

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA  
INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado

EVALUACIÓN DE SISTEMAS INERCIALES PARA LA  
CLASIFICACIÓN DE LA ACTIVIDAD FÍSICA

ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Alejandro Cabezuelo Gutiérrez

**Tutor:** Ana Jiménez Martín

**Cotutor:** David Gualda Gómez

**2019**



UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA  
INDUSTRIAL**

Trabajo Fin de Grado

**Evaluación de sistemas inerciales para la clasificación de  
la actividad física**

**Autor:** Alejandro Cabezuelo Gutiérrez

**Tutor:** Ana Jiménez Martín

**Cotutor:** David Gualda Gómez

**TRIBUNAL:**

**Presidente:** José Manuel Villadangos Carrizo

**Vocal 1:** Elena López Guillén

**Vocal 2:** Ana Jiménez Martín

**FECHA:** .....

**CALIFICACIÓN:** .....





*A mi familia, la de verdad, y a Andrea...*



## AGRADECIMIENTOS

---

Agradecer a mi tutora Ana, y cotutor David, por guiarme, aconsejarme y darme apoyo en el desarrollo de las ideas y planteamientos que están expuestos en este Trabajo de Fin de Grado. La constancia de su asesoramiento ha sido un factor determinante para que este proyecto se haya llevado a cabo. De igual manera, dar las gracias al grupo de investigación GEINTRA US&RF, en especial a los miembros del laboratorio O22, por abrirme las puertas de sus proyectos y líneas de trabajo.

Dar las gracias a todos los compañeros de esta larga etapa que se cierra con este TFG. A Sergio Elvira, Borja García, Daniel Vacas, y Juan Dolado, por todos los momentos compartidos que nos han permitido crecer juntos y crear una unión que espero que jamás se rompa. En especial a Alberto Yunta, por ser un gran amigo en los buenos y malos momentos, y por ayudarme a alcanzar la meta de la carrera más difícil en la que jamás he participado y participaré.

El agradecimiento más especial va dirigido a mi familia, la que ha estado siempre presente para ayudarme a no rendirme y a seguir luchando, y para ofrecerme su cariño y apoyo en situaciones difíciles. Gracias a mis padres y a mi hermana que nunca han dejado de creer en que este largo viaje llegaría a su fin. Sin su apoyo incondicional este camino no hubiese tenido el final que merecía.

Por último, quiero dar las gracias a Andrea. No he podido tener mayor suerte de tener a una persona como ella a mi lado para llegar al final de este viaje en el que siempre ha estado acompañándome, aconsejándome y contagiándome su positivismo. No puedo estar más agradecido. Simplemente gracias, porque de no ser por ella no lo habría conseguido.



# I - RESUMEN

---

En este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se presenta una evaluación detallada de los sistemas de medida inercial (IMUs) que son empleados en aplicaciones que tienen como objetivo realizar una clasificación de la actividad física. Para ello se hará uso de una selección de dispositivos disponibles en el mercado, y se implementarán una serie de algoritmos que proporcionen la información requerida para la evaluación.

La selección de los dispositivos sometidos a evaluación se ha llevado a cabo tras una búsqueda bibliográfica de las IMUs que presentan un nivel de prestaciones acorde a lo requerido para las aplicaciones presentadas. Se han localizado un total de 24 dispositivos, y se han clasificado en tres bloques en función de sus prestaciones principales. Se han analizado los parámetros de funcionamiento más característicos, así como las especificaciones técnicas más relevantes para establecer un criterio de selección. Bajo este criterio se han elegido cuatro dispositivos a evaluar.

La evaluación a la que han sido sometidas las IMUs ha permitido estudiar el funcionamiento de los dispositivos cuando son empleados en aplicaciones de clasificación de actividad física. Se han implementado dos algoritmos principales para obtener los ángulos de Euler a partir de los datos brutos del acelerómetro y giróscopo de los dispositivos, y para obtener información sobre el posicionamiento. Se ha propuesto una mejora del algoritmo de estimación de ángulos de Euler utilizado inicialmente, y se ha comprobado que reduce hasta en un 60% el error de desviación en la señal de orientación.

Por último se presenta una serie de pruebas de verificación de características que tienen como objetivo validar las prestaciones que ofrecen las IMUs. Se han analizado los resultados, probando distintas ubicaciones de posicionamiento de los dispositivos en el cuerpo (tobillo, muñeca y pecho), y se han estudiado las ventajas e inconvenientes que ofrece cada una de estas posiciones.

**Palabras clave:** Sistemas de medida inercial (IMUs), clasificación de actividad, especificaciones técnicas, algoritmos, prestaciones, configuraciones de posicionamiento.



## II. - ABSTRACT

---

This Final Degree Project (TFG) presents a detailed evaluation of the inertial measurement systems (IMUs) that are typically used in applications aimed to perform a classification of human physical activity. To this purpose, a selection of devices available on the market will be used and a series of algorithms will be implemented to provide the information required for such evaluation.

The selection of the devices submitted to evaluation has been carried out after a bibliographic search of the IMUs that present a level of services according to what is required for the presented applications. A total of 24 devices have been identified. Furthermore, a comprehensive classification has been made in three blocks according to their main features. The key characteristic operating parameters have been analysed as well as the most relevant technical specifications in order establish a sound selection criterion. Under this criterion, four devices have been chosen to undergo this evaluation.

The evaluation to which the IMUs have been submitted has permitted to study the operation of the devices when they are used in physical activity classification applications. Two main algorithms have been implemented to obtain the Euler angles from the raw data of the accelerometer and gyroscope of the devices as well as to obtain information about the positioning. An improvement of the Euler angle estimation algorithm initially used has been proposed, and it has been confirmed that it reduces the error of deviation in the orientation signal by up to 60%.

Finally, a series of tests to further verify their technical characteristics are also presented with the aim of validating the performance of IMUs. The results have been analyzed by testing different positioning locations of the devices in the human body (ankle, wrist and chest) enabling a thorough assessment of the advantages and disadvantages offered by placing the IMUs in each of these body locations.

**Key words:** Inertial measurement unit (IMU), physical activity clasificación, technical specifications, algorithms, features, body locations.





# ÍNDICE

---

I - Resumen.....	8
II. - Abstract .....	10
III. - Memoria.....	20
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	20
1.1 Contexto del trabajo de fin de grado.....	22
1.2 Objetivos del Trabajo de Fin de Grado .....	23
1.3 Campo de aplicación .....	23
1.4 Organización del documento.....	23
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN TEÓRICA A LOS SISTEMAS INERCIALES .....	26
2.1 Introducción a las IMUs .....	28
2.1.1 Acelerómetros .....	29
2.1.2 Giróscopos.....	29
2.1.3 Magnetómetros.....	29
2.1.4 Fusión sensorial .....	30
2.2 Algoritmo de estimación de ángulos de Euler .....	32
2.2.1 Filtro de Kalman Extendido EKF .....	32
2.2.2 Configuración de eje de coordenadas ENU .....	35
2.2.3 Particularización del EKF para la estimación de los ángulos de Euler .....	36
2.3 Algoritmo de posicionamiento .....	38
2.3.1 Detección de pasos.....	40
2.3.2 Estimación de anchura de paso .....	41
2.3.3 Algoritmo de posición relativa.....	42
CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE SISTEMAS INERCIALES.....	44
3.1 Parámetros características de las IMUs .....	46
3.1.1 Nivel de prestaciones .....	46
3.1.2 Características generales .....	47
3.1.3 Parámetros de los sensores.....	47
3.1.4 Especificaciones técnicas .....	47
3.2 Clasificación de las IMUs .....	48
3.2.1 IMUs de menores prestaciones .....	48
3.2.2 IMUs con fusión sensorial.....	51

3.2.3	IMUs avanzadas.....	54
3.3	Características técnicas de las IMUs analizadas .....	57
3.3.1	Características de los sensores .....	57
3.3.2	Características físicas.....	58
3.3.3	Características eléctricas .....	59
3.3.4	Interfaces de comunicación.....	59
3.3.5	Fusión de datos de los sensores .....	59
3.3.6	Fabricantes .....	60
3.3.7	Coste.....	60
3.4	Selección de IMUs .....	61
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS IMUS.....		66
4.1	Implementación de los algoritmos de evaluación .....	68
4.2	Caracterización del BNO055 USB Stick .....	70
4.2.1	Determinación del sistema de coordenadas.....	70
4.2.2	Implementación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler .....	77
4.2.3	Efecto del magnetómetro en los ángulos de Euler .....	80
4.3	Caracterización de la NGIMU.....	83
4.3.1	Verificación del sistema de coordenadas .....	83
4.3.2	Comparativa de los algoritmos de obtención de los ángulos de Euler.....	85
4.3.3	Análisis del efecto de la desviación en la señal de orientación.....	89
4.3.4	Mejora del algoritmo de estimación de los ángulos de Euler .....	91
4.4	Caracterización del BNO080 .....	94
4.4.1	Verificación del sistema de coordenadas .....	94
4.4.2	Implementación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler .....	95
4.4.3	Comparativa de resultados empleando distintos métodos de obtención de datos .....	99
4.5	Evaluación de errores del algoritmo de posicionamiento .....	103
CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE LAS IMUS.....		106
5.1	Pruebas de optimización .....	108
5.2	Pruebas de verificación de características.....	115
5.3	Comparativa de los resultados .....	122
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....		128

IV. - Pliego de condiciones.....	134
V. - Presupuesto.....	140
VI. - Planos.....	144
VII. - Bibliografía.....	152
ANEXO I.....	156
ANEXO II.....	156
ANEXO III.....	158



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama secuencial de los bloques del TFG .....	23
Figura 2: Esquema básico de una IMU de tres sensores .....	28
Figura 3: Matrices básicas de rotación en 3D con sistema de referencia XYZ y UVW .....	30
Figura 4: Representación de los ángulos de Euler XYZ o UVW .....	31
Figura 5: Diagrama básico del proceso de un filtro de Kalman .....	32
Figura 6: Diagrama del proceso iterativo del EKF .....	35
Figura 7: Sistema de coordenadas ENU.....	35
Figura 8: Diagrama básico de la estimación de ángulos de Euler con EKF.....	35
Figura 9: Flujograma del algoritmo de estimación de ángulos de Euler [R. Cervigón 2017] .....	37
Figura 10: Diagrama de aplicación de las IMUs .....	38
Figura 11: Asignación de señales .....	39
Figura 12: Diagrama básico del algoritmo de posicionamiento .....	39
Figura 13: Flujograma del algoritmo de posicionamiento [R. Cervigón 2017] .....	40
Figura 14: Diagrama básico del proceso de detección de pasos .....	41
Figura 15: Definición de SL (anchura de paso).....	41
Figura 16:(izquierda) Relación entre SL y $\Delta\theta$ .....	42
Figura 17: Sistema de referencia del algoritmo de posición relativa.....	42
Figura 18: BNO055 USB Stick .....	62
Figura 19: Dispositivo NGIMU.....	62
Figura 20: Sensor BNO080 y el sistema de evaluación .....	63
Figura 21: SHIMMER3 .....	63
Figura 22: Esquema de implementación de los algoritmos de evaluación .....	68
Figura 23: Obtención de ejes de coordenadas del BNO055 USB Stick .....	70
Figura 24: Disposición de los ejes de coordenadas de BNO055 USB Stick.....	71
Figura 25: Datos del giróscopo del BNO055 USB Stick.....	72
Figura 26: Variación del ROLL del BNO055 USB Stick.....	73
Figura 27: Variación del PITCH del BNO055 USB Stick .....	73
Figura 28: Variación del YAW del BNO055 USB Stick .....	73
Figura 29: Definición de Ángulos de Euler según el sistema de coordenadas del acel./gir. ....	74
Figura 30: Prueba de análisis de limitación de los ángulos de Euler del BNO055 USB Stick.....	75
Figura 31: Prueba 2 de análisis de limitación de los ángulos de Euler del BNO055 USB Stick.....	76
Figura 32: Definición de Ángulos de Euler del BNO055 USB Sitck .....	76
Figura 33: Análisis paramétrico del BNO055 para la obtención de Q.....	78
Figura 34: Análisis paramétrico 2 del BNO055 para la obtención de Q.....	79
Figura 35: Análisis paramétrico 3 del BNO055 para la obtención de Q .....	79
Figura 36: Efecto de las interferencias en el magnetómetro del BNO055 USB Stick. ....	81
Figura 37: Efecto de las interferencias en el magnetómetro del BNO055 USB Stick .....	82
Figura 38: Valores del acelerómetro del NGIMU.....	83
Figura 39: Valores del giróscopo del NGIMU.....	83
Figura 40: Ángulos de Euler del NGIMU .....	84
Figura 41: Definición de los Ángulos de Euler del NGIMU .....	84
Figura 42: Análisis paramétrico del NGIMU para la obtención de Q .....	85
Figura 43: Análisis paramétrico del NGIMU para la obtención de Q .....	86
Figura 44: Comparación de los ángulos de Euler del NGIMU.....	87
Figura 45: Pruebas del NGIMU, en el frontal del tobillo, y en el frontal del muslo.....	89
Figura 46: Análisis de la desviación en distintos voluntarios.....	90
Figura 47: Comparativa 1 de los algoritmos del NGIMU (frontal) .....	92
Figura 48: Comparativa 2 de los algoritmos del NGIMU (lateral).....	93
Figura 49: Sistema de coordenadas del BNO080.....	94

Figura 50: Datos del acelerómetro del BNO080 .....	94
Figura 51: Datos del giróscopo del BNO080 .....	94
Figura 52: Ángulos de Euler del BNO080.....	95
Figura 53: Frecuencia de muestreo de los sensores del BNO080 a 100 Hz y a 50 Hz.....	96
Figura 54: Verificación de la frecuencia de muestreo del BNO080 .....	96
Figura 55: Análisis del tiempo de muestreo del BNO080.....	97
Figura 56: Análisis 2 de la frecuencia de muestreo del BNO080 .....	98
Figura 57: Sistema de evaluación del BNO080 .....	98
Figura 58: Prueba comparativa del BNO080. ....	100
Figura 59: Prueba comparativa 2 del BNO080.....	101
Figura 60: ‘Ground truth’ de las pruebas de evaluación de errores .....	103
Figura 61: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del NGIMU.....	104
Figura 62: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del BNO080 .....	104
Figura 64: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del SHIMMER3.....	104
Figura 63: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del BNO055 USB Stick .....	104
Figura 65: Diagrama del proceso de optimización.....	108
Figura 66: ‘Ground truth’ de las pruebas de optimización.....	109
Figura 67: Posición 1 del pie/tobillo .....	109
Figura 68: Trayectoria NGIMU pos. 1 .....	110
Figura 69: Trayectoria BNO080 pos. 1.....	110
Figura 70: Posición 1 alternativa del pie/tobillo .....	111
Figura 71: Trayectoria NGIMU pos. 1 alternativa .....	111
Figura 72: Trayectoria BNO080 pos. 1 alternativa .....	111
Figura 73: Posición 2.....	112
Figura 74: Trayectoria NGIMU pos. 2 .....	112
Figura 75: Trayectoria BNO080 pos. 2.....	113
Figura 76: Posición 3.....	113
Figura 77: Trayectoria NGIMU pos. 3 .....	114
Figura 78: Trayectoria BNO080 pos. 3.....	114
Figura 79: Posición 1 de las pruebas de verificación.....	115
Figura 80: Trayectoria prueba 1 pos. 1 NGIMU .....	116
Figura 81: Trayectoria prueba 2 pos.1 NGIMU .....	116
Figura 82: Trayectoria prueba 3 pos.1 NGIMU .....	116
Figura 83: Trayectoria prueba 1 pos.1 BNO080.....	117
Figura 84: Trayectoria prueba 2 pos.1 BNO080.....	117
Figura 85: Trayectoria prueba 3 pos.1 BNO080.....	117
Figura 86: Trayectoria prueba 1 pos.2 NGIMU .....	118
Figura 87: Trayectoria prueba 2 pos.2 NGIMU .....	118
Figura 88: Trayectoria prueba 3 pos.2 NGIMU .....	118
Figura 89: Trayectoria prueba 1 pos.2 BNO080.....	119
Figura 90: Trayectoria prueba 2 pos.2 BNO080.....	119
Figura 91: Trayectoria prueba 3 pos.2 BNO080.....	119
Figura 92: Trayectoria prueba 1 pos.3 NGIMU .....	120
Figura 93: Trayectoria prueba 2 pos.3 NGIMU .....	120
Figura 94: Trayectoria prueba 3 pos.3 NGIMU .....	120
Figura 95: Trayectoria prueba 1 pos.3 BNO080.....	121
Figura 96: Trayectoria prueba 2 pos. 3 BNO080 .....	121
Figura 97: Trayectoria prueba 3 pos.3 BNO080.....	121
Figura 98: Trayectorias estimadas utilizando la posición 1 .....	124
Figura 99: Trayectorias estimadas utilizando la posición 2 .....	125
Figura 100: Trayectorias estimadas utilizando la posición 3 .....	126
Figura 101: Esquema de conexiones entre Arduino Uno y BNO080 .....	151

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Datos técnicos de IMUs del primer bloque 1 .....	49
Tabla 2: Datos técnicos de IMUs del primer bloque 2 .....	50
Tabla 3: Datos técnicos de IMUs del segundo bloque 1 .....	52
Tabla 4: Datos técnicos de IMUs del segundo bloque 2 .....	53
Tabla 5: Datos técnicos de IMUs del tercer bloque 1 .....	55
Tabla 6: Datos técnicos de IMUs del tercer bloque 2 .....	56
Tabla 7: Selección de IMUs.....	64
Tabla 8: Resultados de las pruebas de evaluación de errores .....	100
Tabla 9: Resultados de la prueba comparativa 1 del BNO080.....	101
Tabla 10: Resultados de las pruebas de evaluación de errores .....	105
Tabla 11: Parámetros de entrada optimizados del algoritmo de posicionamiento.....	114
Tabla 12: Errores absolutos de las pruebas de verificación .....	122
Tabla 13: Errores relativos de las pruebas de verificación .....	122
Tabla 14: Errores medios de las pruebas de verificación de características .....	123
Tabla 15: Costes del material utilizado.....	140
Tabla 16: Costes directos del proyecto .....	141
Tabla 17: Costes indirectos del proyecto.....	141
Tabla 18: Coste del proyecto.....	142





## **III. - MEMORIA**

---

### **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

---



## 1.1 CONTEXTO DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

Hasta hace poco, el peso, el tamaño y el coste de los sistemas de medida inercial (IMU, Inertial Measurement Unit) limitó su uso, quedando prácticamente descartados en algunas áreas como la de la salud. El desarrollo de los sistemas microelectromecánicos (MEMS) ha permitido implementar los sensores inerciales en aplicaciones donde se requiere una alta estabilidad con reducido tamaño, así como un menor consumo de potencia. Actualmente el uso de los sensores inerciales está ampliamente extendido, y están presentes en la mayoría de los dispositivos electrónicos con los que se convive día a día. Como resultado, hoy en día existen distintos tipos de IMU que se clasifican en función de sus características, como puede ser tamaño, calidad y cantidad de sensores, datos de salida, aplicaciones, etc.

