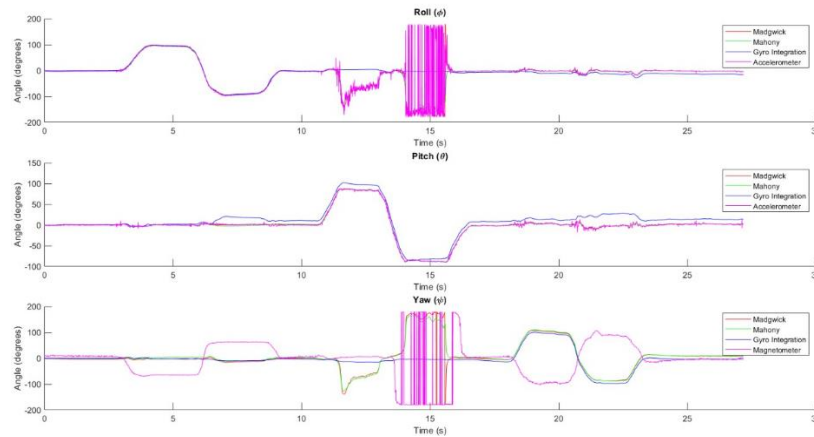


Figura 26 Datos crudos procesados mediante ecuaciones de orientación y filtros

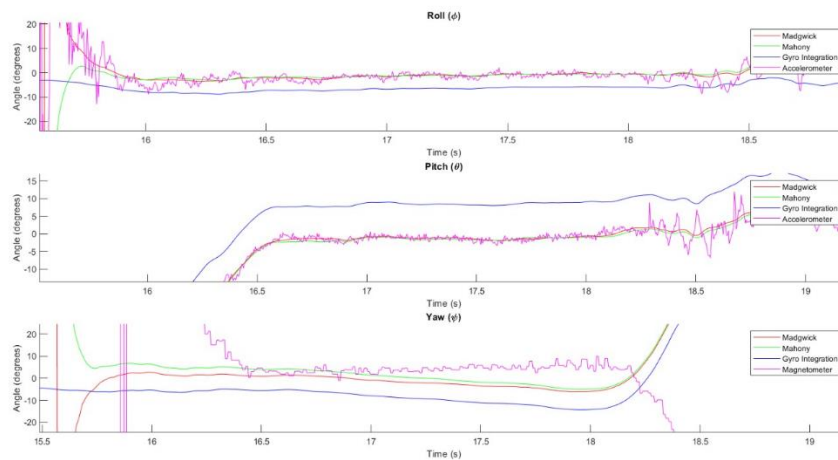


Figura 27 Ampliación de gráfica para observación de filtros

Como podemos observar en la figura 26 y la figura 27 la formulación mediante el acelerómetro (línea magenta) posee grandes variaciones debido a la sensibilidad al ruido. Por

otro lado, tenemos la integración del giroscopio (línea azul) que presenta suavidad en la curva con pocas variaciones debido al ruido, pero con una deriva de los datos, aparecen desplazados en el eje y.

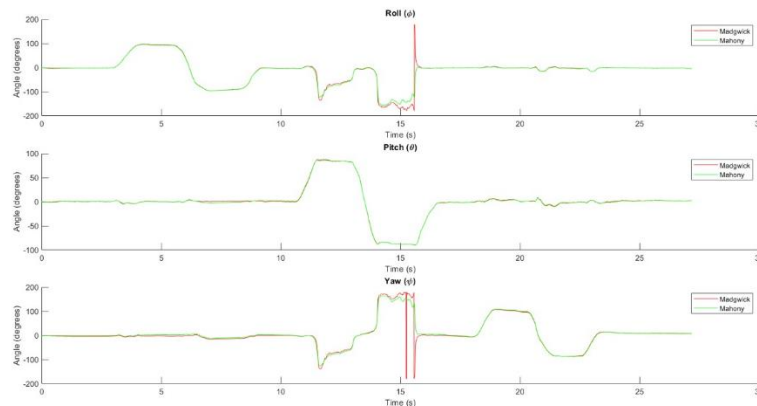


Figura 28 Filtro de Madgwick y Mahony

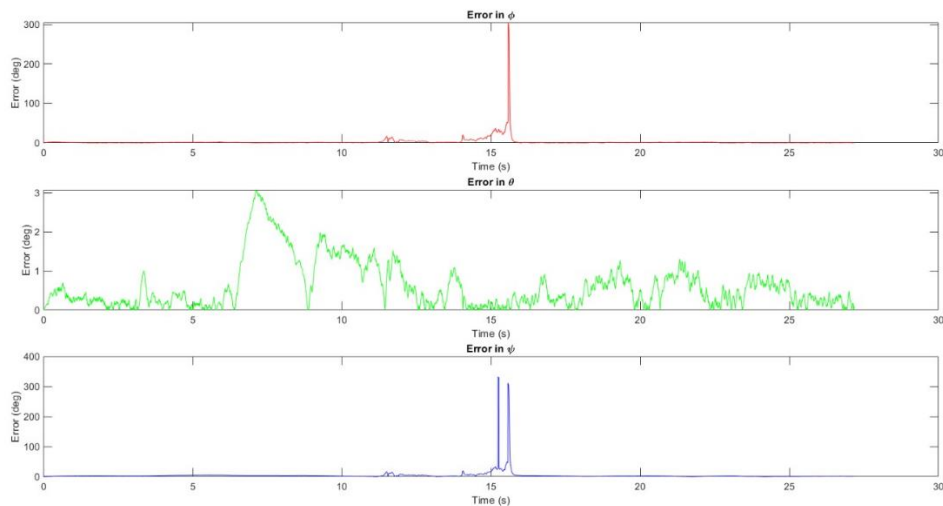


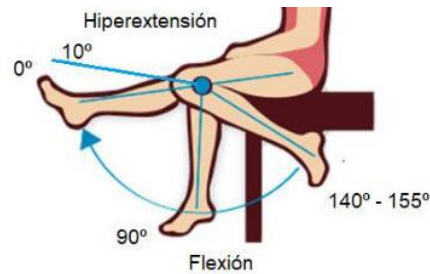
Figura 29 Error absoluto entre filtro de Madgwick y Mahony

Como podemos observar en la figura 28 el filtro de Madgwick presenta una buena aproximación a los datos, pero se descompensa en los cambios abruptos de ángulos. Finalmente, observamos los datos procesados mediante el filtro de Mahony este presenta curvas suaves con buenas aproximaciones sin descompensaciones por los cambios abruptos.

En este sentido, la mejor aproximación es la del filtro del Mahony debido a los pocos errores de estimación presentados como observamos en la figura 29.

#### 7.4 Extensión de Pierna

En este apartado se presenta el ejercicio de hiperextensión-flexión, el paciente fue un integrante del grupo y se le colocó el dispositivo de la siguiente manera.



Source: Peña, R. (2015); <https://es.slideshare.net/RubyPeaHilerio/articulaciones-y-movimientos-articulares>

Figura 30 Ilustración teórica del ejercicio hiperextensión – flexión



Figura 31 Ilustración práctica del ejercicio hiperextensión – flexión

Posteriormente los datos de orientación tomados en un lapso de tiempo se filtran y se grafican directamente en Matlab, dando como resultado la siguiente figura.

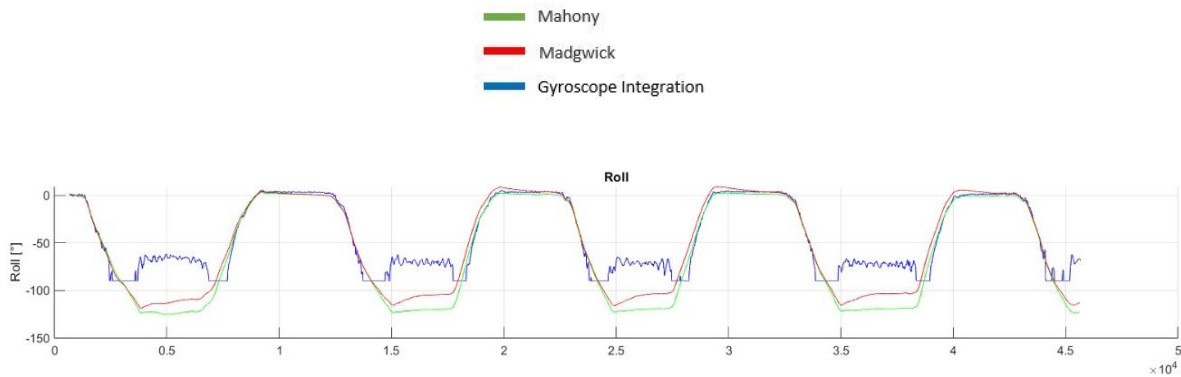


Figura 32 Gráfica de la orientación para el ejercicio hiperextensión – flexión

En la figura se muestra roll en función del tiempo ya que se toma la orientación en el eje (x), aunque también se podría tomar pitch siempre y cuando se ubique el dispositivo en ese sentido. Por consiguiente, las líneas suben y bajan, esta forma demuestra el movimiento de la pierna; primer punto para saber que tiene sentido. Asimismo, teóricamente la pierna abarca un rango de movimiento desde 10 grados a 0 grados en hiperextensión y de 0 grados hasta -155 grados en flexión, entonces va acorde a nuestro resultado ya que se obtuvo un rango de 0 a -140 grados aproximadamente. En cambio, para la comparativa computacional tenemos líneas de distintos colores. Los colores que se muestran son: verde para el filtro de Mahony, rojo para Madgwick y azul para la integración del giroscopio. Si notamos el rojo y el verde son filtros buenos que casi llegan a sobreponerse sin embargo el verde mantiene mejor linealidad por lo que es el mejor y por el lado contrario la integración del giroscopio al ser un algoritmo mucho más sencillo sigue generando mucho más ruido.