En el ámbito de la salud, el uso de técnicas donde se emplean los sistemas de medida inercial se ha extendido en los últimos años. Existe una amplia variedad de algoritmos que procesan los datos extraídos directamente de los sensores para obtener información útil acerca del sujeto donde está montado el dispositivo, como puede ser el número de pasos dados o la trayectoria realizada. Este conjunto de datos puede ser empleado para realizar una clasificación de la actividad física de una persona.

Sin embargo, a la hora de seleccionar una IMU es necesario analizar las prestaciones del dispositivo, ya que éstas se deben ajustar a los requerimientos de la aplicación. Las especificaciones de los sensores y las distintas fuentes de error afectan directamente a la información que se puede extraer de los dispositivos. La implementación de los distintos algoritmos propuestos no es directa, es necesario conocer detalladamente las limitaciones del dispositivo así como la definición de sus ejes de referencia o las características más significativas. En definitiva, es necesario llevar a cabo un estudio previo que requiere tener un conocimiento detallado de este tipo de dispositivos.

Este Trabajo de Fin de Grado se centrará en realizar un estudio detallado de todos los aspectos mencionados anteriormente, desde analizar la teoría básica en la que se basa una IMU, hasta conocer las prestaciones que una selección de IMUs ofrece a la hora de llevar a cabo un análisis de la actividad física de un individuo.

## 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

El principal objetivo de este TFG es realizar un análisis detallado de diferentes sistemas inerciales comerciales y definir las características mínimas necesarias para comparar sus prestaciones y potencial en el seguimiento y evaluación de la actividad física. Para cumplir con este objetivo será necesario alcanzar los siguientes objetivos parciales:

- Buscar y clasificar distintos dispositivos IMU comerciales disponibles en la actualidad en el mercado y realizar una comparativa detallada de sus prestaciones y parámetros más característicos.
- Analizar detalladamente el funcionamiento de una selección de dispositivos IMU disponibles en los laboratorios del departamento.
- Validar las características mínimas definidas previamente para la estimación de la actividad en personas, a través de datos que sirvan para cuantificar dicha actividad.

## 1.3 CAMPO DE APLICACIÓN

Las aplicaciones donde se utilizan sensores de medida inerciales son muy variadas, tal y como se ha explicado en la introducción. Este TFG está enfocado a la rama de la ingeniería aplicada a la salud de las personas, pero podrá servir como documento informativo para cualquier usuario que quiera disponer de información detallada acerca de las IMUs.

## 1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El proyecto se centrará en cumplir los objetivos antes expuestos. Para ello, la memoria del TFG se compondrá de seis capítulos principales que se han ido desarrollado secuencialmente. La figura 1 muestra un esquema básico de la secuencia temporal de las distintas fases del proyecto.

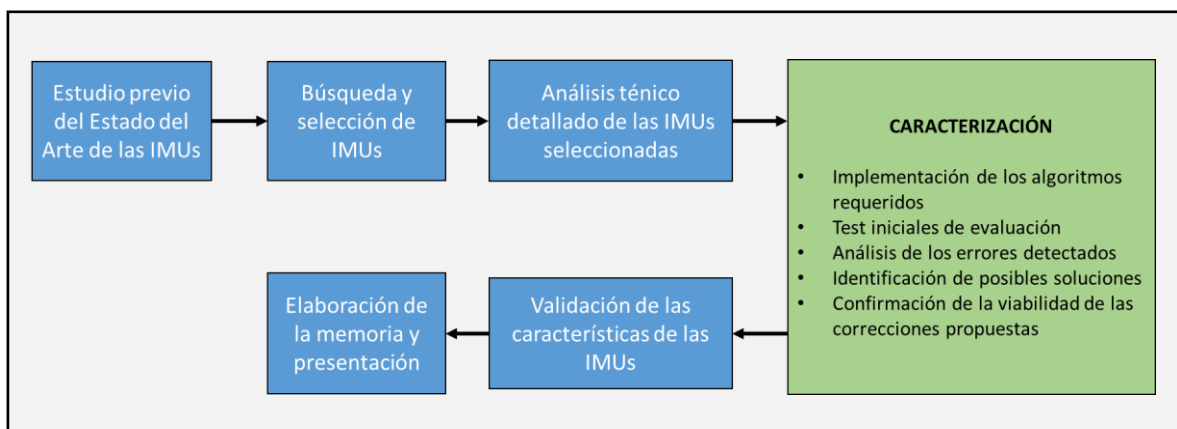


Figura 1: Diagrama secuencial de los bloques del TFG

**CAPÍTULO 1: Introducción**

El capítulo aquí presente, incluye una breve introducción del marco en el que esta englobado el TFG. Se exponen los objetivos propuestos y una breve descripción de cada uno de ellos. Explica de forma resumida el contenido de cada uno de los capítulos principales del proyecto.

**CAPÍTULO 2: Introducción teórica a los sistemas inerciales**

Este capítulo aborda la base teórica de los sistemas de medida inercial. Contiene la explicación de los principales aspectos teóricos que se requieren para el desarrollo del proyecto así como un análisis detallado de las distintas herramientas matemáticas que se han empleado.

**CAPÍTULO 3: Selección de sistemas inerciales**

Este capítulo contiene la selección de los sensores inerciales sometidos a evaluación tras una búsqueda bibliográfica de dispositivos IMU comerciales, y describe una comparativa detallada de sus parámetros característicos como pueden ser su tamaño, datos de salida, frecuencia de trabajo, rango de funcionamiento, batería, conectividad..., etc.

**CAPÍTULO 4: Caracterización de las IMUs**

Describe con detalle el análisis de las prestaciones, características mínimas y funcionamiento de un grupo selecto de IMUs. Contiene los resultados de pruebas que han permitido identificar posibles limitaciones y errores cuando se utilizan las IMUs en las aplicaciones del proyecto, y un conjunto de posibles soluciones para reducir o eliminar dichos errores.

**CAPÍTULO 5: Validación de las prestaciones de las IMUs**

Recopila y analiza los resultados obtenidos en distintas pruebas realizadas variando el posicionamiento de las IMUs en el cuerpo, y estudia las ventajas e inconvenientes que hay en cada una de las ubicaciones de los dispositivos.

**CAPÍTULO 6: Conclusiones y trabajos futuros**

Por último se muestran las conclusiones que se han extraído en el desarrollo del TFG, y se plantean posibles líneas de trabajo para estudios y proyectos futuros.



## CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN TEÓRICA A LOS SISTEMAS INERCIALES

---





Los sistemas de medida inercial se basan en sensores que miden aceleración lineal (acelerómetro) y velocidad angular (giróscopo) en los tres ejes de coordenadas del cuerpo u objeto donde está montado. Originalmente, la tecnología de medida inercial estaba limitada a aplicaciones de alta precisión como la industria aeroespacial debido a su alto coste [Ahmad 2013], pero su uso se ha extendido recientemente.

Con el desarrollo tecnológico se han podido realizar sistemas con una precisión aceptable a precios asequibles, y con un tamaño de los dispositivos más reducido, dando lugar a los sistemas microelectromecánicos (MEMS). Esto ha permitido desarrollar aplicaciones en áreas como fabricación, robótica y realidad virtual donde se emplean IMUs con prestaciones más limitadas. Por ello, las IMUs son un componente principal en sistemas de navegación inerciales los cuales son utilizados en aeronaves, sistemas no tripulados como misiles o satélites, o en proyectos en pleno desarrollo como son los coches autónomos. Actualmente las IMUs están incluidas en prácticamente todos los dispositivos como tablets, smartphones [Sensors 2015], e incluso gafas de realidad virtual, por lo que se puede afirmar que se trata de una tecnología con la que se convive día a día.

## 2.1 INTRODUCCIÓN A LAS IMUS

Una Unidad de Medida Inercial (IMU) se puede definir de forma general como un dispositivo electrónico que obtiene medidas de aceleración lineal y velocidad angular a través de sus sensores principales, un acelerómetro y un giróscopo, respectivamente. Mediante una combinación de los datos de los sensores, conocido como fusión sensorial, la IMU proporciona información acerca de la orientación y velocidad lineal del objeto o sujeto que porta el dispositivo [S. Pérez 2018]. A partir de la información que se extrae de las IMUs es posible implementar diversos algoritmos que proporcionan información más detallada según la aplicación. En el marco en el que está englobado este TFG, dichos algoritmos se centrarán en analizar la actividad física de una persona.

En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques de la estructura interna de una unidad de medida inercial basado en tres tipos de sensores diferentes. A partir de esta figura se irán definiendo los principales elementos que se incluyen en una IMU.

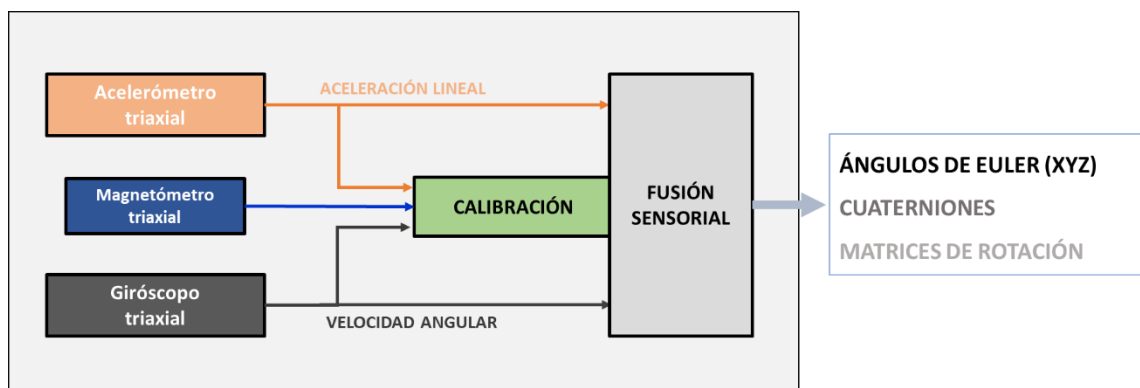


Figura 2: Esquema básico de una IMU de tres sensores

### 2.1.1 ACCELERÓMETROS

Los acelerómetros son sensores que miden aceleración y vibración [J. Woodman 2007]. Convierten la aceleración de la gravedad o de movimiento en una señal eléctrica analógica proporcional a la fuerza aplicada al sistema, o mecanismo sometido a vibración o aceleración. Dicha señal indica en tiempo real la aceleración instantánea del objeto sobre el cual el acelerómetro está montado. Los acelerómetros se encargan de medir la aceleración lineal que soporta una IMU. Proporcionan medidas triaxiales, es decir, son un conjunto de tres sensores que miden la aceleración en los tres ejes de coordenadas. Las unidades de medida son  $m/s^2$ , o bien fuerzas  $g$  ( $1g = 9.8 m/s^2$ ).

### 2.1.2 GIRÓSCOPOS

Son sensores inerciales que miden la velocidad angular del objeto donde está acoplado. El giróscopo mantiene su efectividad siendo capaz de medir el ratio de rotación en torno a un eje de coordenada particular [Goodrich 2018]. Al igual que ocurre con los acelerómetros, los giróscopos en formato MEM que incluyen las IMUs son triaxiales, es decir, miden la rotación de los tres ejes de coordenadas. Presentan dos propiedades fundamentales: la inercia giroscópica y la precesión, que es la inclinación del eje en ángulo recto ante cualquier fuerza que tienda a cambiar el plano de rotación. Proporcionan información para indicar la orientación. Las unidades de medida de estos sensores son  $rad/s$  ó  $^\circ/s$ .

### 2.1.3 MAGNETÓMETROS

Este sensor utiliza una tecnología basada en el efecto Hall que detecta el campo magnético terrestre a lo largo de los tres ejes de coordenadas, X, Y y Z. Un sensor de efecto Hall genera un voltaje proporcional a la fuerza y la polaridad del campo magnético presente en el entorno del sensor. Dicho voltaje se convierte a una señal digital que representa la intensidad del campo magnético. Existen otras tecnologías que se emplean para el magnetómetro como el uso de materiales magneto resistivos que cambian su resistencia a partir de cambios en el campo magnético.

Este tipo de sensor se emplea en el bloque de fusión sensorial, para el cálculo dinámico de la orientación donde se corrige o compensan errores de desviación. Sin embargo, el uso de los magnetómetros se ha descartado para aplicaciones donde se emplean las IMUs en interiores, donde abundan materiales ferromagnéticos y corrientes eléctricas. Esto puede provocar medidas erróneas debido a la perturbación del campo magnético [E. Muñoz 2016].

### 2.1.4 FUSIÓN SENSORIAL

Los tipos de dispositivos de medida inercial más frecuentes incorporan una serie de algoritmos que en su conjunto reciben el nombre de fusión sensorial. Dichos algoritmos procesan los datos procedentes de los acelerómetros, giróscopos, y magnetómetros para proporcionar información acerca de la orientación.

En este trabajo se tomará como medida de representación de la orientación referencia los ángulos de Euler, pero existen otros métodos de representación de la orientación en tres dimensiones [Representación3D]. Los más comunes son los siguientes:

- **Matrices básicas de rotación 3D:** giro en torno a un eje únicamente. La figura 3 muestra las tres matrices de rotación.

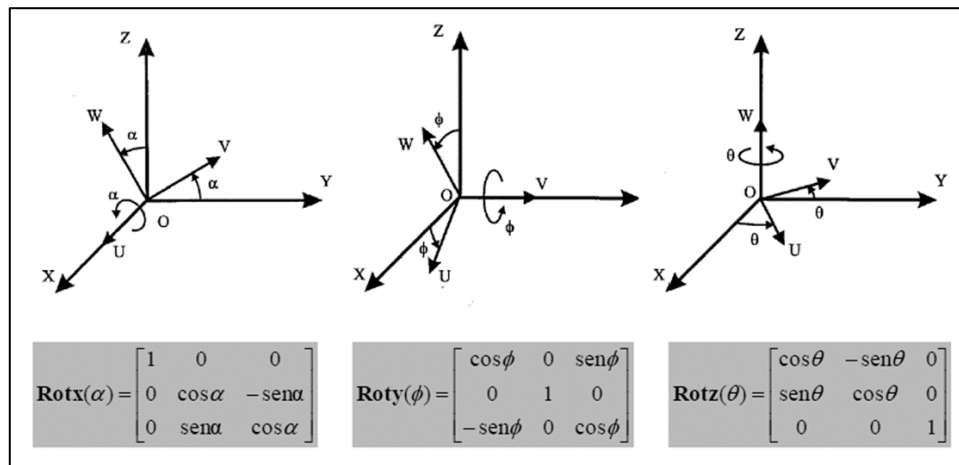


Figura 3: Matrices básicas de rotación en 3D con sistema de referencia XYZ y UVW

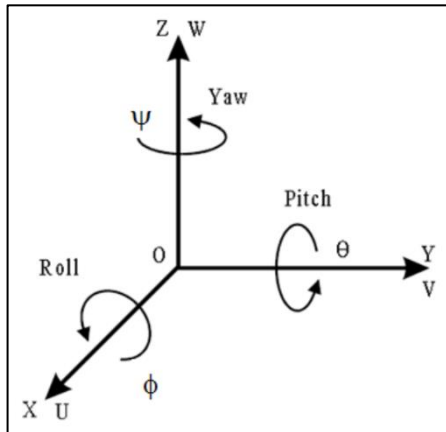
- **Cuaterniones:** proporcionan una expresión matemática para representar la orientación y la rotación de un objeto en tres dimensiones. Se trata de una de las representaciones de orientación más comunes en las IMUs, ya que son más eficientes que las matrices de rotación.

$$Q = [q_0, q_1, q_2, q_3] = [s, v] \tag{2.1}$$

$$Q = \left( \cos \frac{\theta}{2}, k \text{sen} \frac{\theta}{2} \right) \tag{2.2}$$

La ecuación (2.1) es la expresión matemática de un cuaternion, cuyo vector  $Q$  está formado por una parte vectorial  $[q_1, q_2, q_3]$ , que representa la dirección del eje de rotación, y por una parte escalar  $[q_0]$  que especifica la cantidad de rotación sobre el vector. La expresión (2.2) es otra manera de representación vectorial de un cuaternion, y representa un giro  $\theta$  en torno al eje  $k$ .

- **Ángulos de Euler XYZ:** es la representación de una rotación por la sucesión de tres giros en torno a los tres ejes de forma independiente. Es la más frecuente y la más intuitiva, y expresan la posición más general de un sistema de referencia con punto fijo mediante tres ángulos. Estos tres ángulos suelen recibir el nombre de Roll, Pitch y Yaw.



Roll: giro en torno al eje X

Pitch: giro en torno al eje Y

Yaw: giro en torno al eje Z

Figura 4: Representación de los ángulos de Euler XYZ o UVW

La figura 4 muestra una composición de tres rotaciones que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortonormales respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales.

La mayoría de las IMUs representan la orientación con los ángulos de Euler, pero es frecuente obtener la orientación a través de los cuaterniones. En este TFG se han utilizado métodos de conversión de cuaterniones a ángulos de Euler, que siguen las siguientes expresiones matemáticas:

$$\theta = 2 \cdot \operatorname{tg}^{-1}(2 \cdot q_2 \cdot q_0 - 2 \cdot q_2 \cdot q_3, 1 - 2 \cdot q_2^2 - 2 \cdot q_3^2) \quad (2.3)$$

$$\vartheta = \operatorname{sin}^{-1}(2 \cdot q_1 \cdot q_2 + 2 \cdot q_3 \cdot q_0) \quad (2.4)$$

$$\Psi = 2 \cdot \operatorname{tg}^{-1}(2 \cdot q_1 \cdot q_0 - 2 \cdot q_2 \cdot q_3, 1 - 2 \cdot q_1^2 - 2 \cdot q_3^2) \quad (2.5)$$

Siendo la ecuación (2.3) la expresión de conversión de un cuaternion al ángulo Roll, la ecuación (2.4) la del ángulo Pitch, y la ecuación (2.5) la del ángulo Yaw. Las variables  $q_0, q_1, q_2, q_3$  son los elementos de la expresión vectorial de la ecuación (2.1)

## 2.2 ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE ÁNGULOS DE EULER

Los ángulos de Euler que ofrecen las IMUs como datos de salida a veces no garantizan la precisión adecuada para determinadas aplicaciones. En el caso de este proyecto, para obtener los ángulos de Euler a partir de los datos del acelerómetro y giróscopo de las IMUs se hará uso de un algoritmo desarrollado por Estefanía Muñoz [E. Muñoz 2016].

El algoritmo empleado es una versión simplificada del desarrollado por Estefanía Muñoz en su tesis en 2016, donde el elemento clave es el uso de un filtro de Kalman extendido. Se trata de una técnica muy extendida en aplicaciones de determinación de posición y orientación de objetos móviles [M. Sabatini 2006].

### 2.2.1 FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO EKF

El filtro de Kalman extendido (EKF) resuelve el problema de la estimación del estado generado por un sistema no lineal, utilizando la expansión de la serie de Taylor que aproxima las ecuaciones no lineales de estado y de observación, sobre el valor actual estimado del estado [EKF 2013]. De forma resumida, es un conjunto de ecuaciones que permite estudiar el estado de un proceso a partir de un estado previo y una observación. Se emplea en sistemas dinámicos lineales donde el observable presenta un ruido gaussiano significativo. Explicado de forma simplificada, el filtro de Kalman, mediante un proceso iterativo matemático, permite mejorar la estimación de un sistema con ruido cuyas medidas presentan una incertidumbre [S. Pérez 2018].

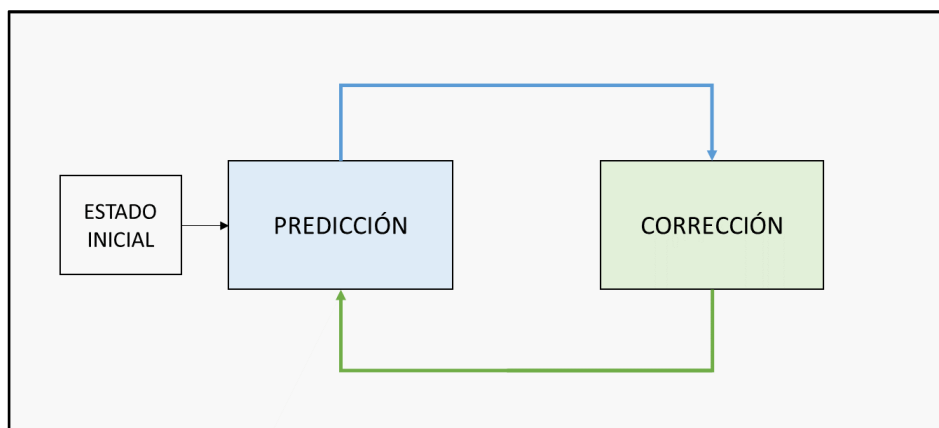


Figura 5: Diagrama básico del proceso de un filtro de Kalman

Las aplicaciones en las que se enfoca el proyecto trabajan con sistemas no lineales, por lo tanto es necesario emplear una versión ampliada de esta herramienta matemática, conocida como Filtro de Kalman Extendido (EKF).

El EKF tiene como objetivo mejorar la estimación de medida y disminuir errores. La principal diferencia es que el EKF emplea un elemento recursivo para que pueda ser utilizado en sistemas no lineales, a través de una linealización de Taylor. La aproximación de Taylor linealiza un sistema no lineal respecto a la estimación del instante actual, es decir, para cada estimación del estado actual en el tiempo se calcula una linealización del sistema [R. Cervigón 2017]. La predicción de la estimación del estado actual se realiza a partir determinadas ecuaciones dinámicas y del estado anterior, y la corrección o ajuste de la predicción se realiza mediante una observación del estado actual, y así de forma sucesiva. Estas ecuaciones suponen una variación entre la predicción y la observación pequeña, por lo tanto, para un sistema donde los cambios de estados sean grandes, el EKF está limitado y no funcionará correctamente. Una vez realizada la breve introducción al EKF, es necesario explicar las ecuaciones de las que hace uso.

Tal y como se ha mencionado antes, el sistema con el que se trabajará en el desarrollo del proyecto es no lineal. Un sistema no lineal puede representarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k \quad (2.6)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2.7)$$

En la ecuación (2.6),  $\mathbf{x}_k$  es el vector de estados,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}_{k-1})$  representa la relación entre el estado actual y el anterior, y  $\mathbf{w}_k$ , el ruido del proceso.

En la ecuación (2.7),  $\mathbf{z}_k$  es el vector de observación,  $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$  representa la relación entre el vector de estados y las mediciones, y  $\mathbf{v}_k$ , el ruido de medida.

- ETAPA DE PREDICCIÓN DEL EKF

Se encarga de calcular la estimación del estado y la matriz de covarianza del error a priori.

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{P}_{k-1} \cdot \mathbf{A}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (2.9)$$

$$\mathbf{A}_k = \frac{d\hat{\mathbf{x}}_k^-}{d\mathbf{x}_k} \quad (2.10)$$

En la ecuación (2.8),  $\hat{\mathbf{x}}_k^-$  es la estimación del vector de estados a priori, función del estado anterior.

En la ecuación (2.9),  $\mathbf{P}_k^-$  es la matriz de covarianza del error a priori, que depende de su estado anterior y de la matriz  $\mathbf{A}_k$ , que se trata del jacobiano de la ecuación de transición del sistema, y es la encargada de linealizar el sistema.

- ETAPA DE CORRECCIÓN DEL EKF

Tiene como objetivo realizar la corrección de la estimación calculada en la etapa anterior mediante la observación del estado actual.

Las ecuaciones que se incluyen en esta etapa son las siguientes:

$$\mathbf{S} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_k^- \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_k^- \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{z}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (2.13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K} \cdot \mathbf{V} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{K}^T \quad (2.15)$$

$$\mathbf{H} = \frac{d\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k^-)}{d\mathbf{x}_k^-} \quad (2.16)$$

En la ecuación (2.11),  $\mathbf{S}$  es la matriz intermedia y depende de  $\mathbf{H}$ , jacobiano de la ecuación de observación (2.16), de  $\mathbf{P}_k^-$ , y de la matriz de covarianza del ruido de medida  $\mathbf{R}$ .

En la ecuación (2.12),  $\mathbf{K}$  se define como la ganancia de Kalman, dependiente de  $\mathbf{P}_k^-$ ,  $\mathbf{H}$ , y  $\mathbf{S}$ .

En la ecuación (2.13),  $\mathbf{V}$  es el vector diferencia entre el vector de observación y el de estimación.

En la ecuación (2.14),  $\hat{\mathbf{x}}_k$  es la estimación del estado a posteriori, dependiente del estado a priori y de la ganancia  $\mathbf{K}$  y el vector  $\mathbf{V}$ .

En la ecuación (2.15),  $\mathbf{P}_k$  es la matriz de covarianza del error a posteriori, y depende de la del error a priori  $\mathbf{P}_k^-$ , de  $\mathbf{S}$ , y de  $\mathbf{K}$ .

El proceso iterativo se inicia una vez que termina la etapa de corrección, donde se retorna la estimación del estado a posteriori  $\hat{\mathbf{x}}_k$  y la matriz de covarianza del error  $\mathbf{P}_k$  a la etapa de predicción, y así de forma sucesiva.

La figura 6 muestra el funcionamiento básico del EKF con las ecuaciones que tienen lugar en cada etapa:

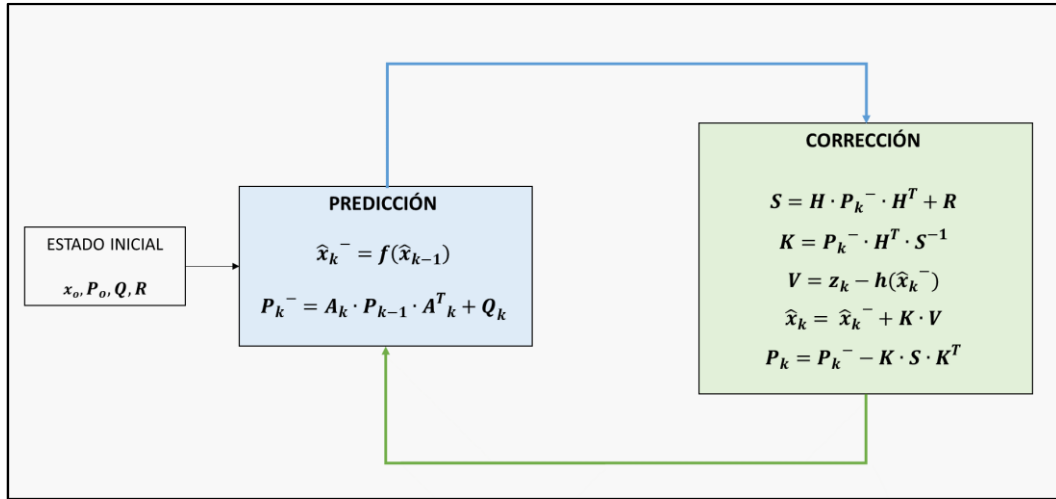


Figura 6: Diagrama del proceso iterativo del EKF

### 2.2.2 CONFIGURACIÓN DE EJE DE COORDENADAS ENU

El EKF está desarrollado para que el objeto móvil al que se le aplique tenga una posición/orientación específica, es decir, el sistema de coordenadas fijo con el que trabaja el algoritmo es específico y salvo que se realice un ajuste de ejes previo, cualquier otro sistema de coordenadas distinto mostraría resultados erróneos. El sistema de coordenadas fijado para este algoritmo es el ENU (East, North, Up), y se muestra en la figura 7.

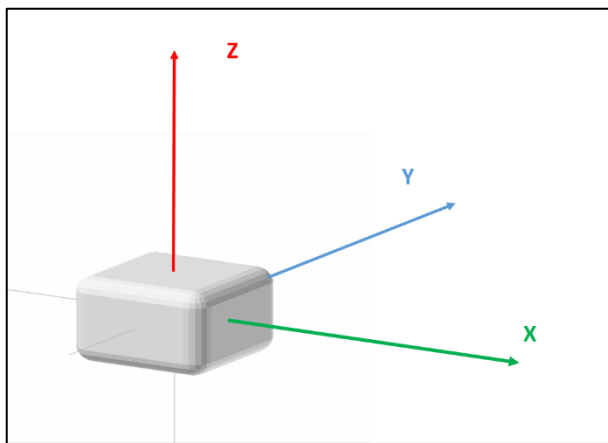


Figura 7: Sistema de coordenadas ENU

Esta limitación está presente tanto en este algoritmo como en las IMUs en general, pero se abordará con más detalle en el capítulo 4.

Los acelerómetros, giróscopos y magnetómetros de las IMUs, en cambio, se basan en un mismo sistema de referencia que se mueve simultáneamente con el dispositivo. Un error muy común es suponer que ese sistema de coordenadas es el que sigue la definición de los ángulos de Euler que proporcionan los dispositivos de forma directa, pero esto lleva a interpretaciones de los resultados erróneas.



### 2.2.3 PARTICULARIZACIÓN DEL EKF PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE EULER

Tal y como se ha mencionado al comienzo de esta sección, se ha recurrido al Filtro de Kalman Extendido para realizar la estimación de los ángulos de Euler. A partir de los datos proporcionados por los acelerómetros y los giróscopos de las IMUs, el EKF obtiene los tres ángulos de Euler (Roll  $\Phi$ , Pitch  $\theta$  y Yaw  $\Psi$ ) que definen la orientación del dispositivo. La figura 8 muestra un diagrama de bloques de la particularización del EKF para la estimación de los ángulos de Euler de una IMU.

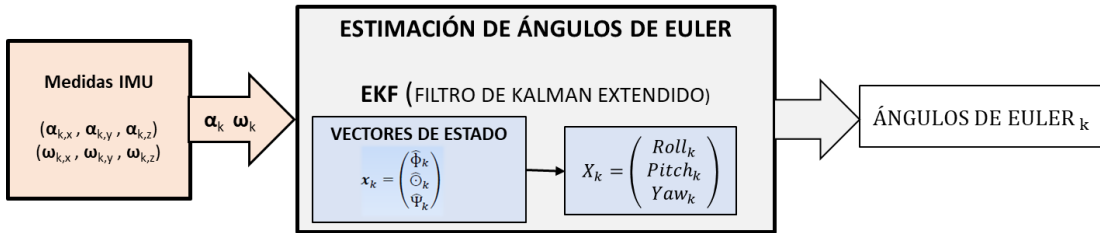


Figura 8: Diagrama básico de la estimación de ángulos de Euler con EKF

Siendo  $k$  el número de iteración del ciclo y  $x$  el vector de estados del que se extraen los tres ángulos de Euler. Las variables  $\alpha_k$  y  $\omega_k$  son los valores del acelerómetro y giróscopo en cada iteración, respectivamente.

Al estimar el cálculo de ángulos de Euler mediante un método probabilístico, son necesarias unas condiciones iniciales previas al proceso iterativo. Esto significa que en el primer ciclo iterativo el valor de los tres ángulos de Euler se obtiene con las expresiones siguientes:

$$\hat{\Phi}_0 = \tan\left(\frac{\alpha_{0,y}}{\alpha_{0,z}}\right)^{-1} \quad (2.17)$$

$$\hat{\theta}_0 = \tan\left(\frac{-\alpha_{0,x}}{\sqrt{\alpha_{0,y}^2 + \alpha_{0,z}^2}}\right)^{-1} \quad (2.18)$$

$$\hat{\Psi}_0 = 0 \quad (2.19)$$

La etapa de corrección del EKF se realiza a partir de la estimación anterior y de la información procedente del giróscopo. Para ello se realiza una integración en el tiempo de los valores del giróscopo:

$$\hat{x}_k^- = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \omega_k dt \quad (2.20)$$

La ecuación (2.20) calcula la posición estimada a partir de los datos procedentes del giróscopo realizando una integración en el tiempo transcurrido entre muestras.