En esa misma línea lo ideal sería comparar todo este proceso con algún tipo de sistema profesional disponible en el mercado, como por ejemplo un sistema óptico – infrarrojo o alguno similar para comparar la efectividad, pero al no ser tan accesible, lo que se plasmó es una comparativa con literatura (Journals).

## 1. IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis

Steel, T. (2014) *Sensor fusion of the gyroscope-based and the accelerometer-based knee angle of a leg prosthesis;*

<https://www.mdpi.com/1424-8220/14/4/6891>

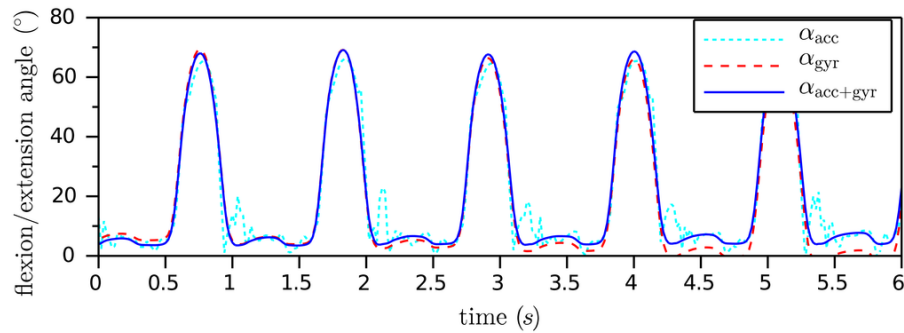


Figura 33 Primera gráfica obtenida de literatura para la comparación de hiperextensión – flexión

## 2. Accuracy of Measuring Knee Flexion after TKA through Wearable IMU Sensors

*J. Funct. Morphol. Kinesiol.* 2021, 6(3), 60; <https://doi.org/10.3390/jfmk6030060>

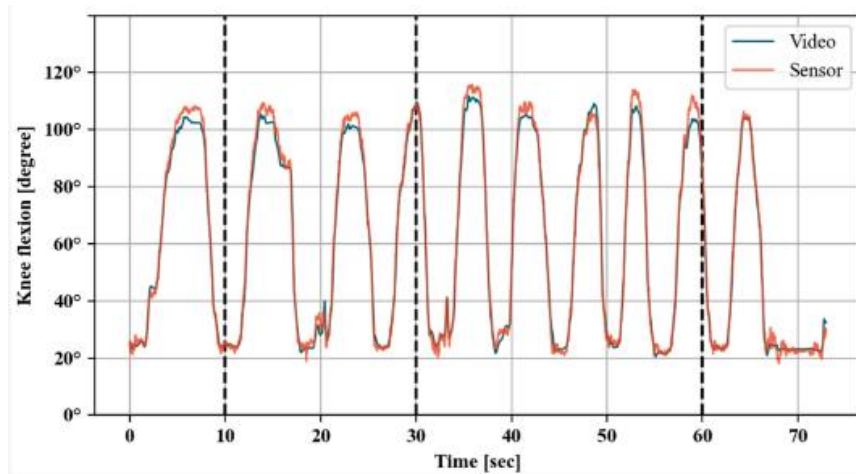


Figura 34 Segunda gráfica obtenida de literatura para la comparación de hiperextensión – flexión

En conclusión y en comparativa a las figuras expuestas se revela un correcto funcionamiento del equipo y de la práctica con el usuario.



## 7.5 Prueba de Marcha

La prueba de marcha consiste en caminar con el sensor puesto sobre el tobillo como se muestra en la figura 35.



*Figura 35 Ilustración práctica de la prueba de marcha*

El ángulo que mide la caminata en este caso es el Roll, y el Pitch y Yaw medirían desviaciones al doblar el pie hacia los otros lados. Se puede observar en azul los datos del giroscopio integrado, en verde el filtro de Mahony y en rojo el filtro de Madgwick. En este caso se observa una gran desviación en los ángulos de pitch y yaw, pero vamos a analizar el roll.

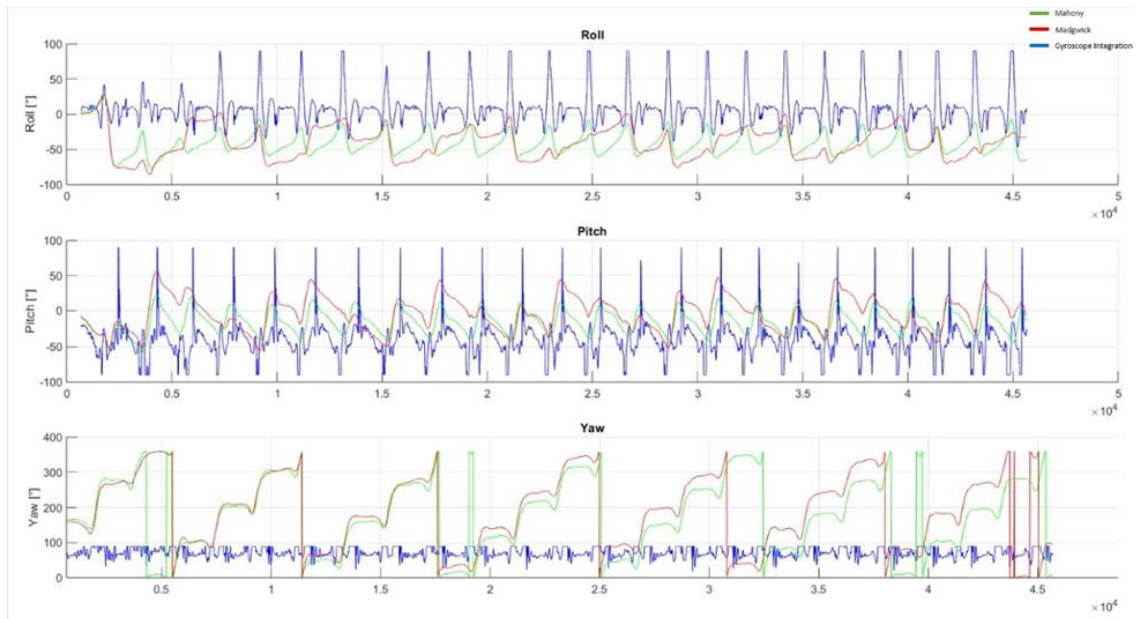


Figura 36 Orientaciones obtenidas a partir de la marcha

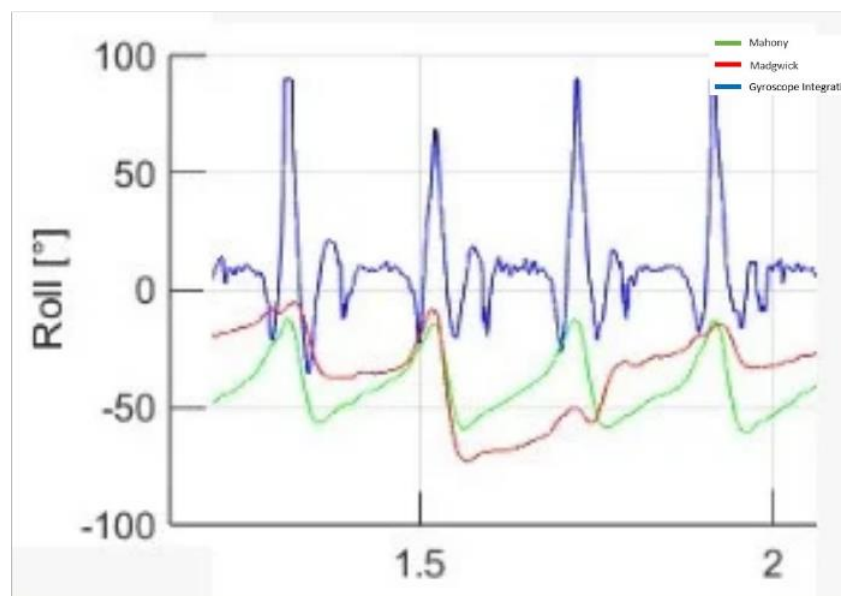


Figura 37 Acercamiento de interés a la orientación roll

Se observa en la figura una ampliación donde se muestran 4 periodos de caminata. Al compararlo con un “Gait Analysis” realizado en un estudio médico por McBrath podemos comparar los picos de los ángulos. Si bien se observa un máximo alrededor de los 80 grados en los 2 casos (giroscopio integrado) hay una mayor desviación negativa en nuestro estudio. El giroscopio mantiene una representación cruda de la curva deseada, pero la hace falta precisión. En el caso de los filtros, se los puede descartar inmediatamente en esta prueba ya que no reacciona a los cambios grandes y termina asumiendo una posición mucho menor a la real. Si bien, la forma de la curva en este caso, especialmente para Mahomy asimila mucho más a la curva deseada los datos no están en un rango preciso. Esto se debe a que los filtros están entre otras cosas diseñados para reducir el ruido aleatorio. De tal forma, cuando se encuentran cambios tan abruptos el algoritmo asume un error en la medida por lo que lo elimina. El resultado en este caso es que no se ponderan correctamente los ángulos más grandes llevando a los filtros a asumir ángulos muchos menores.