La etapa de corrección se lleva a cabo si en la iteración correspondiente la norma de la aceleración obtiene un valor de 9.8 m/s<sup>2</sup> o de 1g, es decir, si el dispositivo permanece en reposo:

$$|\alpha_k| = \sqrt{\alpha_{k,x}^2 + \alpha_{k,y}^2 + \alpha_{k,z}^2} \quad (2.21)$$

En ese caso se corrige el estado de los elementos del vector de estado correspondientes al Roll  $\Theta$  y el Pitch  $\Phi$ . La estimación del Yaw  $\Psi$  no se corrige, ya que solo es necesario observar su variación para el algoritmo de posicionamiento. Esto implica que su valor acumule una cierta deriva, como se explicará más adelante.

Las ecuaciones de la etapa de corrección adaptadas al algoritmo de [E. Muñoz 2016] son las que se muestran a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\omega^2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_\Phi^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Theta^2 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

La matriz (2.23) representa el valor de la varianza del ruido del proceso, y  $\sigma_\omega$  es la desviación estándar de las medidas del giróscopo. Este valor es difícil de determinar ya que define la precisión del sistema. La matriz (2.25) representa el valor del ruido de medida, y  $\sigma_\Phi$  y  $\sigma_\Theta$  son la desviación estándar de la estimación del Roll y Pitch, respectivamente, cuyo valor pueden obtenerse de forma experimental.

La figura 9 muestra el flujograma del funcionamiento del algoritmo de estimación de ángulos de Euler utilizado en este proyecto.

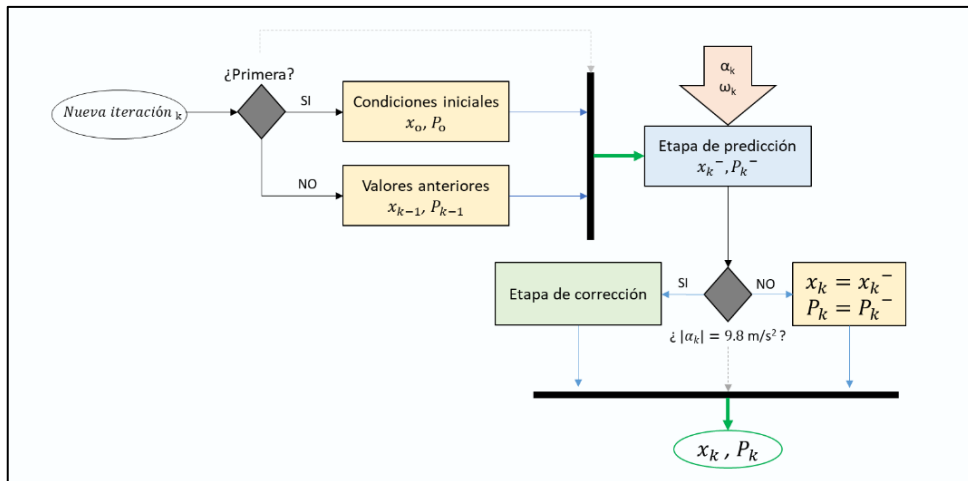


Figura 9: Flujograma del algoritmo de estimación de ángulos de Euler [R. Cervigón 2017]

## 2.3 ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO

El análisis detallado al que se van a someter las IMUs en este proyecto tiene como objetivo estudiar las características y las prestaciones que cada una de ellas ofrece para la obtención de información relativa a la actividad física cuando son portadas por una persona. Para el desarrollo del proyecto, la información relevante que se extrae de las IMUs con respecto a la actividad física de una persona es el número de pasos, la distancia recorrida y la trayectoria estimada, tal y como se representa en la figura 10.

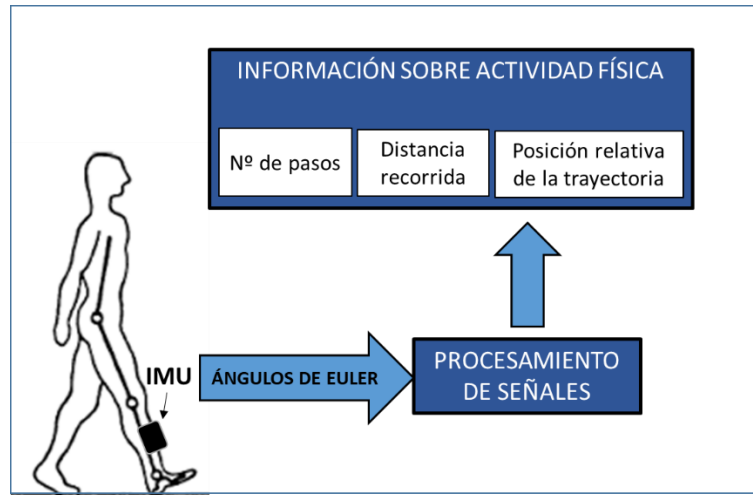


Figura 10: Diagrama de aplicación de las IMUs

El procesamiento de señales que se debe realizar una vez obtenidos o procesados los ángulos de Euler, es el conjunto de algoritmos que proporcionan la información antes mencionada. Para ello se ha utilizado un algoritmo desarrollado por el grupo de investigación GEINTRA US&RF [R. Cervigón 2017], que proporciona los datos sobre la actividad física que muestra la figura 10, teniendo como entradas los ángulos de Euler.

Antes de comenzar a explicar en detalle este algoritmo, es necesario mencionar que la terminología empleada para los ángulos de Euler a menudo lleva a confusiones ya que en muchas ocasiones los términos Roll, Pitch y Yaw se identifican con la terminología empleada en aplicaciones de navegación, es decir, Roll para el alabeo, Pitch para el cabeceo, y Yaw para la orientación [J.L. Ackerman 2007]. Sin embargo, en las aplicaciones donde la IMU es portada por una persona, la terminología de los ángulos Roll, Pitch y Yaw depende de la posición/orientación del dispositivo, por lo que es aconsejable definir las señales de distinta forma.

Para evitar confusiones en este aspecto, en este proyecto las señales de entrada que va a recibir el algoritmo de posicionamiento tendrán un nombre genérico: señal de orientación, señal de detección de pasos y señal de balanceo, tal y como indica la figura 11.

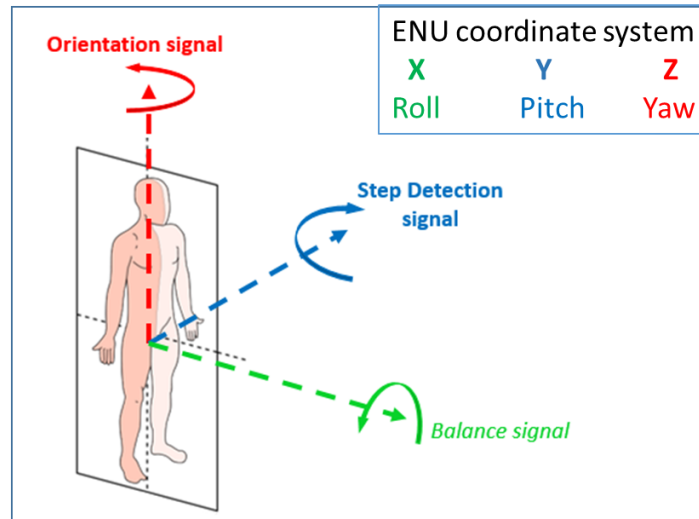


Figura 11: Asignación de señales

De esta forma, las señales de entrada con las que trabaja el algoritmo de posicionamiento son las que se indican en la figura 12, que muestra un diagrama de bloques simplificado de la estructura del algoritmo de posicionamiento empleado, que se utilizará como referencia para explicar con detalle cada uno de los bloques de los que se compone el algoritmo.

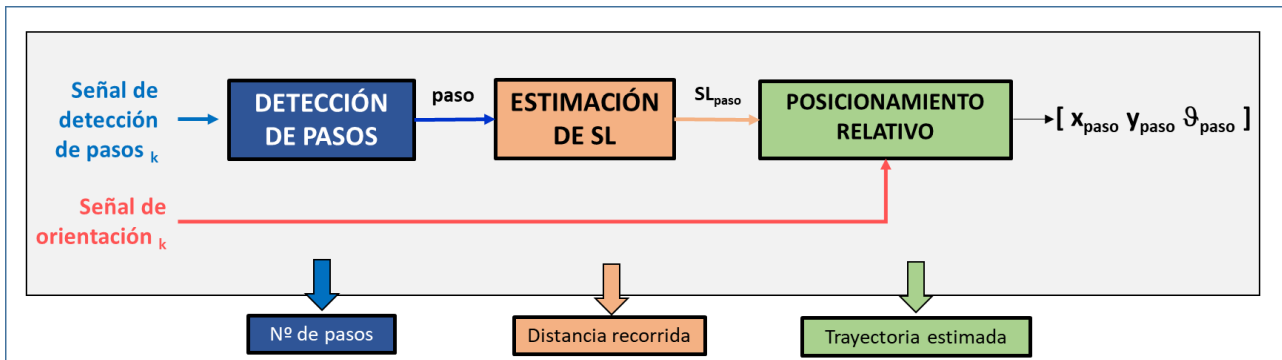


Figura 12: Diagrama básico del algoritmo de posicionamiento

### 2.3.1 DETECCIÓN DE PASOS

Este bloque se encarga de estimar la detección de un paso analizando la *señal de detección de pasos* generada por la IMU o estimada cuando ésta es portada por una persona en la pierna. Se basa en la detección de máximos y mínimos absolutos de una señal. La figura 13 muestra un flujograma del proceso de detección de pasos del algoritmo.

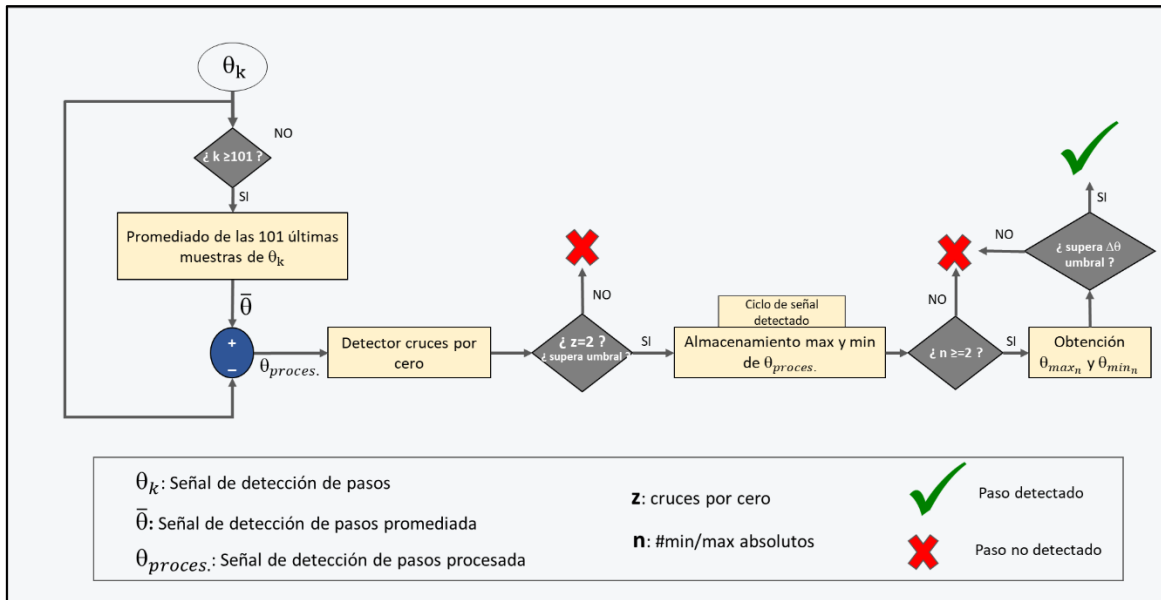


Figura 13: Flujograma del algoritmo de posicionamiento [R. Cervigón 2017]

Se realiza un promediado de la señal para eliminar el offset que pueda presentar, y se analizan los cruces por cero que la señal realiza bajo un umbral de margen para evitar falsos cruces por cero que puede presentar una señal ruidosa. Una vez detectados los cruces por cero, se realiza un proceso de detección de los máximos y mínimos absolutos de la señal, definiendo el tramo donde se ha tenido lugar el paso. Por último se analiza la amplitud de la señal en ese tramo.

Si la amplitud supera un umbral definido por el usuario en función del individuo que porta la IMU, el algoritmo detecta que ha realizado un paso y se suma en una unidad el valor de una variable que contabiliza los pasos. La siguiente figura muestra un ejemplo del proceso de detección de pasos.

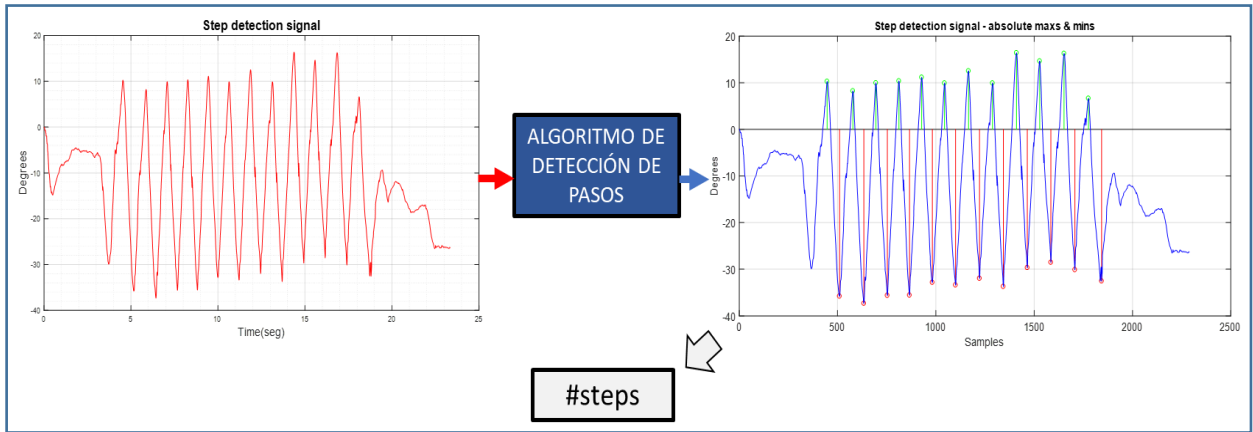


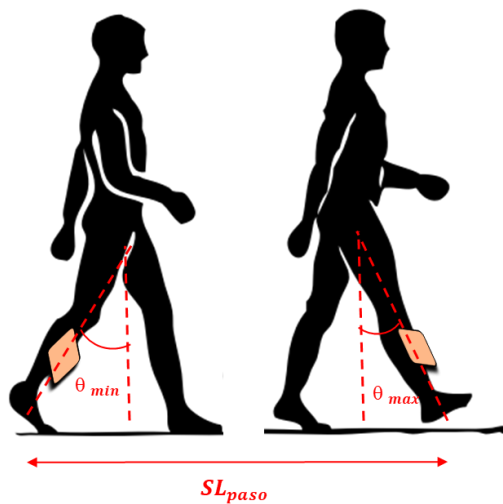
Figura 14: Diagrama básico del proceso de detección de pasos

Es importante resaltar que el número de pasos que detecta este algoritmo es el realizado por una pierna, por lo tanto el número de pasos que proporciona el algoritmo de posicionamiento en realidad es el número de ciclos de marcha. La relación entre ambas magnitudes sigue la ecuación (2.26):

$$n^{\circ} \text{ de pasos} \cong 2 \cdot \text{ciclos de marcha} \tag{2.26}$$

### 2.3.2 ESTIMACIÓN DE ANCHURA DE PASO

El siguiente bloque del algoritmo es la estimación de la anchura de paso, que será el encargado de proporcionar la distancia recorrida en una prueba. Una vez que se ha detectado un paso y conociendo la amplitud en grados de la señal asociada al mismo (2.27), se procede a calcular la anchura de paso  $SL_{paso}$  en metros, para lo cual se ha recurrido a la ecuación (2.28) [E Muñoz 2016].



$$\Delta\theta_{step} = \theta_{max} - \theta_{min} \tag{2.27}$$

$$SL_{step} = a_H \cdot \Delta\theta_{step} \cdot b_H \tag{2.28}$$

\*NOTA: Para abreviar la terminología utilizada:

$$\text{señal de detección de pasos}_k = \theta_k$$

Figura 15: Definición de SL (anchura de paso)

La ecuación (2.25) representa una recta de regresión lineal universal desarrollada a partir de un estudio basado en el análisis de pruebas realizadas a varias personas andando a distintas velocidades, y observando los resultados de la amplitud de los pasos, en grados. Este estudio ha permitido definir los parámetros  $a$  y  $b$  de la ecuación [E. Muñoz 2016]. En la figura 16 se muestran los resultados de algunas de las pruebas realizadas que dieron como resultado unos valores para  $a_H$  y  $b_H$  de 0.0294 y de 0.232, respectivamente.

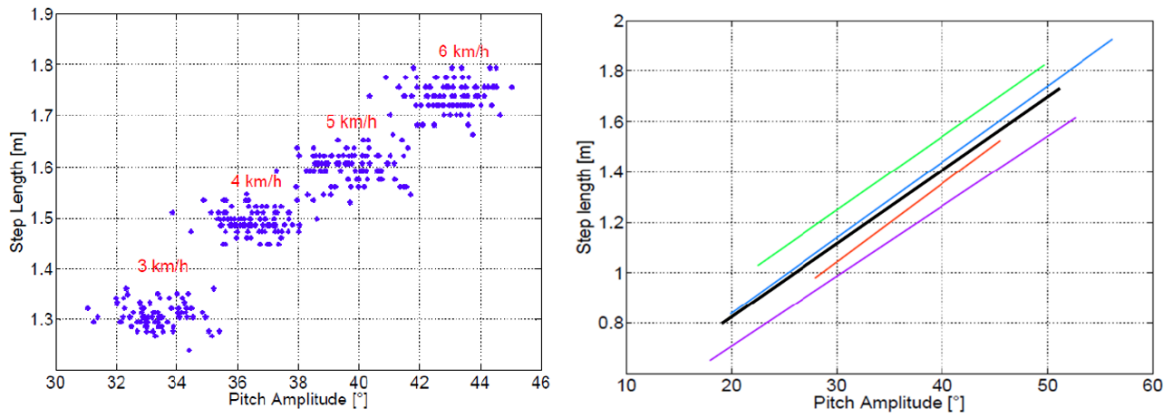


Figura 16:(izquierda) Relación entre SL y  $\Delta\theta$  para distintas velocidades, (derecha) Regresión lineal universal (negra) de la relación entre SL y  $\Delta\theta$  para diferentes voluntarios (verde, azul, roja y morada) [E Muñoz 2016]

### 2.3.3 ALGORITMO DE POSICIÓN RELATIVA

El último bloque del algoritmo utilizado estima la posición relativa sobre el plano de la persona que porta la IMU. El algoritmo parte de una posición en plano  $x$  e  $y$  inicial, y de una orientación  $\vartheta$  inicial, siguiendo como sistema de referencia el que muestra la figura 17.

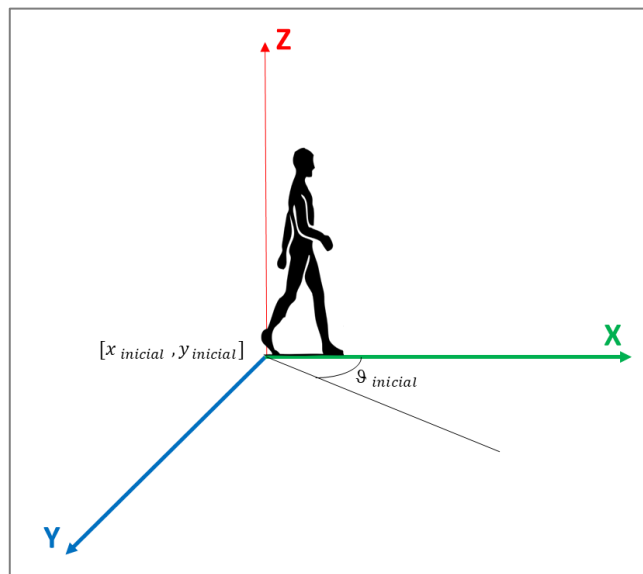


Figura 17: Sistema de referencia del algoritmo de posición relativa

Cuando se produce una detección de un paso, la información de la posición relativa se actualiza según la ecuación (2.29), que proporciona la información necesaria para estimar la trayectoria que realiza la persona que porta la IMU [R. Cervigón 2017].

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_{paso} \\ \hat{Y}_{paso} \\ \hat{\vartheta}_{paso} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{paso-1} + SL_{paso} \cdot \cos(\hat{\vartheta}_{step-1} + \Delta\Psi) \\ \hat{Y}_{paso-1} + SL_{paso} \cdot \sin(\hat{\vartheta}_{step-1} + \Delta\Psi) \\ \hat{\vartheta}_{paso-1} + \Delta\Psi \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

En la expresión (2.29)  $\Delta\Psi$  es la diferencia entre el valor de la señal de orientación en el máximo absoluto del paso actual y del paso anterior. El subíndice *paso* indica el número de pasos.



## CAPÍTULO 3: SELECCIÓN DE SISTEMAS INERCIALES

---



En este capítulo se muestran los resultados de una amplia búsqueda bibliográfica de los dispositivos comerciales que contienen sensores inerciales que más se ajustan a las necesidades del proyecto. El objetivo de dicha búsqueda es llevar a cabo una selección de los dispositivos que se someterán a evaluación en los capítulos siguientes. Para ello el capítulo se ha dividido en cuatro secciones: la primera define los parámetros más característicos de las IMUs, y comenta las especificaciones técnicas que se pueden encontrar en las hojas de características de los dispositivos. La segunda sección se basa en la clasificación en bloques de los dispositivos IMU que están actualmente disponibles en el mercado según su tipo, sirviéndose de tablas que recogen sus especificaciones más características. La tercera sección realiza una comparativa de los datos técnicos que presentan las IMUs analizadas. Por último, se muestra la selección de un grupo reducido de IMUs para llevar a cabo las siguientes fases del proyecto según un criterio específico.

## 3.1 PARÁMETROS CARACTERÍSTICAS DE LAS IMUS

A la hora de seleccionar la IMU que se va a utilizar en una aplicación determinada, es necesario comprender las prestaciones que éstas ofrecen y definir los parámetros más característicos que se muestran en las hojas de datos del fabricante. Este debe ser el paso previo para realizar la clasificación de las IMUs analizadas en la búsqueda bibliográfica.

### 3.1.1 NIVEL DE PRESTACIONES

Antes de realizar la clasificación de las IMUs analizadas en distintos bloques, es necesario comprender los distintos niveles de prestaciones que ofrecen. Los sensores inerciales con un nivel de prestaciones bajo son aquellas de bajo coste que están en formato MEM y que solo proporcionan datos de los acelerómetros y giróscopos.

El siguiente nivel en cuanto a prestaciones es el que presentan las IMUs con fusión sensorial. Son MEMs que incorporan magnetómetros y un microcontrolador que permite realizar la fusión de datos, y que por lo tanto, proporcionan más datos además de aceleración y velocidad angular, como los ángulos de Euler, u otros métodos de representación de la orientación como cuaterniones o matrices de rotación, y otros datos de más alto nivel.

Un nivel alto de prestaciones es el que ofrecen las IMUs cuyos fabricantes han diseñado en formato compacto y encapsulado. Son IMUs de alto coste que además de proporcionar los datos de salida de las IMUs de menores prestaciones, incluyen sensores adicionales como sensores de presión, temperatura o de humedad, que añaden una capa de alto nivel y proporcionan datos más cognitivos para analizar, por ejemplo, la actividad física. La mayoría incluyen baterías recargables que hacen que se puedan emplear de forma autónoma, y ofrecen software diseñados por el fabricante para que la obtención de datos sea más fácil y dinámica.

### 3.1.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las dimensiones, el formato de diseño de la IMU y el precio son los aspectos más críticos a la hora de hacer la elección para determinadas aplicaciones. El desarrollo tecnológico ha permitido que las IMUs estén diseñadas en formato MEM, por lo que el tamaño de este tipo de sensores es reducido. Algunos fabricantes diseñan dispositivos que integran los sensores en formato MEM con baterías recargables junto con una carcasa, para dar lugar a IMUs en formato encapsulado donde el tamaño puede ser una limitación. Este tipo de IMUs, evidentemente tienen un precio mayor que las que tienen formato MEM.

### 3.1.3 PARÁMETROS DE LOS SENSORES

Los sensores incluidos en todos los sistemas de medida inercial son los acelerómetros y giróscopos. El rango de medida y la resolución son las principales características de ambos sensores. En las hojas de datos, además, se muestran otros parámetros característicos, de los cuales los más destacables son:

- Sensibilidad: indica cuánto cambia la salida del sistema por unidad de cambio de la magnitud de entrada.
- Error de offset: valor de la variable de salida cuando la entrada es nula.
- Error de ganancia: diferencia entre el valor de la ganancia nominal y la real.
- Densidad de ruido: define la potencia de la señal de ruido por unidad de banda de frecuencia.
- Coefficientes de temperatura del offset y de ganancia: parámetros en régimen estático que cuantifican la variación del error de offset y de ganancia, respectivamente, por unidad de cambio en la temperatura.
- Ancho de banda (BW): rango de frecuencias que pueden transitar por el sistema, con una atenuación y/o distorsión inferior a un valor determinado.
- Output Data Rate (ODR): define el ratio de valores de frecuencia a los que se muestrean los datos.

Una gran parte de las IMUs incorporan magnetómetros, cuyos parámetros principales para este TFG serán su resolución y rango de medida, al no analizarse con detalle el funcionamiento de estos sensores.

### 3.1.4 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En las IMUs tipo MEM, las especificaciones técnicas que se han analizado han sido el número de pines, la temperatura de funcionamiento, el consumo eléctrico y las interfaces de comunicación. Para las IMUs de este tipo que además incorporan un microprocesador y realizan la fusión de datos, se ha analizado el tipo de microprocesador, los datos de salida que se obtienen con la fusión de datos (cuaterniones, ángulos de Euler, matrices de rotación...). En las IMUs diseñadas como sistema cerrado, en formato encapsulado, las especificaciones técnicas que se ha analizado han sido la autonomía de las baterías recargables y los sensores adicionales, además de las características que tienen en común con las tipo MEM.

## 3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS IMUS

La búsqueda bibliográfica de las IMUs disponibles en el mercado demuestra que existe una amplia variedad de dispositivos de medida inercial en cuanto a sus características mecánicas, eléctricas, o físicas se refiere, lo cual afecta directamente al coste de éstos. En esta sección se ha realizado una clasificación de los tipos de IMUs, para lo cual se han dividido en tres bloques, en orden ascendente, en función del tipo de formato en las que están diseñadas, del número de integrados, y del nivel de sus prestaciones.

### 3.2.1 IMUS DE MENORES PRESTACIONES

Las IMUs de menores prestaciones son sistemas microelectromecánicos que proporcionan datos correspondientes al acelerómetro y giróscopo, como [BMI260]. Éstas IMUs requieren de un procesamiento posterior para proporcionar información acerca de la orientación, velocidad y pose del cuerpo donde está adherido el dispositivo. Este procesamiento generalmente suele ser un diseño electrónico con un microprocesador, que requiere de un desarrollo de algoritmos que fusionen los datos de los sensores. A menudo, estos dispositivos incluyen un sensor adicional para medir el campo magnético (magnetómetro). Un gran número de IMUs de este tipo están diseñadas para trabajar directamente en proyectos con Arduino, como es el caso de [LSM9DS0]. En estos MEMs, la fusión de los datos procedentes de los sensores se llevaría a cabo desarrollando código en el entorno de programación de Arduino. La ventaja de utilizar este tipo de IMUs es que existen librerías de funciones en la web que realizan la fusión de datos, lo cual simplifica el trabajo.

A continuación se muestran dos tablas con información técnica de IMUs que siguen el criterio especificado para el bloque de IMUs de menores prestaciones. La tabla completa de los datos técnicos de diez IMUs analizadas, clasificadas en este bloque, se muestra en el Anexo I.

		FABRICANTE	BOSCH	
		MODELO	BMI260	BMI088
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	MEM	MEM
		Tamaño (L x W x H)	2.5 x 3.0 x 0.8 mm	3 x 4.5 x 0.95 mm
		Precio	-	5.97 €
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	16 bit; 0.06 mg/LSB	16 bit; 0.09 mg/LSB
		Rango de medida	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±3g; ±6g; ±12g; ±24 g
		Sensibilidad	16384... 2048 LSB/g	10920... 1365 LSB/g
		Error offset	±20 mg	±20 mg
		Error ganancia	±0.4 %	-
		Densidad ruido	160 ug/VHz	190 mg/VHz
		CT offset	±0.25 mg/K	±0.2 mg/K
		CT sensibilidad	±0.004 %/K	±0.002 %/K
		BW (progr.)	5... 684 Hz	5... 280 Hz
		ODR	12.5 Hz... 1.6 kHz	12.5 Hz... 1.6 kHz
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	16 bits; 0.004 dps/LSB	16 bits; 0.004 dps
		Rango	±125... ±2000 dps	±125... ±2000 dps
		Sensibilidad	262.1... 16.4 LSB/dps	262.1... 16.4 LSB/dps
		Error offset	±0.5 dps	±1 dps
		Error ganancia	±0.4 %	-
		Densidad ruido	0.008 dps/VHz	0.014 dps/VHz
		CT offset	±0.02 dps/K	±0.015 dps/K
		CT sensibilidad	±0.02 %/K	-
		BW	11... 751 Hz	12... 523 Hz
ODR	25 Hz... 6.4 kHz	100 Hz... 2 kHz		
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	Nº PINES	14	16	
	TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-45°C...+85°C	-45°C...+85°C	
	ALIMENTACIÓN	1.7... 3.6 VDD 1.2...3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD 1.2...3.6 VDDIO	
	CONSUMOS	685 uA (full op-)	5.15 mA (full op.)	
	INTERFACES DE COMUNICACIÓN	2xSPI; 2xI2C; AUX I/F; OIS I/F; 2xinterrupciones	SPI; I2C; 4xinterrupciones	
<b>APLICACIONES</b>		Reconocimiento de actividad; OIS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores; Drones Robots industriales; Usos Domésticos (robots limpiadores)		

Tabla 1: Datos técnicos de IMUs del primer bloque 1

NOTA: el signo ‘-’ significa que el dato no aparece en las hojas de características.

		FABRICANTE	STMicroelectronics	
		MODELO	LSM6DS3	LSM9DS0
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	MEM	SiP para Arduino
		Tamaño (L x W x H)	2.5 x 3 x 0.83 mm	33 x 20 x 2 mm
		Precio	19.95 \$	24.95 \$
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	16 bit	16 bit
		Rango de medida	±2 g; ±4g; ±8g; ±16 g	±2 g; ±4g; ±6g; ±8g; ±16 g
		Sensibilidad	0.06... 0.488 mg/LSB	0.061... 0.732 mg/LSB
		Error offset	±40 mg	±60 mg
		Error ganancia	-	-
		Densidad ruido	90 mg/VHz	-
		CT offset	±0.5 mg/°C	±0.5 mg/°C
		CT sensibilidad	-	±1.5 %/°C
		BW	-	-
	ODR	12.5 Hz... 1.6 kHz	3.125 Hz... 1.6 kHz	
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	16 bits	16 bit
		Rango de medida	±125... 2000 dps	±245... ±2000 dps
		Sensibilidad	4.375... 70 mdps/LSB	8.75... 70 mdps/digit
		Error offset	±10 dps	±10... ±25 dps
		Error ganancia	-	-
		Densidad ruido	0.007 dps/VHz	-
		CT offset	±0.05dps/°C	±0.05 dps/°C
		CT sensibilidad	-	-
		BW	-	-
ODR	12.5 Hz... 1.6 kHz	-		
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>		Nº PINES	14	14
		TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-45°C...+85°C	-40°C...+85°C
		ALIMENTACIÓN	1.71... 3.6 V	3.3... 5 VIN
		CONSUMOS	1.25 mA (full op.) <0.5 mA (low pow.)	6.45 mA (full op.) <10 uA (low pow.)
		INTERFACES DE COMUNICACIÓN	SPI; I2C	6xSPI; 2xI2C; 4xInterrupciones
		SENSORES ADICIONALES	-	Sensor de temperatura Magnetómetro
<b>APLICACIONES</b>		Detección movimiento; smartphones; tablets; Drones; robots; dead reckoning; OIS; AR/VR; Navegación; Proyectos con Arduino para aplicaciones de orientación; LSM9DS0 Disponible en versión Flora.		

Tabla 2: Datos técnicos de IMUs del primer bloque 2

### 3.2.2 IMUs CON FUSIÓN SENSORIAL

El mercado de IMUs también ofrece sistemas en los que ya incluyen su propia fusión de datos para proporcionar información directa acerca de la orientación y dirección del cuerpo donde esté montado el dispositivo. Son componentes electrónicos que llevan integrados los sensores correspondientes al acelerómetro, giróscopo, y a menudo un magnetómetro, junto con un microprocesador que lleva a cabo la fusión de datos. Estos componentes pueden estar diseñados para poder ser utilizados directamente en proyectos con Arduino, como el [BNO055], o requerir de un software propietario que permite la comunicación entre el dispositivo y la plataforma donde esté instalado el software (ordenador, tablet, smartphone..., etc.), como en su variante, el [BNO055 USB Stick]. Algunas de estas IMUs tienen la posibilidad de mostrar los datos que proporcionan en tiempo real y de configurar sus parámetros de funcionamiento a través del software del fabricante. La fusión sensorial que se lleva a cabo en este tipo de IMUs puede proporcionar datos como los ángulos de Euler, cuaterniones, o información de más alto nivel como detección de pasos y clasificación de actividad, como es el caso del [BNO080].