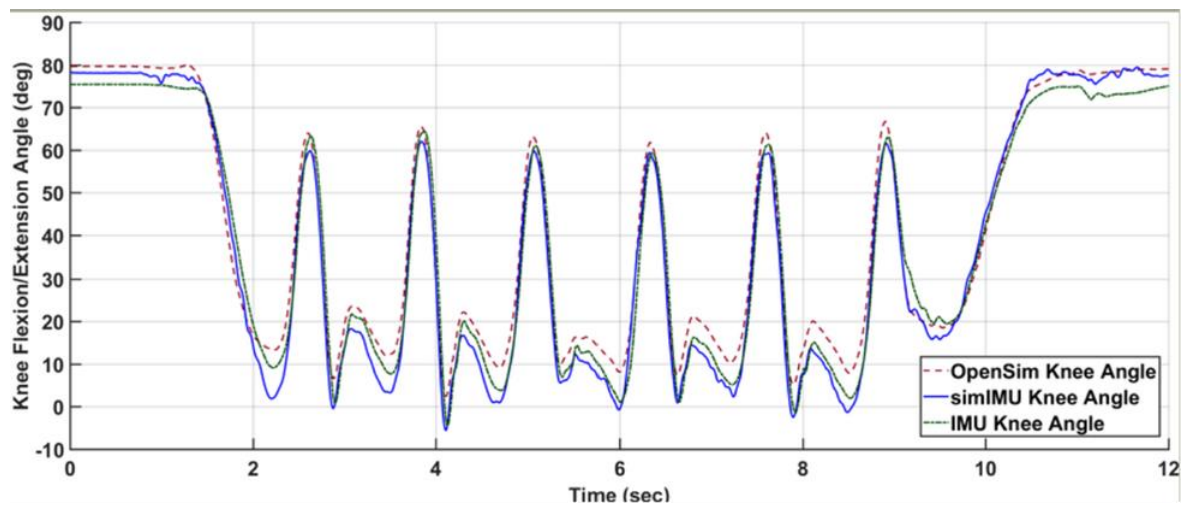


Figura 38 Resultado obtenido por McBrath durante un estudio medico

## **DISCUSIÓN DE PRUEBAS**

La eficacia del filtro de Mahony en nuestra aplicación se destaca por su eficiencia computacional, lo que lo convierte en la opción más adecuada para nuestras necesidades específicas. Sin embargo, se reconoce que los filtros en general enfrentan dificultades al medir el yaw con precisión, subrayando la necesidad de una investigación adicional para abordar este desafío específico.

En la prueba de extensión de rodilla, se logran resultados precisos y comparables con la literatura existente, respaldando la confiabilidad del sistema en condiciones controladas. No obstante, la prueba de marcha presenta desafíos particulares, especialmente en la gestión del ruido durante variaciones rápidas, lo que sugiere áreas de mejora para la aplicación del filtro en entornos dinámicos.

La elección del método de comunicación se adapta a la naturaleza del proyecto. El uso de IP proporciona una mayor tasa de datos de muestra, siendo ideal para aplicaciones que requieren una recopilación detallada de información. Por otro lado, la API ofrece la ventaja de monitoreo remoto, proporcionando flexibilidad en la supervisión y control del sistema, especialmente en escenarios donde la accesibilidad es crucial. Esta adaptabilidad en la selección de métodos resalta la versatilidad del sistema en distintos contextos de aplicación.

## 8 RESPUESTA DEL CONSUMIDOR

Según “Mordor Intelligence” encargada de realizar el informe anual del mercado que cubre a los fabricantes mundiales de sistemas de medición inercial en distintas áreas como medicina, aeroespacial, consumo y otras más, apunta en la siguiente figura una predicción desde el año 2022 de la adquisición de estos modelos por continente, en donde se puede observar que Latinoamérica se encuentra en un nivel bajo, mientras que parte de Asia y Oceanía son los mayores usuarios. Se espera que para el año 2028 el mercado mueva 2.8 billones de dólares ya que el promedio del año 2023 fue de 0.98 billones.

MEMS-Based Inertial Measurement Unit (IMU) Market - Growth Rate by Region (2022-2027)

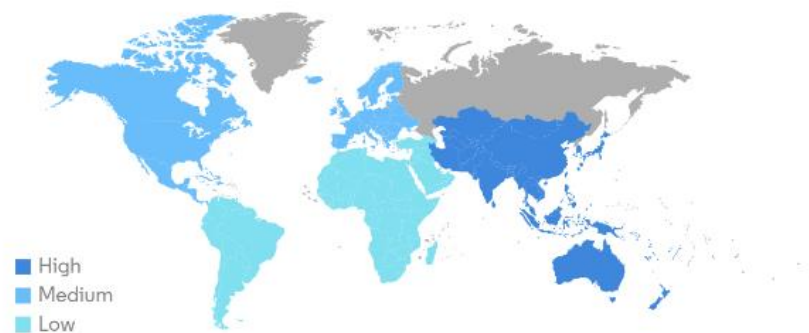


Figura 39 Mapa Continental basado en Inertial Unit Market

Source: Mordor Intelligence. (2023); <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-mems-based-inertial-measurement-unit-market>

### 8.1 Respuesta del consumidor local (Ecuador)

En una entrevista realizada por (El Comercio,2023) a la jefa medica en el área de traumatología en el IEISS (Dra. Pamela Herrera) expreso su preocupación por las patologías más comunes en los ecuatorianos. Actualmente son dos, hernia discal y lumbalgia, juntas suman el 69% de enfermedades reportadas en nuestro país. Estas son asociadas al ámbito laboral y estudiantil por la postura de la espalda. Sin embargo, en esta sección lo que cabe

resaltar es la metodología de terapia que se realiza actualmente, si se utiliza algún tipo de dispositivo tecnológico, a lo que también se mencionó que únicamente se sugiere usar aplicaciones móviles de medicina preventiva como “mHealth”.

### 8.1.1 Encuesta a Profesionales

La encuesta se la realizo a seis personas en centros particulares, con una edad promedio de 42 años, entre estos se encontraban traumatólogos ortopedistas, fisioterapeutas y un deportólogo. Como preámbulo lo primero que se pregunto fue si tenían conocimiento sobre sistemas inerciales para uso médico y como actualmente realizan terapia con sus pacientes, a lo que ninguno supo responder de manera asertiva, sin embargo, una breve explicación fue suficiente para su interés. A partir de ello el grupo de trabajo expreso los fines de este proyecto y si finalmente estarían dispuestos a comprarlo.

*¿Estaría usted dispuesto a adquirir nuestro prototipo, sí, tal vez o no y por qué?*

Sí, lo compraría	3
No lo compraría	2
Tal vez lo compraría	1

Tabla 17 Respuestas a la pregunta de encuesta

Profesionales	Edad
Dr. Ronald Matilla (Traumatólogo Ortopedista)	33
Lic. Estefanía Yunapanta (Terapia Física)	28
Dr. Yuri Peralvo (Traumatología y Ortopedia)	57
Dr. Gabriel Paredes (Traumatología y Ortopedia)	41
Dr. César Rovalino Troya (Traumatología y Ortopedia Pediátrica)	60
Dr. Carlos Salazar (Deportólogo)	38
<b>Promedio:</b>	<b>42,8333333</b>

Tabla 18 Referencias personales

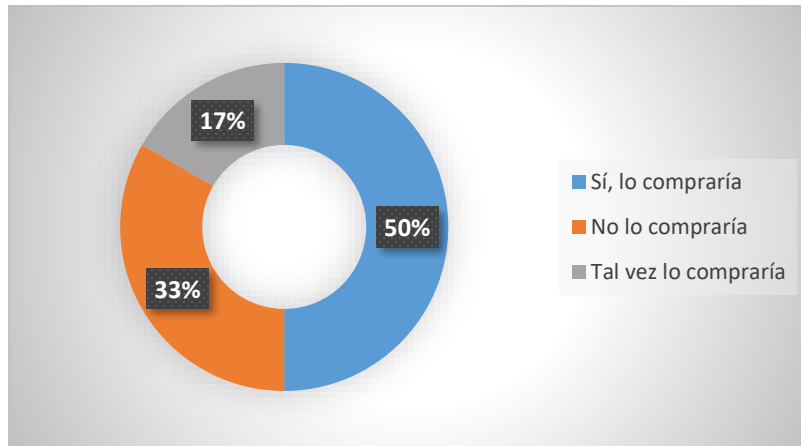


Figura 40 Tabulación porcentual de la encuesta

Concluimos que un factor de impacto podría ser la edad, ya que Yuri y César no lo comprarían por tener una metodología muy marcada de su trabajo y por otra parte comentan que al ser algo tecnológico, podrían no adaptarse a su funcionamiento. Por el resto, comentaron que lo harían o tal vez lo haría siempre y cuando se brinde una excelente capacitación de uso y su interfaz fuese más dinámica. Además, solicitan versatilidad para guardar los datos obtenidos de un paciente, de esta manera sería fácil de manejar cada sesión con los pacientes.

Finalmente, con respecto a cómo hoy en día se realiza terapia, es con el uso de goniómetros, esta herramienta cumple la función de medir la orientación, se aplica directamente a una extremidad como se muestra en la siguiente figura o sobre las radiografías.

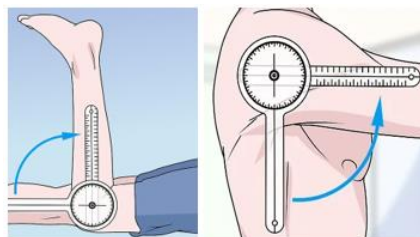


Figura 41 Uso de Goniómetro en extremidades

Source: Kramer, E.(2012); <https://es.wikihow.com/usar-un-goni%C3%B3metro>

## 9 COSTOS DEL PROTOTIPO

Como parte de los requerimientos era diseñar un prototipo de bajo costo, por lo que se realizó una comparación con un sistema similar de la empresa “Wit Motion”.

EMPRESA (MARCA)	Dispositivo	Costo
Wit Motion	BWT901BCL High-Precision	5000

Tabla 19 Cotización sistema (BWT901BCL High-Precision)



Figura 42 Modelo IMU de la empresa WIT MOTION

Para mayor información dirigirse a: [BWT901BCL MPU9250 High-Precision 9-axis Gyroscope Angle\(XY 0.05° Accuracy\) Magnetometer Barometer \(wit-motion.com\)](http://www.wit-motion.com)

Este ejemplar te ofrece una interfaz muy amigable con el usuario desde el celular, además de su calibración automática, brindando 200 datos por segundo reales y el vistazo de graficas en tiempo real. El costo está reflejado en función del tiempo, estudio y desarrollo de su modelo y sus características. Cabe mencionar que la información de precios en general es muy hermética de cada compañía por lo que fue necesario el contacto directo con Wit Motion.

Por otro lado, se muestra cada componente que se utilizó en este trabajo:



Unidad	Dispositivo	Costo	Costo Total
2	Módulo MPU 9250	25	50
2	Microcontrolador Esp32	15	30
2	Placas impresas(Circuito)	7	14
2	Switch de encendido	0,5	1
2	Baterías 800 mAh (3.7 V)	9	18
2	Impresiones 3D Carcasa	10	20
1	Rollo Velcro	4	4
1	Cable USB data/carga	5	5
1	Interfaz	100	100
<b>TOTAL:</b>			<b>242</b>

Tabla 20 Descripción unitario del costo del prototipo

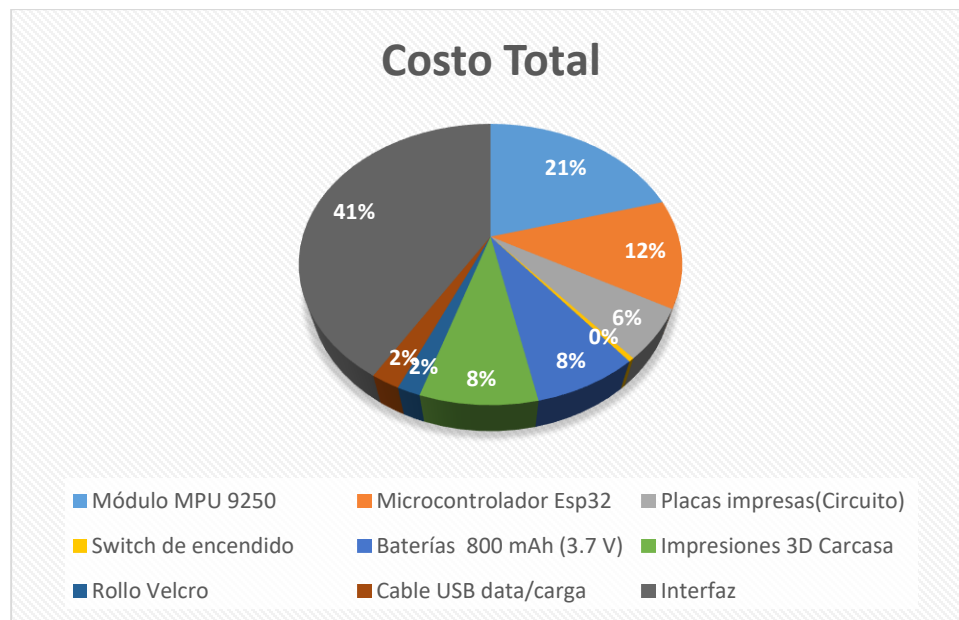


Figura 43 Tabulación porcentual del costo total del prototipo

Estos costos podrían variar dependiendo de la localización y del transcurso del tiempo.

## 10 TRABAJOS FUTUROS

Con un prototipo funcional lo que se sugiere más adelante es relacionarse con otras ramas de la ingeniería como sistemas y electrónica para que puedan participar con ámbitos de conexión, programación en páginas web y desarrollo de aplicaciones móviles. Así mismo con el área de salud, en donde finalmente se podrá fusionar un producto final certificado para el mercado nacional.

Por consiguiente, tenemos dos puntos específicos en los que se podrá trabajar:

**Aumento de módulos:** agregar más sensores, para su funcionamiento en simultaneo con varias extremidades.

**Interfaz:** se podrá crear una aplicación en pc o móvil para uso remoto, para que los pacientes no tengan que dirigirse constantemente a un consultorio; dependiendo de su lesión. De esta manera el usuario podrá obtener un beneficio en aspectos de transporte, tiempo y dinero.

Cabe mencionar que a pesar de centrarse en aspectos médicos podrían aumentar su uso en casos veterinarios o incluso de rastreo con más desarrollo y presupuesto.

## 11 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

### 11.1 Discusiones

Es necesario dirigir nuestra atención al procesamiento de datos crudos provenientes de los sensores (Acelerómetro, Giroscopio, Magnetómetro) del módulo MPU-9250. La implementación del filtro de Kalman extendido con cuaterniones emerge como una necesidad imperante para mejorar la precisión en la estimación de la orientación. El EKF (filtro de Kalman extendido) demuestra una eficaz capacidad para procesar datos, reducir ruidos y mejorar la deriva y acumulación de errores inherentes a las mediciones inerciales. Su robusto algoritmo y eficiencia computacional son elementos clave en este logro. Sin embargo, la sensibilidad a las condiciones iniciales destaca la importancia de la calibración precisa de los sensores.

La elección de representar la orientación mediante cuaterniones se revela como una decisión estratégica, ya que, en comparación con métodos populares como los ángulos de Euler, los cuaterniones superan limitaciones tales como bloqueos de gymbal y singularidades inherentes. La calibración, por ende, emerge como un paso crítico para el óptimo funcionamiento del filtro, implementándose funciones específicas en el programa asociadas a la librería del módulo MPU9250.h.

Este proyecto tiene aplicaciones prácticas diversas, con un desarrollo especialmente avanzado en el ámbito aeroespacial. Se desarrolla un método de pruebas para verificar la capacidad del sistema, sin embargo, se considera que la comparación con el sistema VICON podrá demostrar la precisión del sistema debido a que ya se considera que este es un sistema extremadamente preciso. Es crucial establecer esto como un límite para futuros estudios y

desarrollos. A pesar del bajo costo del sistema, la precisión de los sensores se compensa eficazmente mediante una programación cuidadosa e implementación de algoritmos. Se destaca la importancia de la retroalimentación continua y el tiempo en este proceso de mejora constante.

La implementación de Unidades de Medición Inercial (IMU) plantea consideraciones éticas, especialmente en términos de seguridad y privacidad. Dadas las aplicaciones críticas, como la navegación autónoma, es esencial minimizar riesgos para la seguridad pública. Asimismo, la recopilación de datos inerciales requiere consentimiento y transparencia en su tratamiento. El diseño y la implementación de este sistema IMU se rigen por sólidos principios éticos, basados en la ética de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).

## **11.2 Conclusiones**

El uso de un sistema Inercial en aplicaciones médicas ha demostrado ser altamente beneficioso para diversas áreas, ya que proporciona información valiosa sobre el movimiento y la posición del cuerpo. En conclusión, su capacidad para medir la aceleración, la velocidad angular y, en algunos casos, el campo magnético, permite una evaluación detallada de la función motora y la biomecánica de los pacientes.