A continuación se muestran dos tablas con información técnica de IMUs que siguen el criterio especificado para el bloque de IMUs con fusión sensorial. La tabla completa de las seis IMUs analizadas clasificadas en este bloque se muestra en el Anexo II.



		FABRICANTE	BOSCH	XSENS
		MODELO	BNO055	MTi-1 IMU
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	MEM	PCB
		Tamaño (L x W x H)	3.8 x 5.2 x 1.13 mm	12.1 x 12.1 x 2.55 mm
		Precio	12.07 € (27,97 € USB)	163.23 €
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	14 bit	-
		Rango de medida	±2 g; ±4g; ±8g; ±16 g	±16 g (max)
		Sensibilidad	1 LSB/mg	-
		Densidad ruido	150 mg/√Hz (190 mg/√Hz max)	120 mg/√Hz
		CT offset	±1 mg/K	±0.2 mg/K
		CT sensibilidad	±0.03 %/K	±0.002 %/K
		BW	5... 684 Hz	324 Hz (eje Z: 263 Hz)
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	16 bit	-
		Rango de medida	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±2000 dps (max)
		Sensibilidad	16.0... 900 LSB/dps	-
		Error offset	±1 dps	±1 dps
		Densidad ruido	0.014 dps/√Hz	0.007 dps/√Hz
		CT offset	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K
		CT sensibilidad	±0.03 %/K	-
	<b>MAGNETÓMETRO</b>	Rango de medida	±1300 μT (x-, y-axis) ±2500 μT (z-axis)	8 gauss
Resolución		~0.3 μT	0.5 mgauss	
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>		Nº PINES	28	28
		TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO	-40°C...+85°C	-45°C...+85°C
		ALIMENTACIÓN	2.4... 3.6 VDD 1.7... 3.6 VDDIO	2.19... 3.6 V
		MICROCONTROLADOR	32-bit Cortex M0	MCU (Xsens)
		FUSIÓN SENSORIAL	Cuaterniones Ángulos de Euler	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación
		INTERFACES DE COMUNICACIÓN	2xSPI; 2xI2C; AUX I/F; OIS I/F; 2xinterrupciones	SPI; I2C; UART (seleccionable)
<b>APLICACIONES</b>		Reconocimiento gesto; OIS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Drones de logística grabación, UAVs Navegación; VR/AR HDMs; PDR	

Tabla 3: Datos técnicos de IMUs del segundo bloque 1

		FABRICANTE	SPARKFUN ELECTRONICS / Hillcrest Labs
		MODELO	BNO080
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	SiP
		Tamaño (L x W x H)	3.8mm x 5.2mm x 1.1 mm
		Precio	31.28 €
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	14 bit
		Rango de medida	±2 g; ±4g; ±8g; ±16 g
		Sensibilidad	1 LSB/mg
		Error offset	±80 mg
		Error ganancia	±1%
		Densidad ruido	150 mg/√Hz (190 mg/√Hz max)
		CT offset	±1 mg/K
		CT sensibilidad	±0.03 %/K
		BW	5... 684 Hz
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	16 bit
		Rango de medida	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps
		Sensibilidad	16.0... 900 LSB/dps
		Error offset	±1 dps
		Error ganancia	±1 %
		Densidad ruido	0.014 dps/√Hz
		CT offset	±0.015 dps/K
		CT sensibilidad	±0.03 %/K
	<b>MAGNETÓMETRO</b>	Rango de medida	±1300 μT (x-, y-axis) ±2500 μT (z-axis)
		Resolución	~0.3 μT
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>		Nº PINES	28
		ALIMENTACIÓN	2.4... 3.6 VDD 1.7... 3.6 VDDIO
		MICROCONTROLADOR	32-bit ARM Cortex
		FUSIÓN SENSORIAL	Cuaternios, contador de pasos clasificación de actividad detector de vibraciones
		INTERFACES DE COMUNICACIÓN	I2C; UART; SPI; UART-RVC
<b>APLICACIONES</b>		AR/VR, smartwatches, fitness bands, audio headsets Smartphones, tablets Ultrabooks, robotics	

Tabla 4: Datos técnicos de IMUs del segundo bloque 2

### 3.2.3 IMUs AVANZADAS

Por último, existen dispositivos electrónicos completos en cuanto al ámbito donde está enfocado el proyecto. Son IMUs compactas con prestaciones completas que proporcionan información de alto nivel a partir del procesamiento de señales realizado de forma interna. Los datos procedentes de sensores adicionales a los acelerómetros, giróscopos y magnetómetros, como bien pueden ser barómetros, sensores de temperatura, suman información al conjunto. En general realizan la transmisión de información vía inalámbrica por Bluetooth o WiFi, o mediante un almacenamiento interno a través de una tarjeta microSD, e incorporan baterías para que tengan un uso portable. Algunos modelos como el [NGIMU], además de disponer de almacenamiento interno, permiten mostrar datos en tiempo real mediante una conexión WiFi. Generalmente, son dispositivos portables adheribles al cuerpo humano mediante una pulsera o correa ajustable. Las IMUs con los avances tecnológicos más novedosos son aquellas que registran datos acerca de la actividad física del paciente que porta el dispositivo, y que permiten estudiar al sujeto desde un punto de vista clínico. Este es el caso del [BioStampRC], un sensor flexible adaptado al cuerpo humano en forma de parche.

A continuación se muestran dos tablas con información técnica de IMUs que siguen el criterio especificado para las IMUs avanzadas. La tabla completa con las ocho IMUs analizadas clasificadas en este bloque se muestra en el Anexo III.

		FABRICANTE	IO Technologies	SHIMMER
		MODELO	NGIMU	SHIMMER3
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	Comercial integrado	Comercial integrado
		Tamaño (L x W x H)	56 x 39 x 18 mm	51 x 34 x 14 mm
		Precio	348.64 €	359 €
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	490 $\mu$ g	14-bit
		Rango de medida	$\pm 16$ g	$\pm 2$ g; $\pm 4$ g; $\pm 8$ g; $\pm 16$ g
		Sensibilidad	-	1571 LSB/g a $\pm 2$ g
		Densidad ruido	-	125 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz (Low noise accelerometer)
		Frecuencia de muestreo	400 Hz	51.2 Hz (típico)
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	0.06 dps	16-bit
		Rango	$\pm 2000$ dps	$\pm 125$ ; $\pm 250$ ; $\pm 500$ ; $\pm 1000$ ; 2000 dps
		Sensibilidad	-	131LSB/dps at $\pm 250$ dps
		Ruido RMS	-	0.1 dps
		Frecuencia de muestreo	400 Hz	51.2 Hz (típico)
	<b>MAGNETÓMETRO</b>	Rango	$\pm 1300$ $\mu$ T	$\pm 49.152$ $\mu$ T
		Resolución	$\sim 0.3$ $\mu$ T	16-bit
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>		BATERÍA	1000 mAh	450mAh
		SENSORES ADICIONALES	Presión, Humedad Temperatura (para calibración)	Acelerómetro Low noise, sensor de T <sup>o</sup> /presión, Medida ECG
		FUSIÓN SENSORIAL	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación Aceleración lineal	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación
		INTERFACES DE COMUNICACIÓN	Wi-Fi, Puerto serie, USB, almacenamiento tarjeta microSD	Bluetooth Almacenamiento en tarjeta microSD de 8GB, UART
<b>APLICACIONES</b>			Monitorización de Actividad; Deportes; Salud; Captura de movimiento	Dispositivo orientado a medicina; Deportes; Construcción inteligente

Tabla 5: Datos técnicos de IMUs del tercer bloque 1

		FABRICANTE	MBIENTLAB	TECHNAID	
		MODELO	MetaMotion R board	TECH IMU V.4	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		Formato	Comercial integrado	Comercial integrado	
		Tamaño (L x W x H)	29 x 18 x 6 mm	36 x 26 x 11 mm	
		Precio	67 €	-	
<b>SENSORES</b>	<b>ACELERÓMETRO</b>	Resolución	16-bit	0.122 mg	
		Rango de medida	±2 g; ±4g; ±8g; ±16 g	±4 g; ± 8g; ±16 g	
		Sensibilidad	16384; 8192; 4096; 2048 LSB/g	-	
		Densidad ruido	180 mg/VHz	-	
		Frecuencia de muestreo	25/32... 1600 Hz	-	
	<b>GIRÓSCOPO</b>	Resolución	16-bit	0.06 dps	
		Rango	±125; ±250; ±500; ±1000; ±2000 dps	±2000 dps	
		Sensibilidad	262.4; 131.2; 65.6; 32.8; 16.4 LSB/dps	-	
		Densidad ruido	0.008 dps/VHz	1 d RMS max	
		Frecuencia de muestreo	25/32... 1600 Hz	500 Hz max	
	<b>MAGNETÓMETRO</b>	Rango	±1300μT (x,y-axis) ±2500μT (z-axis)	±810 μT	
		Resolución	0.3μT	0.092 μT	
	<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>		BATERÍA	100 mAh	no
			SENSORES ADICIONALES	Presión, Humedad Temperatura, Luz ambiente	Temperatura (calibración)
FUSIÓN SENSORIAL			Ángulos de Euler Cuaterniones Aceleración lineal	Datos físicos en 3D, Cuaterniones, DCM. Incluye EKF	
INTERFACES DE COMUNICACIÓN			Bluetooth LE 4.2 - 2.4 GHz, 8MB Flash Memory	Comunicación CAN	
<b>APLICACIONES</b>			Monitorización de la actividad en personas	Ambientes acuáticos, biomecánica, Análisis de la marcha, Deportes, Ergonomía, Captura de Movimiento, VR/AR, Robots de navegación autónoma	

Tabla 6: Datos técnicos de IMUs del tercer bloque 2

### 3.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS IMUS ANALIZADAS

En las secciones siguientes se realiza una comparativa de los datos técnicos más relevantes de las IMUs analizadas en la sección anterior. Se comentan tanto las especificaciones técnicas más generales como las características de los sensores.

#### 3.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES

##### ACELERÓMETROS:

Analizando las tablas anteriores, la mayoría de los acelerómetros integrados en las IMUs analizadas tienen una resolución de 16 bits, pero puede ser inferior, de 14 bits como el [BNO055], o 12 bits como el [BMI055]. El rango de medida en la mayoría es programable pudiendo seleccionar entre  $\pm 2$  g,  $\pm 4$ g,  $\pm 8$ g,  $\pm 16$  g, e incluso  $\pm 24$  g en algunos modelos como el [BMI088]. La sensibilidad asociada al rango de medida tiene un valor comprendido entre 16384 y 2048 LSB/g, en los casos de 16 bit de resolución.

Estos sensores tienen un error de offset que puede alcanzar valores altos como  $\pm 90$  mg en algunos casos como el [LSM9DS0], y valores mínimos más habituales de  $\pm 20$  mg, como en los modelos BMI de Bosch. El error de ganancia de los acelerómetros no es un parámetro que aparezca frecuentemente en las hojas de características de los fabricantes, pero está en el rango del 0.4 % y el 1%. La densidad de ruido de estos sensores alcanza valores de 190 mg/VHz, estando el valor medio en 160 mg/VHz. Hay modelos que destacan por su bajo nivel de densidad de ruido, con valores de 90 mg/VHz como el [LSM6DS3]. En cuanto a los coeficientes de temperatura (CT) del offset y de ganancia, los valores medios son de 0.5 mg/ $^{\circ}$ C y  $\pm 0.03$  %/ $^{\circ}$ C, respectivamente. En el caso del CT de ganancia, los valores son más variados, alcanzando valores mínimos y máximos como  $\pm 0.002$  %/ $^{\circ}$ C y  $\pm 1.5$  %/ $^{\circ}$ C, respectivamente, en algunos casos.

##### GIRÓSCOPOS:

Los giróscopos son de 16 bit de resolución en la mayoría de los casos analizados. El rango de medida puede ser programable y con valores de  $\pm 125$ ,  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000$  dps, mientras que la sensibilidad asociada al rango de medida anterior tiene un valor comprendido entre 262 y 16.4 LSB/dps.

El error de offset de estos sensores puede alcanzar valores altos como  $\pm 30$  dps en algunos casos como el [LSM9DS1], y valores mínimos de  $\pm 0.5$  dps como en [BMI261]. El error de ganancia de los giróscopos tampoco es un parámetro que se muestre habitualmente en las hojas de características de los fabricantes, pero en los casos analizados tiene un valor medio del 0.4 %. El valor de la densidad de ruido de los giróscopos está en el rango de 0.025 y 0.008 dps/VHz. En cuanto a los coeficientes de temperatura del offset y de ganancia, los valores medios son de  $\pm 0.05$  dps/ $^{\circ}$ C y  $\pm 0.02$  %/ $^{\circ}$ C, respectivamente.

**MAGNETÓMETROS:**

Tal y como se ha mencionado anteriormente, una gran parte de los modelos de IMUs analizados incorporan un magnetómetro. Dichos sensores tienen por lo general un rango de medida de  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16$  gauss, o de  $\pm 1300$   $\mu\text{T}$  (eje x e y) y  $\pm 2500$   $\mu\text{T}$  (eje z), con una resolución media habitual de valor 0.3  $\mu\text{T}$ .

**FRECUENCIA DE LOS SENSORES:**

El ancho de banda de los sensores está en el rango de 5 Hz y 1.6 kHz, y en la mayoría de los casos es programable. El ODR (*Output Data Rate*) de los acelerómetros está comprendido entre los 12.5 Hz y 1.6 kHz, pero en muchos casos la frecuencia máxima es de 800 Hz [MTi1]. Los giróscopos tienen un ODR de valor comprendido en el rango de 25 Hz y 1.6 kHz, aunque hay modelos en los que pueden llegar a valores como 3.2 kHz e incluso 6.4 kHz [BMI263].

**SENSORES ADICIONALES:**

Las IMUs pertenecientes al segundo y tercer bloque de clasificación en muchos casos incluyen sensores adicionales a los acelerómetros, giróscopos y magnetómetros. Estos sensores pueden ser termistores u otros sensores de temperatura que en la mayoría de los casos son utilizados para la calibración, como es el caso del [NGIMU]. En otros casos como el [SHIMMER3], incorporan un solo sensor que mide tanto la presión barométrica como la temperatura de forma conjunta. Aunque son menos habituales, se pueden encontrar IMUs con sensores de humedad o de luz ambiente, como el [MetaMotionRboard].

**3.3.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Los sistemas de medida inercial pueden tener tamaños muy reducidos de apenas 3 mm<sup>2</sup> cuando están en formato MEM, mientras que las IMUs diseñadas sobre placa para trabajar con Arduino tienen un tamaño aproximado de 30 mm<sup>2</sup>. Los dispositivos electrónicos más completos tienen un tamaño aproximado de 50 x 40 x 20 mm<sup>3</sup> (L x W x H) incluyendo la carcasa que los protege, y pueden alcanzar los 6.5 x 3.5 x 0.3 cm<sup>3</sup> en algunos casos. El rango de temperatura de funcionamiento de los dispositivos es de -40 °C y +85°C.

### 3.3.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

En los casos de los MEM, la alimentación suele estar entre el rango de 1.7 V y 3.6 V. Las IMUs diseñadas para Arduino generalmente se alimentan de 3.3 V a 5 V.

Los dispositivos que transmiten los datos vía Bluetooth o WiFi, o que tienen almacenamiento propio mediante tarjeta microSD, incorporan una batería recargable cuya capacidad puede ser de 15 mAh, 100 mAh, o 1000 mAh, dependiendo del modelo.

En cuanto al consumo de corriente, algunos dispositivos destacan por un bajo consumo de menos de 1 mA a pleno rendimiento como el [BMI263], pero en términos generales los consumos suelen estar en el rango de 4 a 6 mA.

### 3.3.4 INTERFACES DE COMUNICACIÓN

Las IMUs que están en formato MEM suelen tener de 14 a 16 pines, de los cuales algunos pueden programarse como buses de interfaz de comunicación. Por lo general, los buses serie más comunes en las IMUs son el SPI y el I2C. El número de pines destinados para ambos suele ser el mismo (2xSPI, 2xI2C) pero es frecuente encontrar más pines para SPI en algunos modelos (6xSPI). Existen modelos de BOSCH Sensortec como el [BMI055] que además tiene la opción del puerto serie UART, o como el [BMI263] que incorporan buses de datos en serie multipunto más novedosos como el MIPI I3C. Estos MEM también ofrecen la posibilidad de programar sus pines como interrupciones. Normalmente este tipo de sensores suele reservar entre 2 y 4 pines para interrupciones.