- El desarrollo de sensores IMU fue parcialmente exitoso ya que se logró obtener un sistema inalámbrico que muestre un interfaz en vivo, pero se considera que no se obtienen los datos a la velocidad deseada.
- La implementación del filtro de cuaterniones de Mahony ha mejorado significativamente la precisión de las estimaciones de orientación.

- La combinación del filtro de los filtros con la representación de orientación mediante cuaterniones supera las limitaciones de otros métodos de estimación.
- La elección de cuaterniones mitiga problemas técnicos como el bloqueo del gymbal y singularidades, mejorando la estabilidad y robustez del sistema.
- Desafíos identificados, como la calibración precisa del MPU9250 y la gestión de condiciones iniciales, han sido abordados durante la implementación.
- El proyecto no solo se enfoca en mejoras técnicas, sino también en la usabilidad, con una conexión inalámbrica y un diseño de caja para una experiencia más cómoda y eficiente.
- La atención a la calibración y usabilidad busca desarrollar un sistema de sensores inerciales que sea fácilmente desplegable en entornos del mundo real.
- Las pruebas de testeo nos dan una idea del alcance de cada filtro, y se ven afectadas por los requerimientos computacionales y demora de cada uno.
- La incorporación de una conexión inalámbrica y el diseño ergonómico de la caja demuestran una consideración cuidadosa de aspectos prácticos para mejorar la aplicabilidad del sistema.
- Las pruebas utilizadas demuestran que los filtros están listos para un rango limitado de funciones y puede ser mejorado.
- La implementación de los filtros, especialmente el de Mahony, no solo mejora la precisión de las estimaciones de orientación, sino que también aborda desafíos prácticos, destacando la importancia de la mejora técnica y la consideración de aspectos prácticos para un sistema eficiente en diversas situaciones.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- A. Kim and M. F. Golnaraghi, "A quaternion-based orientation estimation algorithm using an inertial measurement unit," PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), Monterey, CA, USA, 2004, pp. 268-272, doi: 10.1109/PLANS.2004.1309003.
- Bennett, Terrell & Jafari, Roozbeh & Gans, Nicholas. (2013). An Extended Kalman Filter to Estimate Human Gait Parameters and Walking Distance. Proceedings of the American Control Conference. 2013. 752-757. 10.1109/ACC.2013.6579926.
- Cardona, J. (sf). ESTÁNDARES DE CALIDAD PARA PRODUCTOS. Obtenido de GRUPO INVERTRÓNICA: <https://colcircuitos.com/estandares-calidad-productos-electronicos/>
- Chaulk, M., (2011), *Inertial Measurement Unit (IMU) testing procedure*, NRC Publications Archive, obtenido de, [nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=4847c0f5-7134-4ac0-af5-b5796ddf63b9#:~:text=The basic concept of the,in motion \(dynamic tests\).](http://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=4847c0f5-7134-4ac0-af5-b5796ddf63b9#:~:text=The basic concept of the,in motion (dynamic tests).)
- Favare, J. (2006), *Quaternion-based fusion of gyroscopes and accelerometers to improve 3D angle measurement*. Vol. 42 N 11, Electronic Letters, <https://www.proquest.com/openview/3fe7efe3e3b2478f7cb95557f6d2ccc5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1936364>.
- Franklin, W. (2022). *Kalman Filter Made Easy*. Franklin.
- Ghasemi-Moghadam, S, Homaeinezhad, MR. Attitude determination by combining arrays of MEMS accelerometers, gyros, and magnetometers via quaternion-based complementary filter. *Int J Numer Model*. 2018; 31: e2282. <https://doi.org/10.1002/jnm.2282>.
- Jahja, M. (2017), *Kalman Filter, Sensor Fusion, and Constrained Regression: Equivalences and Insights*. Berkley University. <https://www.stat.berkeley.edu/~ryantibs/papers/sensorfus.pdf>.
- LANDA-JIMÉNEZ, M. A., GONZÁLEZ-GASPAR, P., MONTES-GONZÁLEZ, F. M., MORGADO-VALLE, C., & BELTRÁN-PARRAZAL, L. (2022). An open-source low-cost wireless sensor system for acquisition of human movement data. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*, 94(1), e20191419. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220191419>
- Renaudin, V., & Combettes, C. (2014). Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation. *Sensors*, 14(12), 22864–22890. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s141222864>.

- Sajjad, B. (2022), *9-DOF IMU-Based Attitude Heading Estimation Using an Extended Kalman Filter with Bias Consideration*. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, <https://www.stat.berkeley.edu/~ryantibs/papers/sensorfus.pdf>.
- Salehi, S., Bleser, G., Reiss, A., & Stricker, D. (2015). Body-IMU autocalibration for inertial hip and knee joint tracking. *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, "2" (5). <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.28-9-2015.2261522>
- Serra, J. (2020). Estándar NMEA. Obtenido de Informática a bordo.
- Versteyhe M, De Vroey H, Debrouwere F, Hallez H, Claeys K. A Novel Method to Estimate the Full Knee Joint Kinematics Using Low Cost IMU Sensors for Easy to Implement Low Cost Diagnostics. *Sensors (Basel)*. 2020 Mar 18;20(6):1683. doi: 10.3390/s20061683. PMID: 32197330; PMCID: PMC7147475
- Y. Guan and X. Song, "Sensor Fusion of Gyroscope and Accelerometer for Low-Cost Attitude Determination System," 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2018, pp. 1068-1072, doi: 10.1109/CAC.2018.8623031.

## 13 ANEXOS

### 13.1 Código de Programación

```

/*****
**
* Example sketch for the MPU9250_WE library
*
* This sketch shows how measure x,y angles with high accuracy up to ~60°.
* In addition the sketch provides the orientation of the modules, i.e. the
* axis with the highest positive g value.
*
* For further information visit my blog:
*
* https://wolles-elektronikkiste.de/mpu9250-9-achsen-sensormodul-teil-1 (German)
* https://wolles-elektronikkiste.de/en/mpu9250-9-axis-sensor-module-part-1 (English)
*
*****/

```

```

#include <MPU9250_WE.h>
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <AsyncTCP.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Arduino_JSON.h>
#include <SPIFFS.h>
#include <SPI.h.>

```

```

// Replace with your network credentials
const char* ssid = "GUALOTUNA";
const char* password = "1708708670";

```

```

// Create AsyncWebServer object on port 80
AsyncWebServer server(80);

```

```

// Create an Event Source on /events
AsyncEventSource events("/events");

```

```

// Json Variable to Hold Sensor Readings
JSONVar readings;

```



```

int gyroX, gyroY, gyroZ;
float accX, accY, accZ;
float pitch, yaw, roll;

// Timer variables
unsigned long lastTime = 0;
unsigned long lastTimePyr = 0;
unsigned long lastTimeAcc = 0;
unsigned long gyroDelay = 10;
unsigned long pyrDelay = 300;
unsigned long temperatureDelay = 1000;
unsigned long accelerometerDelay = 200;

#define MPU9250_ADDR 0x68

/* There are several ways to create your MPU9250 object:
 * MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE()          -> uses Wire / I2C Address = 0x68
 * MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(MPU9250_ADDR)  -> uses Wire /
MPU9250_ADDR
 * MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(&wire2)      -> uses the TwoWire object
wire2 / MPU9250_ADDR
 * MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(&wire2, MPU9250_ADDR) -> all together
 * Successfully tested with two I2C busses on an ESP32
 */
MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(MPU9250_ADDR);

void initSPIFFS() {
  if (!SPIFFS.begin()) {
    Serial.println("An error has occurred while mounting SPIFFS");
  }
  Serial.println("SPIFFS mounted successfully");
}

// Initialize WiFi
void initWiFi() {
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.println("");
  Serial.print("Connecting to WiFi...");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    Serial.print(".");

```

```

    delay(1000);
  }
  Serial.println("");
  Serial.println(WiFi.localIP());
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  initWiFi();
  initSPIFFS();
  delay(2000);
  if(!myMPU9250.init()){
    Serial.println("MPU9250 does not respond");
  }
  else{
    Serial.println("MPU9250 is connected");
  }
}

/* The slope of the curve of acceleration vs measured values fits quite well to the
theoretical
* values, e.g. 16384 units/g in the +/- 2g range. But the starting point, if you position the
* MPU9250 flat, is not necessarily 0g/0g/1g for x/y/z. The autoOffset function measures
offset
* values. It assumes your MPU9250 is positioned flat with its x,y-plane. The more you
deviate
* from this, the less accurate will be your results.
* The function also measures the offset of the gyroscope data. The gyroscope offset does
not
* depend on the positioning.
* This function needs to be called at the beginning since it can overwrite your settings!
*/
Serial.println("Position you MPU9250 flat and don't move it - calibrating...");
delay(1000);
myMPU9250.autoOffsets();
Serial.println("Done!");

/* This is a more accurate method for calibration. You have to determine the minimum
and maximum
* raw acceleration values of the axes determined in the range +/- 2 g.
* You call the function as follows: setAccOffsets(xMin,xMax,yMin,yMax,zMin,zMax);
* Use either autoOffset or setAccOffsets, not both.
*/
//myMPU9250.setAccOffsets(-14240.0, 18220.0, -17280.0, 15590.0, -20930.0, 12080.0);

```

```

/* Sample rate divider divides the output rate of the gyroscope and accelerometer.
 * Sample rate = Internal sample rate / (1 + divider)
 * It can only be applied if the corresponding DLPF is enabled and 0<DLPF<7!
 * Divider is a number 0...255
 */
//myMPU9250.setSampleRateDivider(5);

/* MPU9250_ACC_RANGE_2G    2 g
 * MPU9250_ACC_RANGE_4G    4 g
 * MPU9250_ACC_RANGE_8G    8 g
 * MPU9250_ACC_RANGE_16G   16 g
 */
myMPU9250.setAccRange(MPU9250_ACC_RANGE_2G);

/* Enable/disable the digital low pass filter for the accelerometer
 * If disabled the bandwidth is 1.13 kHz, delay is 0.75 ms, output rate is 4 kHz
 */
myMPU9250.enableAccDLPF(true);

/* Digital low pass filter (DLPF) for the accelerometer (if DLPF enabled)
 * MPU9250_DPLF_0, MPU9250_DPLF_2, ..... MPU9250_DPLF_7
 * DLPF   Bandwidth [Hz]   Delay [ms]   Output rate [kHz]
 * 0       460              1.94        1
 * 1       184              5.80        1
 * 2       92               7.80        1
 * 3       41               11.80       1
 * 4       20               19.80       1
 * 5       10               35.70       1
 * 6       5                66.96       1
 * 7       460              1.94        1
 */
myMPU9250.setAccDLPF(MPU9250_DPLF_6);

// Handle Web Server
server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
  request->send(SPIFFS, "/index.html", "text/html");
});

server.serveStatic("/", SPIFFS, "/");

server.on("/reset", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
  gyroX = 0;
  gyroY = 0;

```

```

    gyroZ = 0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

server.on("/resetX", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
    gyroX = 0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

server.on("/resetY", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
    gyroY = 0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

server.on("/resetZ", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest * request) {
    gyroZ = 0;
    request->send(200, "text/plain", "OK");
});

// Handle Web Server Events
events.onConnect([](AsyncEventSourceClient * client) {
    if (client->lastId()) {
        Serial.printf("Client reconnected! Last message ID that it got is: %u\n", client->lastId());
    }
    // send event with message "hello!", id current millis
    // and set reconnect delay to 1 second
    client->send("hello!", NULL, millis(), 10000);
});
server.addHandler(&events);

server.begin();

}

String getGyroReadings() {
    xyzFloat gValue = myMPU9250.getGValues();
    readings["gyroX"] = String(gValue.x);
    readings["gyroY"] = String(gValue.y);
    readings["gyroZ"] = String(gValue.z - 1);

    String jsonString = JSON.stringify(readings);
    Serial.print("JSON.stringify(myObject) = ");
    Serial.println(jsonString);
}

```

```

Serial.println();
return jsonString;

}

String getAccReadings() {
  xyzFloat angle = myMPU9250.getAngles();
  readings["accX"] = String(angle.x);
  readings["accY"] = String(angle.y);
  readings["accZ"] = String(angle.z);

  String accString = JSON.stringify(readings);
  Serial.print("acc.stringify(myObject) = ");
  Serial.println(accString);

  Serial.println();
  return accString;

}

String getAngPYR() {
  float pitch = myMPU9250.getPitch();
  float roll = myMPU9250.getRoll();
  //float yaw = myMPU9250.getYaw();

  readings["roll"] = String(roll);
  readings["pitch"] = String(pitch);
  readings["yaw"] = String(yaw);
  String PYRString = JSON.stringify(readings);
  Serial.print("PYR.stringify(myObject) = ");
  Serial.println(PYRString);

  Serial.println();
  return PYRString;

}

void loop() {
  xyzFloat gValue = myMPU9250.getGValues();
  xyzFloat angle = myMPU9250.getAngles();

  if ((millis() - lastTimeAcc) > accelerometerDelay) {

```

```

// getSensorReadings();
getAccReadings();

// Send Events to the Web Server with the Sensor Readings
events.send(getAccReadings().c_str(), "acc_readings", millis());
lastTimeAcc = millis();
}
if ((millis() - lastTime) > gyroDelay) {
  getGyroReadings();
  events.send(getGyroReadings().c_str(), "gyro_readings", millis());
  lastTime = millis();
}
if ((millis() - lastTimePyr) > pyrDelay) {
  getAngPYR();
  events.send(getAngPYR().c_str(), "PYR_readings", millis());
  lastTimePyr = millis();
}

/* For g-values the corrected raws are used */
Serial.print("g-x  = ");
Serial.print(gValue.x);
Serial.print(" | g-y  = ");
Serial.print(gValue.y);
Serial.print(" | g-z  = ");
Serial.println(gValue.z);

/* Angles are also based on the corrected raws. Angles are simply calculated by
   angle = arcsin(g Value) */
Serial.print("Angle x = ");
Serial.print(angle.x);
Serial.print(" | Angle y = ");
Serial.print(angle.y);
Serial.print(" | Angle z = ");
Serial.println(angle.z);

Serial.print("Orientation of the module: ");
Serial.println(myMPU9250.getOrientationAsString());

Serial.println();

delay(20);

}

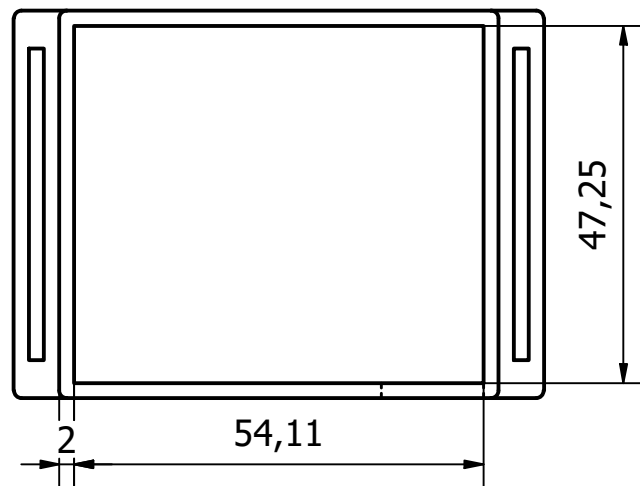
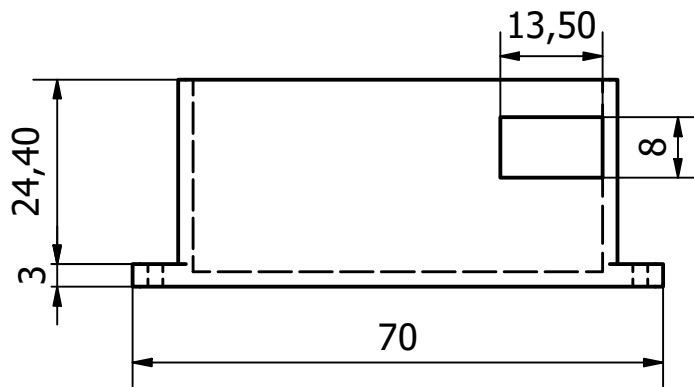
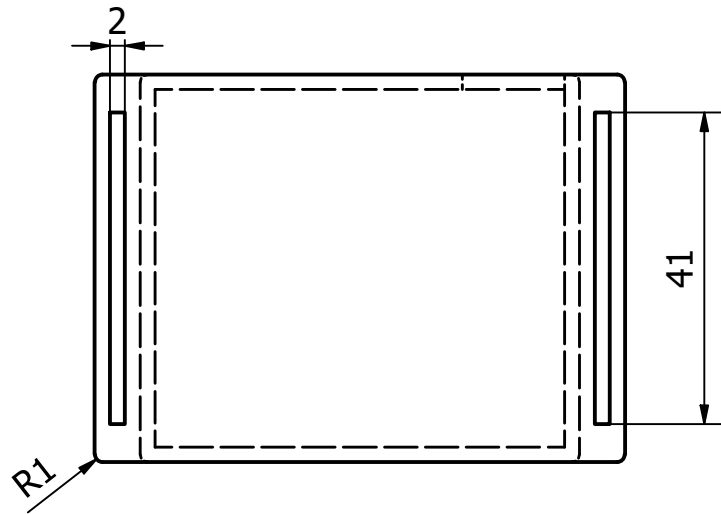
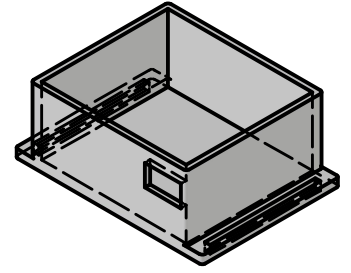
```


### **13.2 Planos de la Caja para el Sistema**

En caso de requerir el diseño de la caja diríjase a los siguientes planos: caja y tapa respectivamente.