Las vías de transmisión inalámbricas de datos más frecuentes de las IMUs avanzadas son mediante Bluetooth, como el [MetaMotionRboard], o WiFi como el [NGIMU]. A menudo este tipo de IMUs tienen la opción de un almacenamiento interno de datos a través de una tarjeta microSD, donde se generan archivos con la información seleccionada, para luego acceder a ella desde otros terminales.

### 3.3.5 FUSIÓN DE DATOS DE LOS SENSORES

Una gran parte de los sistemas de medida inercial que están en el mercado llevan integrado un microcontrolador con el que se realiza la fusión de datos procedentes de los sensores. Cada fabricante implementa sus propios algoritmos para obtener información acerca de la orientación, de la velocidad lineal, o de la trayectoria de la IMU. La mayoría de las IMUs analizadas que pertenecen a este grupo muestran datos acerca de la orientación en distintos formatos, como son los ángulos de Euler (Roll, Pitch y Yaw) o cuaterniones, como el [BNO080] o el [BNO055 USB Stick], o matrices de rotación como por ejemplo el [Tech IMU] o el [NGIMU]. En algunos casos como el [BNO080] de SparkFun incluyen una capa de más alto nivel que proporciona información como el número de pasos, vibraciones, o realiza una clasificación de la actividad.



### 3.3.6 FABRICANTES

Los fabricantes de sensores inerciales como de circuitos integrados más habituales son BOSCH Sensortec y STMicroelectrónica. Adafruit también ha desarrollado sus propios componentes a partir de los modelos de Bosch o STM para que puedan ser utilizados en proyectos con Arduino. HillcrestLabs ha desarrollado un modelo, el [BNO080], que ofrece alta precisión en los datos proporcionados.

En cuanto a los fabricantes más enfocados al ámbito de la salud, la empresa IO Technologies tiene varios modelos, de los que destaca la [NGIMU], un dispositivo compacto, listo para ser portado por el sujeto, que permite la comunicación via WiFi, USB o mediante almacenamiento en tarjeta microSD. MbientLab tiene el modelo [MetaMotionR] que lleva integrado el sensor de Bosch [BMI260] pero que incorpora la opción de enviar los datos vía Bluetooth.

Por último, el modelo más novedoso es el [BioStampRC] de MC10, un sensor flexible y adherible al cuerpo humano. Realiza medidas biopotenciales desde todas las localizaciones del cuerpo humano, y permite el almacenamiento y copia de seguridad en la nube. El producto contiene un amplio kit que incluye todas las herramientas que permiten realizar el estudio.

### 3.3.7 COSTE

El coste de las IMUs depende de varios factores, como el tipo de información que se extrae de ellas, o la calidad de los sensores que lleva integrados. Se distinguen tres bloques:

- Las que requieren de un procesamiento posterior de los datos procedentes de los sensores para extraer información acerca de la orientación tienen un precio que varía desde los 4 € hasta los 20 €. Las IMUs más básicas que se pueden encontrar en el mercado, con solo un acelerómetro y un giróscopo, son las que tienen precios más bajos, en torno a los 5 € o 15 €, dependiendo del fabricante. Las IMUs que están diseñadas para ser compatibles con plataforma Arduino tienen un precio superior, entre 15 € y 20 €, ya que suelen incluir el magnetómetro.
- Las IMUs que llevan integrados microprocesadores para la fusión de datos tienen un precio variado, pero es generalmente superior al precio de las anteriores. Se pueden obtener IMUs con fusión de datos en formato SiP (System in Package) por 12 €, o compatible con Arduino por 30 €. Las IMUs que requieren de un software específico desarrollado por el fabricante para mostrar datos directamente en un ordenador tienen un precio que parte de los 30 € en los casos en los que la comunicación es vía cable o USB, y puede alcanzar un valor cercano a los 100 € e incluso a los 400 € en el caso de disponer de almacenamiento de datos propio mediante tarjeta microSD o de comunicarse vía Bluetooth con el ordenador.

- Los precios más altos son los correspondientes a las IMUs más avanzadas en tecnología y enfocadas plenamente al ámbito de la salud. Son dispositivos muy completos en cuanto a la calidad y precisión de los datos, gracias en gran parte a la calidad de los sensores y del procesamiento que llevan integrados. Estas ventajas suponen precios muy altos, llegando incluso a cifras próximas a los 1500 € en los productos más novedosos, como es el caso del sensor adherible al cuerpo humano [BioStamp RC].

### 3.4 SELECCIÓN DE IMUS

El análisis que se ha llevado a cabo de los distintos parámetros y especificaciones técnicas que presentan los sistemas de medida inercial permite tener un conocimiento general del nivel de prestaciones que ofrecen las IMUs de mercado. En el ámbito en el que está englobado el TFG, las IMUs que mejor se adaptan a las necesidades son las pertenecientes al tercer bloque (IMUs avanzadas), ya que se trata de dispositivos compactos listos para ser utilizados y con la posibilidad de poder configurar parámetros de funcionamiento de forma sencilla gracias a los entornos que desarrollan los propios fabricantes. Sin embargo, para cumplir con los objetivos propuestos para este proyecto, se ha decidido evaluar sensores que presentan distintos niveles de prestaciones para poder realizar comparativas y llegar a conclusiones significativas.

El criterio que se ha seguido para seleccionar las IMUs, que han sido sometidas a evaluación en los capítulos siguientes, se basa en los siguientes factores:

#### **Datos de salida de la fusión sensorial**

Para que la evaluación de las IMU sea productiva y el análisis comparativo sea completo, se han seleccionado las IMUs que incorporan su propio microprocesador para la fusión de datos. Esto permite obtener o bien datos calibrados procedentes de los acelerómetros y giróscopos, listos para ser procesados con los algoritmos a utilizar de forma posterior, o bien datos de salida en cuanto a la orientación (ángulos de Euler, cuaterniones...) o a otra información relevante para el análisis (detección de pasos, tiempo de muestreo...).

#### **Alimentación**

En las aplicaciones que se emplean en este proyecto, las IMUs se portan en distintas zonas del cuerpo y se recorren distancias durante periodos de tiempo. Si los dispositivos incorporan una batería recargable, se pueden realizar numerosas pruebas de forma autónoma y sin tener que recurrir a conexiones con otros terminales.

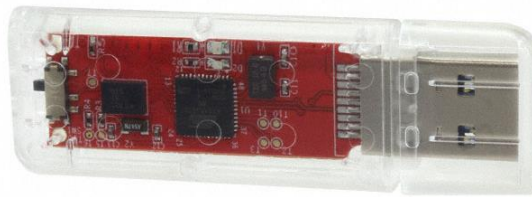
#### **Almacenamiento de datos**

Al tener que realizar numerosas pruebas de distinta duración, las IMUs que ofrecen la posibilidad de tener un almacenamiento interno mediante una tarjeta microSD hacen que sea más ventajoso el análisis y facilita las labores de procesamiento de datos.

Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente, la selección de IMUs que más se ajustan ha sido la siguiente:

- **BNO055 USB Stick**

El dispositivo BNO055 USB Stick, diseñado por BOSCH Sensortec, integra el sensor BNO055 junto con un microprocesador que realiza la fusión de datos, y actúa como interfaz al puerto USB. A través del software proporcionado por el fabricante, permite evaluar las prestaciones del sensor BNO055 en tiempo real y realizar las configuraciones de los parámetros de funcionamiento del mismo. Al ser un componente en formato MEM con la extensión del puerto USB, esta IMU limita su portabilidad al es necesaria una conexión al ordenador para que el software funcione correctamente y permita ver los valores en tiempo real o para que se genere un archivo de datos. El dispositivo se muestra en la figura 18.



*Figura 18: BNO055 USB Stick*

- **NGIMU**

IO Technologies ha desarrollado el NGIMU que combina los sensores internos y los algoritmos de procesamiento de datos para crear un diseño compacto y enfocado al registro de datos. Incorpora una batería de 1000 mAh y tiene la posibilidad de funcionar con Wi-Fi para ver los datos en tiempo real, aunque destaca por la posibilidad del almacenamiento interno a través de una tarjeta micro SD. Todas estas prestaciones hacen que el NGIMU sea un dispositivo de fácil uso para las aplicaciones enfocadas a la monitorización de larga duración (autonomía de 12h, la mayor de todos los dispositivos comerciales encontrados. La figura 19 muestra el dispositivo junto con su cinta ajustable y cable de transmisión y carga.



*Figura 19: Dispositivo NGIMU*

- **BNO080**

Sistema en chip diseñado por SparkFun Electronics que integra el acelerómetro, giróscopo y magnetómetro triaxial con un microcontrolador desarrollado por Hillcrest Labs. Aunque no se trate de un dispositivo listo para evaluación como pueden ser las dos IMUs anteriores, se trata de un sensor cuyas prestaciones son interesantes para analizar. Sus algoritmos de procesamiento de señales proporcionan precisión en datos en tiempo real de orientación, aceleración y velocidad angular y más datos de salida de alto nivel. Requiere de un sistema externo para ser evaluado, y en este proyecto se ha recurrido al Arduino UNO. En la sección Planos se incluye el esquema de conexiones del sistema. La figura 20 muestra el sensor.



Figura 20: Sensor BNO080 y el sistema de evaluación

- **SHIMMER3**

Dispositivo diseñado por SHIMMER, una empresa especializada en sensores inalámbricos portables para detección remota. Destaca por ser altamente flexible y adaptable, y es utilizado con frecuencia en aplicaciones médicas ya que incorpora un sistema de medición de señales ECG. Adicionalmente, incorpora una IMU permite la extracción de datos y la configuración del dispositivo a través de un software desarrollado por el fabricante. Su principal limitación para un uso masivo es el precio La figura 21 muestra el dispositivo y su correa ajustable.



Figura 21: SHIMMER3

A continuación se muestra una tabla recopilatoria con la selección de IMUs y sus características relacionadas con el criterio de selección anteriormente expuesto:

			CRITERIO DE SELECCIÓN		
<i>IMUs</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Tipo de IMU</i>	<i>Fusión sensorial</i>	<i>Obtención de datos</i>	<i>Alimentación</i>
<b>BNO055 USB Stick</b>	BOSCH Sensortec	2º bloque	Cuaterniones Ángulos de Euler Vector de gravedad Aceleración lineal	Mediante el Software se generan archivos de datos	Vía USB
<b>NGIMU</b>	IO Technologies	3er bloque	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación Aceleración lineal	Almacenamiento interno tarjeta microSD y a través de WiFi	Batería recargable 1000 mAh
<b>BNO080</b>	SparkFun Electronics	2º bloque	Cuaterniones Contador de pasos Información de alto nivel	Se requiere procesamiento	3.3 V
<b>SHIMMER3</b>	SHIMMER	3er bloque	x	Almacenamiento interno tarjeta microSD y mediante Bluetooth	Batería recargable 450 mAh

*Tabla 7: Selección de IMUs*



## CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LAS IMUS

---





Este capítulo se centra en caracterizar los dispositivos IMUs que han sido seleccionados en el capítulo anterior. Se ha evaluado su comportamiento a través de la implementación de los algoritmos proporcionados por el departamento, mencionados en el capítulo 2, de donde se extrae la información necesaria para tener un registro de la actividad física de una persona, y se presenta una serie de mejoras en dichos algoritmos para reducir los distintos errores que aparecen.

## 4.1 IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE EVALUACIÓN

Los algoritmos con los que se ha trabajado durante el proyecto han sido desarrollados en otros trabajos previos, por lo tanto, para llevar a cabo la caracterización de las IMUs, ha sido necesario establecer una estructura común de estos algoritmos para que puedan ser usados de forma genérica en cualquier dispositivo. Para ello es necesario especificar los parámetros de entrada y los datos de salida de dichos algoritmos. La figura 22 muestra un esquema básico de los dos algoritmos principales que se han utilizado en el desarrollo del TFG, especificando sus entradas y salidas. El código de las funciones de Matlab donde se utilizan estos algoritmos se muestra en la sección Planos.

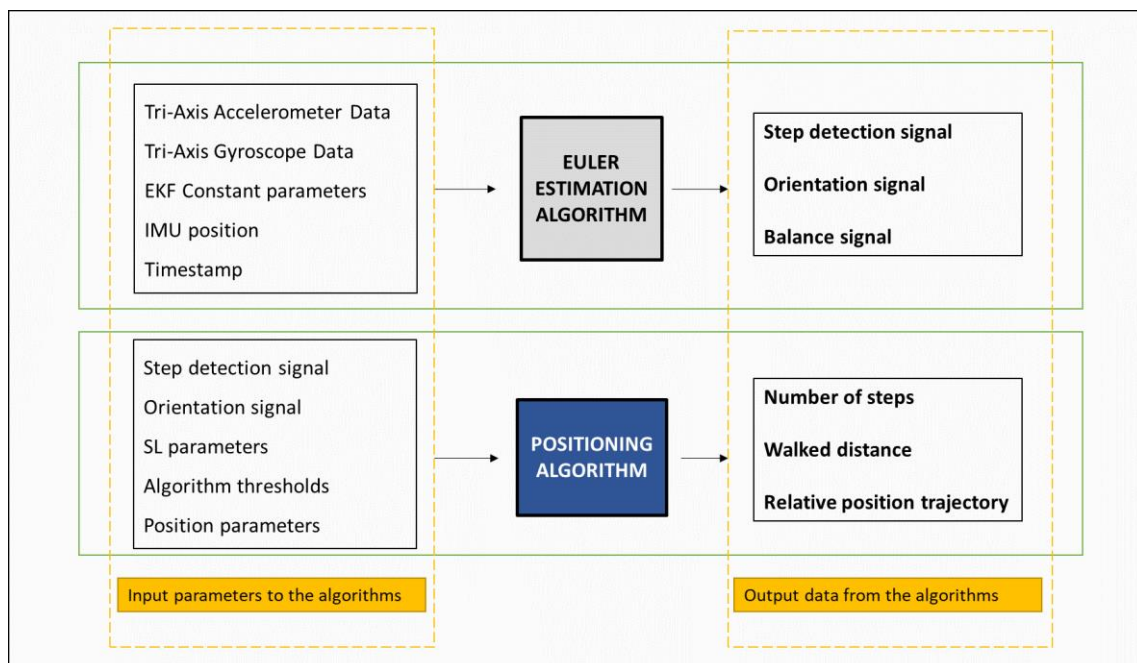


Figura 22: Esquema de implementación de los algoritmos de evaluación

### EULER ESTIMATION ALGORITHM

Los parámetros de entrada del algoritmo de estimación de ángulos de Euler son:

- Tri-Axis Accelerometer Data: son los tres vectores de datos procedentes del acelerómetro, uno por cada eje de coordenadas, en unidades de  $g$  ( $1g = -9.8 \text{ m/s}^2$ ).
- Tri-Axis Gyroscope Data: son los tres vectores de datos procedentes del giróscopo, uno por cada eje de rotación, en unidades de  $\text{rad/s}$ .
- EKF Constant parameters: son los parámetros constantes de entrada al Filtro de Kalman Extendido (EKF). Determinan tanto el valor de  $\sigma_\omega$ , que es la desviación estándar de las medidas del giróscopo, elemento base de la matriz de la varianza del ruido del proceso, como el valor de  $\sigma_\phi$  y  $\sigma_\theta$ , desviación estándar de la estimación del Roll y Pitch, respectivamente. Dichos parámetros se determinan de forma experimental.
- IMU position: se trata de una constante que identifica la posición en el cuerpo donde se está portando el dispositivo. Puede adquirir tres valores que se corresponden con una posición frontal, lateral y con la configuración ENU en la pierna izquierda. Sirve para realizar el ajuste de ejes correspondiente previo a la estimación de ángulos de Euler, y es independiente de la altura donde esté posicionada la IMU en la pierna. En la sección Planos se muestran los valores asociados a cada posición.
- Timestamp: vector de datos que muestra la secuencia de tiempos de una prueba, en segundos, en base al tiempo de muestreo de los sensores.

Los datos de salida del algoritmo de estimación de ángulos de Euler son las tres señales correspondientes a los tres ángulos de Euler, en grados: la señal de detección de pasos, la señal de orientación, y la señal de balanceo.

### POSITIONING ALGORITHM

Los parámetros de entrada del algoritmo de posicionamiento son:

- Step detection signal: señal de detección de pasos, procedente del algoritmo de estimación de Euler o la proporcionada directamente por el dispositivo.
- Orientation signal: señal de orientación, procedente del algoritmo de estimación de Euler o la proporcionada directamente por el dispositivo.
- SL parameters: constantes  $ah$  y  $bh$  de la ecuación que estima la anchura de paso,
- Algorithm thresholds: valores de los umbrales de amplitud de paso y de falso cero, ambos en grados, del algoritmo de detección de pasos.
- Position parameters: parámetros de entrada que especifican tanto la posición inicial de cada prueba en el plano  $x$  y, en metros, como la orientación inicial en grados con la que se parte inicialmente.

Los datos de salida del algoritmo de posicionamiento son:

- Number of steps: número de pasos estimado por el algoritmo de detección de pasos.
- Walked distance: distancia recorrida estimada en metros.
- Relative position trajectory: conjunto de datos en el plano  $x$  y, proporcionados por el algoritmo de posición relativa, que representan la trayectoria realizada estimada.