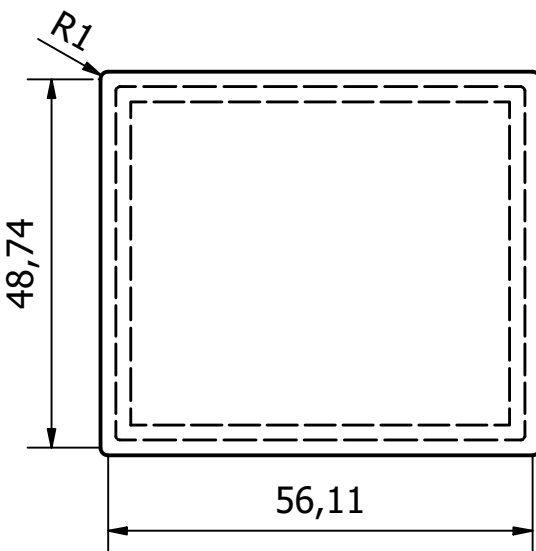
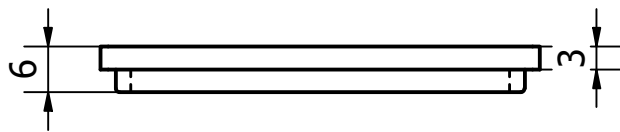
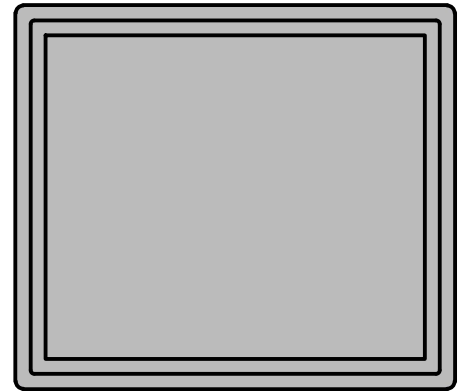
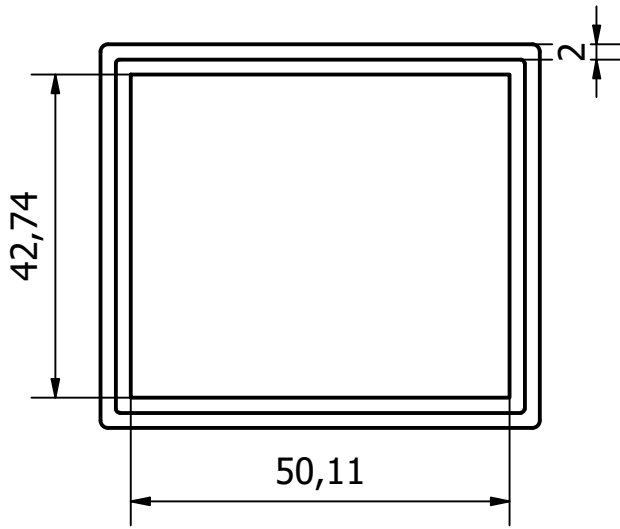
### **13.3 Manual de Operación y Mantenimiento**


Para el uso correcto del sistema y su manutención diríjase al Manual de Operación y Mantenimiento.



Designed by <b>Andrés Molina</b>	Checked by <b>Patricio Chiriboga</b>	Approved by <b>Patricio</b>	Scale: 1:1	Date <b>24/10/2023</b>	Material <b>PLA</b>
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Nota: 2 piezas de las mismas			
		Caja Reloj		Code APP3D1	Sheet 1





Designed by Andrés Molina	Checked by Patricio Chiriboga	Approved by Patricio	Scale: 1:1	Date 24/10/2023	Material PLA
 UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO		Nota: 2 piezas de las mismas			
		Tapa Reloj		Code APP3D2	Sheet 2

# IMU & SOFTWARE



ORIENTACIÓN:

ROLL  
PITCH  
YAW

Aplicación Medica

# MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO



# ÍNDICE



- 1.INTRODUCCIÓN
- 2.LISTADO DE COMPONENTES
- 3.CONEXIÓN
- 4.CORRECTO USO DEL EQUIPO
- 5.MANTENIMIENTO FRECUENTE
- 6.MANTENIMIENTO ELECTRÓNICO
- 7.PROVEEDORES

# Introducción

A continuación, se presenta el manual de usuario y mantenimiento para el Sensor Inercial (IMU), con el objetivo de ser una herramienta fácil de usar y comprender. El manual está diseñado para ser útil tanto para operadores de máquinas como para personal de mantenimiento.

**El manual se divide en cuatro secciones:**

## **Instrucciones de Uso**

Detalla las funciones y la secuencia operativa para los operadores, facilitando la verificación del correcto funcionamiento del IMU.

## **Mantenimiento Frecuente**

Incluye recomendaciones generales, tareas preventivas y correctivas, y listas de repuestos, dirigidas al personal de mantenimiento y al operador para la fabricación.

## **Mantenimiento de Electrónico**

Describe las tareas específicas para mantener las partes eléctricas y de control del IMU en óptimas condiciones.

## **Procedimientos de Conexión y Transmisión**

Enfocado en la instalación de archivos y en la transmisión de datos por Wifi, asegurando una operación fluida.

Este manual, diseñado para ser claro y conciso, garantiza que cualquier usuario pueda desarrollar y utilizar el sensor inercial y mantenga su rendimiento a lo largo del tiempo. Siga cada sección para una experiencia eficiente y duradera.

# Listado de componentes

Unidad	Dispositivo
1	Módulo MPU 9250
1	Microcontrolador Esp32
1	Placa impresa (Circuito)
1	Switch de encendido
1	Batería 800 mAh (3.7 V)
1	Carcasa
1	Cinta de sujeción
1	Interfaz



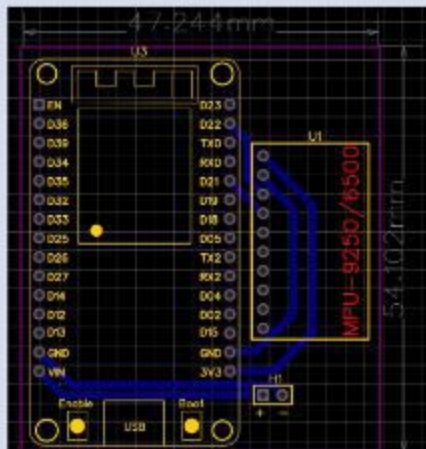
Sistema Armado



Interfaz

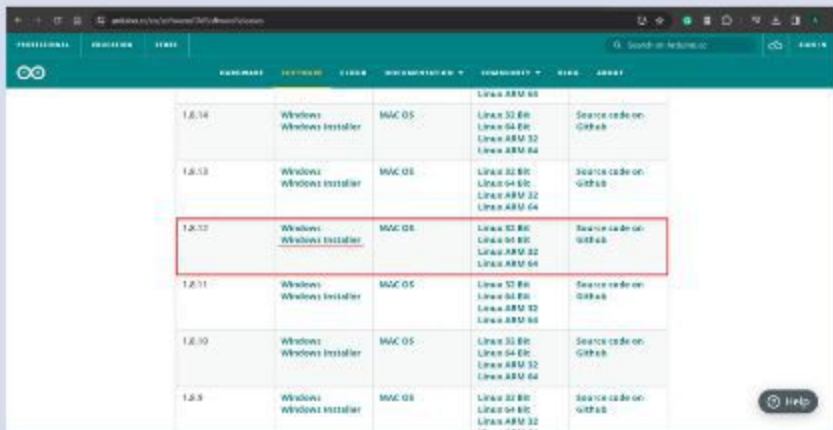
# Conexión

El fabricante entregara su dispositivo IMU totalmente armado, sin embargo, para una posible desconexión y reconexión siga el siguiente mapa de enlaces, que le permitirán unir nuevamente todo el sistema:



# Correcto Uso Del Equipo

1. Descargar e instalar Arduino IDE del siguiente link:  
<https://www.arduino.cc/en/software/OldSoftwareReleases>



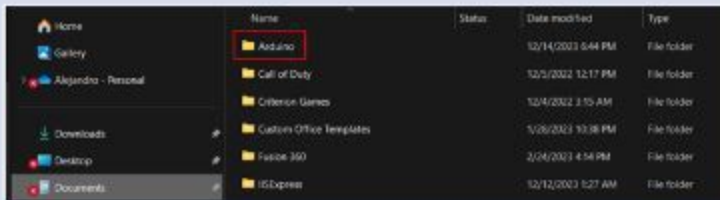
The screenshot shows the Arduino website's 'Old Software Releases' page. The page features a table with columns for version number, download type, operating system, supported architectures, and source code availability. The row for version 1.8.12 is highlighted with a red border.

Version	Download	OS	Architectures	Source Code
1.8.14	Windows Installer	MAC OS	Linux ARM 64 Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32 Linux ARM 64	Source code on GitHub
1.8.13	Windows Installer	MAC OS	Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32 Linux ARM 64	Source code on GitHub
1.8.12	Windows Installer	MAC OS	Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32 Linux ARM 64	Source code on GitHub
1.8.11	Windows Installer	MAC OS	Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32 Linux ARM 64	Source code on GitHub
1.8.10	Windows Installer	MAC OS	Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32 Linux ARM 64	Source code on GitHub
1.8.9	Windows Installer	MAC OS	Linux 32 Bit Linux 64 Bit Linux ARM 32	Source code on GitHub

## 2. Descargar el archivo comprimido con el código del siguiente link:

[https://drive.google.com/file/d/1fk9b-mRLoYoKDbOtjfZKTU8k11IveJZf/view?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/file/d/1fk9b-mRLoYoKDbOtjfZKTU8k11IveJZf/view?usp=drive_link)

## 3. Descomprimir el archivo en la carpeta Arduino que se genera



Name	Status	Date modified	Type
Arduino		12/14/2023 6:44 PM	File folder
Call of Duty		12/5/2023 12:17 PM	File folder
Criticism Games		12/4/2023 3:15 AM	File folder
Custom Office Templates		1/26/2023 10:38 PM	File folder
Fusion 360		2/24/2023 4:34 PM	File folder
IG Express		12/12/2023 1:27 AM	File folder

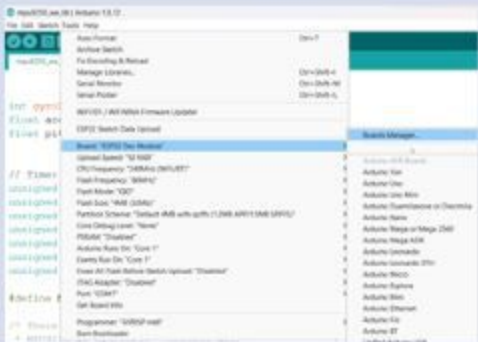
## 4. Abrir el código



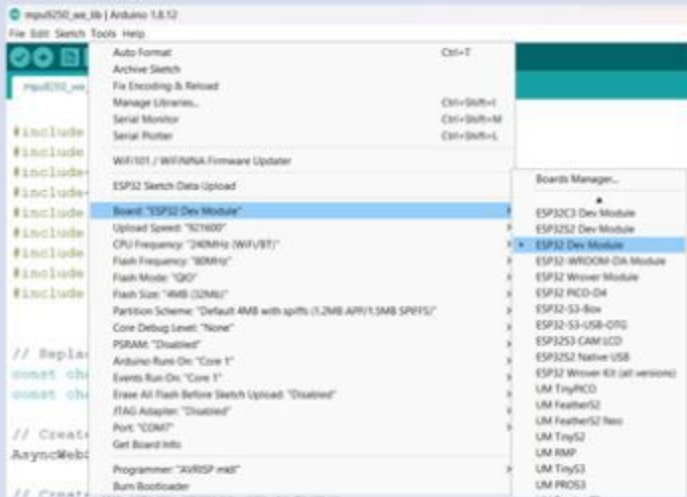
data	12/5/2023 3:39 PM	File folder	
mpu9250_wellibino	12/14/2023 6:22 PM	Arduino file	10 KB




5. Debemos instalar la placa esp32 en Arduino ide. Abrimos la pestaña tool -> Board -> Boards manager. En la ventana de boards manager buscamos esp32 e instalamos como se muestra en la figura.



## 6. Una vez instalado paquete abrimos la pestaña Tool -> Board y elegimos ESP32 Dev Module



7. Debemos modificar las credenciales para la conexión WIFI en el código. SSID es el nombre de la red y password es la clave



The screenshot shows the Arduino IDE interface. The title bar reads "mpu9250\_we\_lib | Arduino 1.8.12". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". The toolbar contains icons for saving, opening, and other functions. The command prompt shows "mpu9250\_we\_lib \$". The code editor contains the following text:

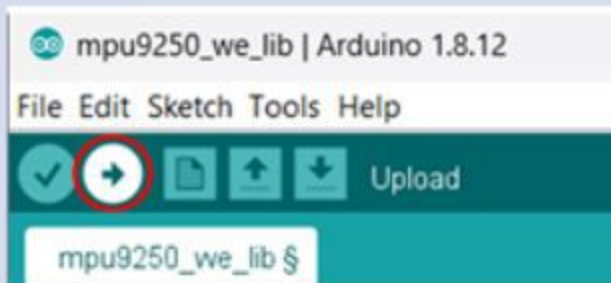
```
// Replace with your network credentials:  
const char* ssid = "Alejo S20";  
const char* password = "rbkr9579";
```

The lines defining 'ssid' and 'password' are highlighted with a red rectangular box.

8. Conectamos el cable micro USB a la placa y el USB tipo A en la computadora



9. Ahora debemos compilar y subir el código a la placa esp32



10. Después de la complicación se debe subir el código a la placa. Como podemos observar cuando en el terminal aparece connecting en ese momento debemos aplastar el botón Boot que se encuentra en el microcontrolador ESP32

```
Sketch uses 970189 bytes (64%) of program storage space. Maximum is 1510720 bytes.  
Global variables use 41352 bytes (13%) of dynamic memory, leaving 294128 bytes for local variables. Maximum is 327680 bytes.  
uploading... [OK]  
reset pins: none  
uploading... [OK]
```



11. Una vez subido el código, sin errores, el terminal estará como se muestra en la imagen



```
Uploading...  
Uploading wt_040004040... (30 KB)  
Uploading wt_040004040... (31 KB)  
Uploading wt_040004040... (32 KB)  
Uploading wt_040004040... (33 KB)  
Uploading wt_040004040... (34 KB)  
Done 17040 bytes (33%) compressed at 040004040 in 10.0 seconds (effective 700 KB/sec) ...  
Done 17040 bytes verified.  
Uploading...  
Done uploading via USB port...
```

12. Ahora abrimos el monitor serial y aparecerán los siguientes datos, nos fijamos en el número IP que nos permite acceder a la página web



```
Connecting to WiFi....  
192.168.171.103  
SPIFFS mounted successfully  
MPU9250 is connected  
Position you MPU9250 flat and don't move it - calibrating...  
Done!
```

13. Copiamos y pegamos la dirección IP en el buscador y aparecerá la interfaz. Es importante que el dispositivo en el que se desee abrir la interfaz este conectado a la misma red WIFI pues es una conexión de IP local

MPU9250 MOVIMIENTO

**GYROSCOPIO**

- X: 5.21 grados/s
- Y: -0.00 grados/s
- Z: -0.00 grados/s

**ACCELEROMETRO**

- X: 0.46 g
- Y: 0.24 g
- Z: 0.77 g

**PITCH - ROLL - YAW**

- Roll (X): -0.13 grados
- Pitch (Y): -0.21 grados
- Yaw (Z): 0.00 grados

**CONTROL 3D**

INICIAR POSICION

**14. Finalmente podrá colocar el dispositivo en cualquier extremidad y podrá notar en la interfaz la respuesta inmediata de los ángulos de orientación.**

A continuación se muestra un ejemplo de cómo podría sujetar su dispositivo:





# MANTENIMIENTO FRECUENTE

1.Revisión de grietas en el case, en caso de requerir una nueva dirigirse a la parte de anexos en el proyecto donde podrá revisar el modelo en el plano para la impresión en 3D. De requerir el CAD directamente, comunicarse con el fabricante.

2. Revisar constantemente el sistema de sujeción y asegurarse que este siga ajustando de forma óptima. Se debe cambiar si se considera que la sujeción compromete los resultados experimentales.



**Referencias técnicas para la caja de sensores:**



Referencia Plano	Elemento Referencia Proveedor	Acción Recomendada	Frecuencia
Anexo (caja y tapa)	Impresión 3D (PLA) a su preferencia	Visualizar grietas por golpe o caída	Cada uso

# MANTENIMIENTO ELECTRÓNICO

1. Se debe mantener la caja, el sensor y el microcontrolador limpio para reducir posibles causas de daños en los elementos electrónicos. Entre estos polvo, pelusa, etc. Se recomienda no exponerlo al agua o a cualquier líquido en general.

2. Apagar el dispositivo desde el switch cuando no lo esté usando, de esta manera mantendrá la carga de la batería. La carga de la batería tiene una duración constante de 4 horas y para cargarla únicamente conecte el cable USB a su PC durante una hora



## Nota:

La vida útil de los dispositivos electrónicos puede variar significativamente según el tipo de dispositivo, la calidad de fabricación, el uso y otros factores. No existe un limitante de tiempo. Además, es importante destacar que la vida útil percibida de un dispositivo puede verse afectada por la rapidez con la que avanza la tecnología y la disponibilidad de nuevas funciones y características.



# Proveedores

En caso de requerir algún recambio en su sistema IMU, contactarse con los siguientes distribuidores:

Proveedor	Artículo	Contacto	Ubicación
Robotics Ecuador	Módulo MPU 9250	0984354637	Venezuela N11-249 y Caldas
MGSYSTEM	Módulo MPU 9250	0995273469	Av. Teniente Hugo Ortiz 527-12
Electrónica PI	Microcontrolador Esp32	0999074173	Centro Comercial Plaza, Av. General Rumiñahui y, Av. Ilaló
3D Desing ART STUDIO	Impresión 3D	0969060931	Valle de los Chillos, Conocoto
EV	Impresión de circuito	0999817956	Av. Ilaló 149 y Autopista General Rumiñahui