## 4.2 CARACTERIZACIÓN DEL BNO055 USB STICK

### 4.2.1 DETERMINACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS

Algunas IMUs tengan formato MEM o sean dispositivos comerciales integrados incluyen un pequeño diagrama que muestra la disposición de los ejes de coordenadas. En el caso del BNO055 USB Stick este diagrama no está incluido, por lo que es necesario realizar una calibración para determinar el sistema de coordenadas que el dispositivo utiliza y así poder interpretar de manera correcta los resultados. Se trata del primer paso a realizar si se trabaja un sensor inercial por primera vez, y en este proyecto es un proceso que solo se ha llevado a cabo con este dispositivo.

Según el software desarrollado por Bosch, el cual permite evaluar el dispositivo, la señal verde se corresponde a los valores del acelerómetro del eje X, la amarilla a los del eje Y, y la roja a los del eje Z. No obstante se han analizado los valores del acelerómetro probando distintas orientaciones del dispositivo, para verificar dicha referencia.

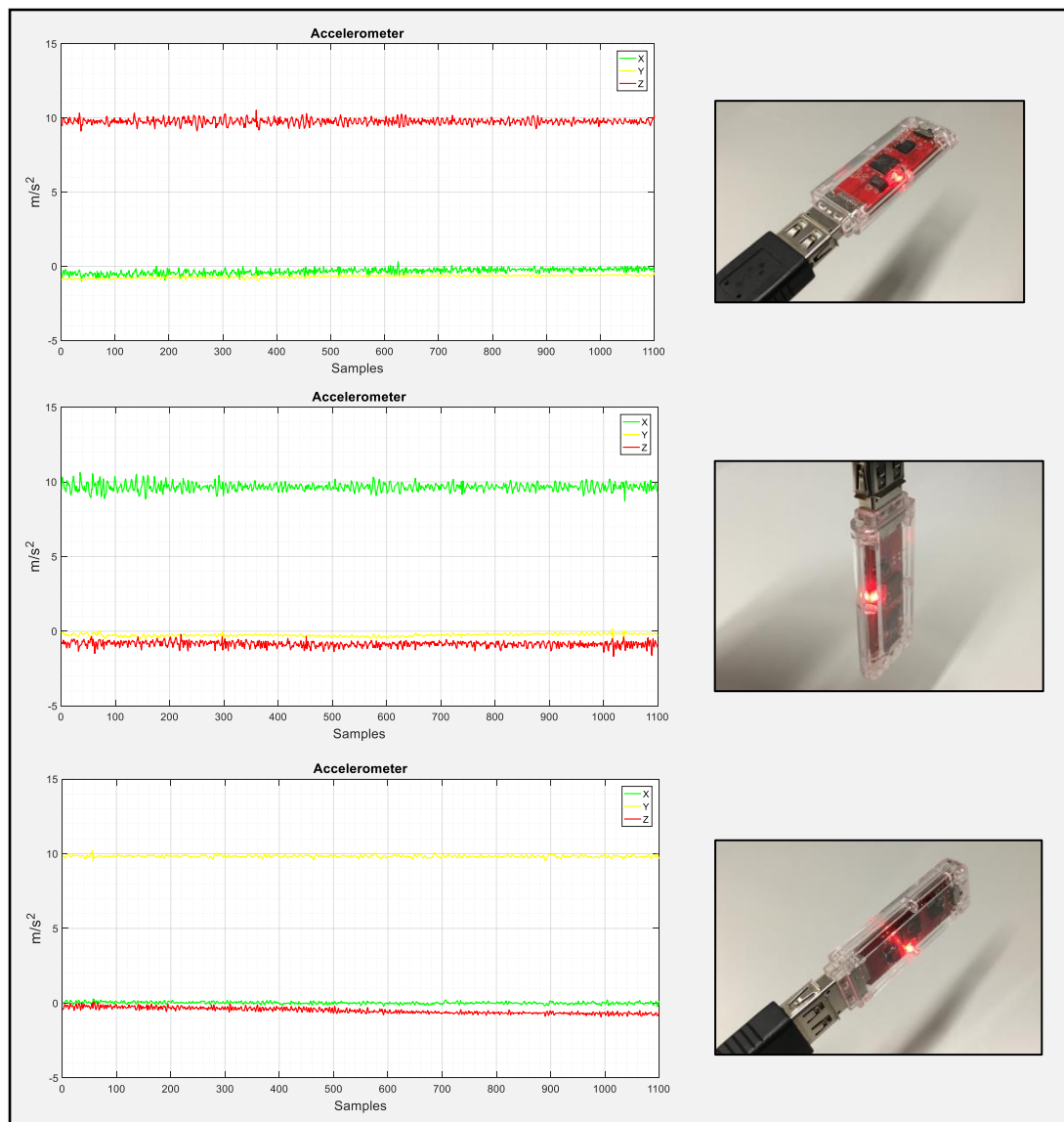
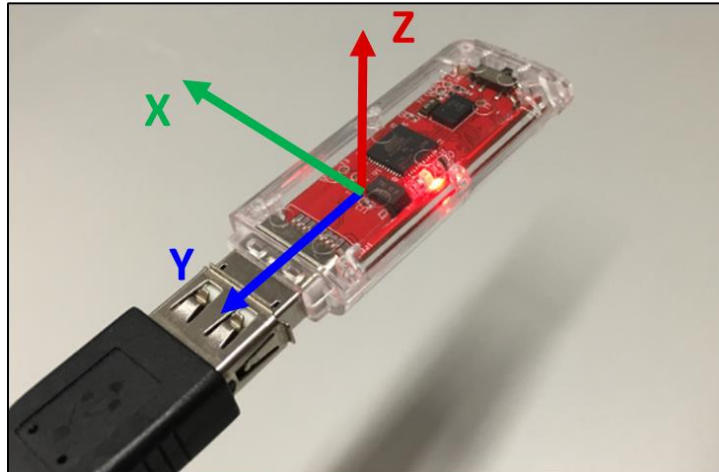


Figura 23: Obtención de ejes de coordenadas del BNO055 USB Stick

El dispositivo al estar en la posición que muestra la primera gráfica de la figura 23 presenta un valor de aceleración de aproximadamente  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Esto significa que el eje Z tiene la una dirección contraria al vector de vector de la gravedad ( $\cong -9.8 \text{ m/s}^2$ ). Lo mismo ocurre con las otras dos gráficas. Analizando estos valores, el sistema de coordenadas que emplea el BNO055 USB Stick es el que muestra la figura 24.



*Figura 24: Disposición de los ejes de coordenadas de BNO055 USB Stick*

Con el fin de conocer el funcionamiento del dispositivo, se han analizado los valores del giróscopo tras realizar unas pruebas donde se gira el dispositivo en torno a los tres ejes de coordenadas, y así poder verificar la definición de los ángulos de Euler que proporciona el dispositivo. La figura 25 muestra los resultados de estas pruebas, y relacionando los valores obtenidos con los movimientos realizados, se puede concluir que los valores del giróscopo son los esperados.

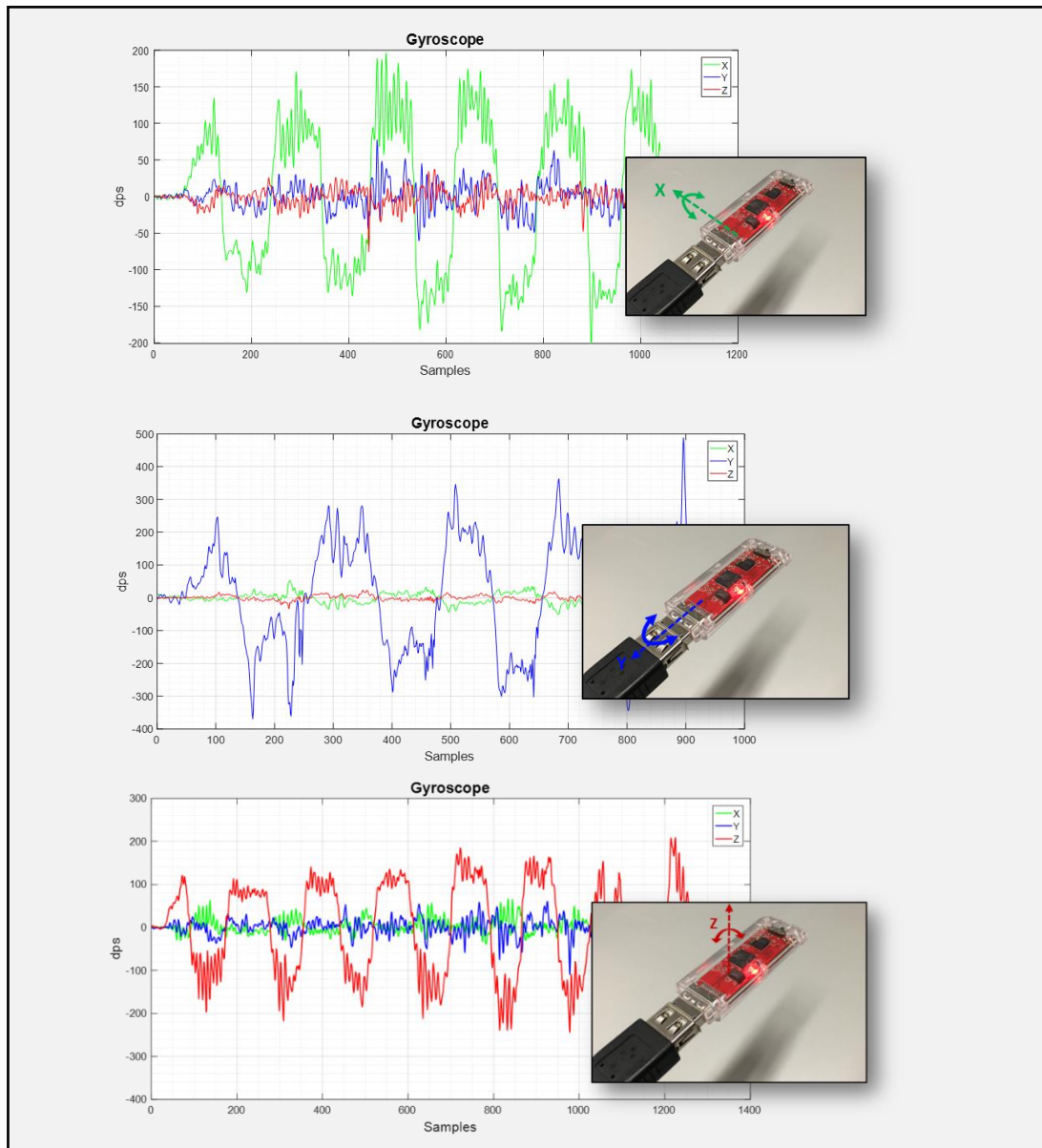


Figura 25: Datos del gir6scopo del BNO055 USB Stick

Para terminar esta verificaci6n, se muestran los resultados de pruebas sencillas que ractifican la definici6n de los 6ngulos de Euler (Roll  $\Phi$ , Pitch  $\Theta$  y Yaw  $\Psi$ ) del dispositivo, donde se realizan giros de 90 grados aproximadamente entorno a los ejes de coordenadas.

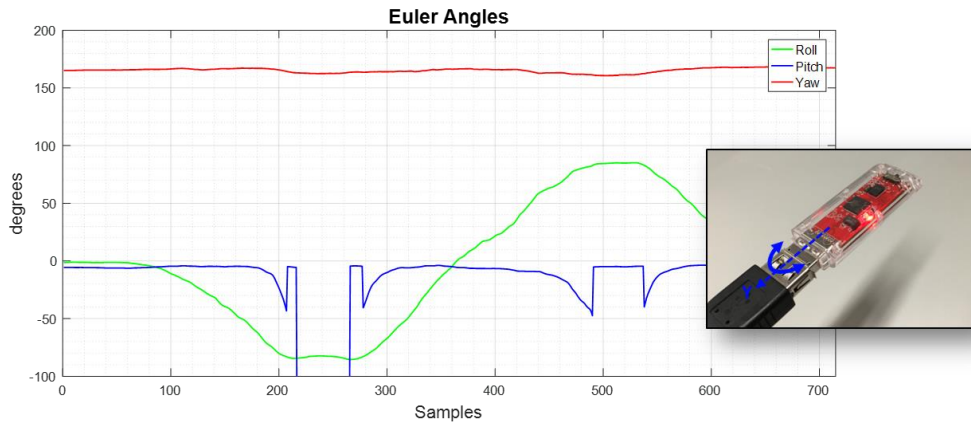


Figura 26: Variación del ROLL del BNO055 USB Stick

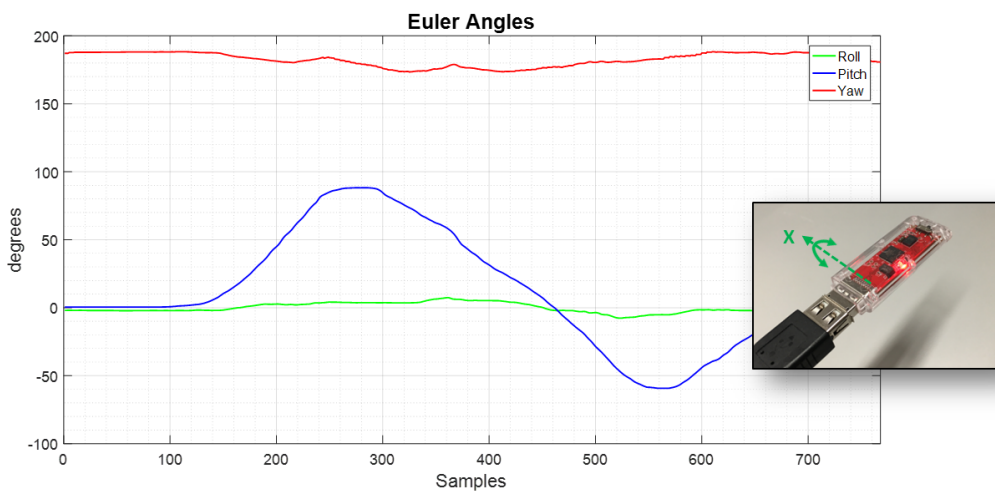


Figura 27: Variación del PITCH del BNO055 USB Stick

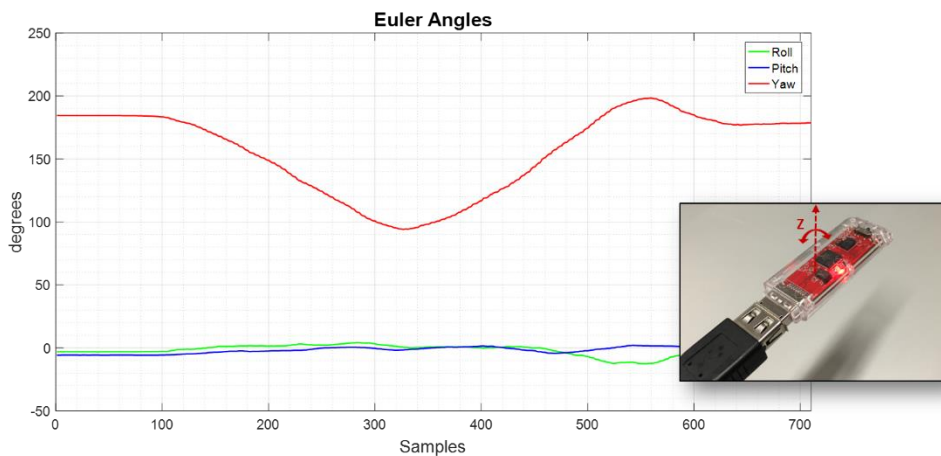
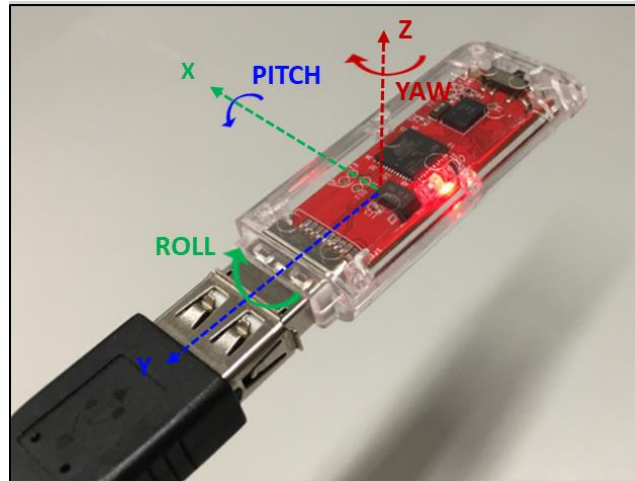


Figura 28: Variación del YAW del BNO055 USB Stick

Analizando las figuras 26, 27 y 28, la disposición del sistema de coordenadas y la definición de los ángulos de Euler del dispositivo BNO055 USB Stick utilizando esta configuración son las que muestran la figura 29.





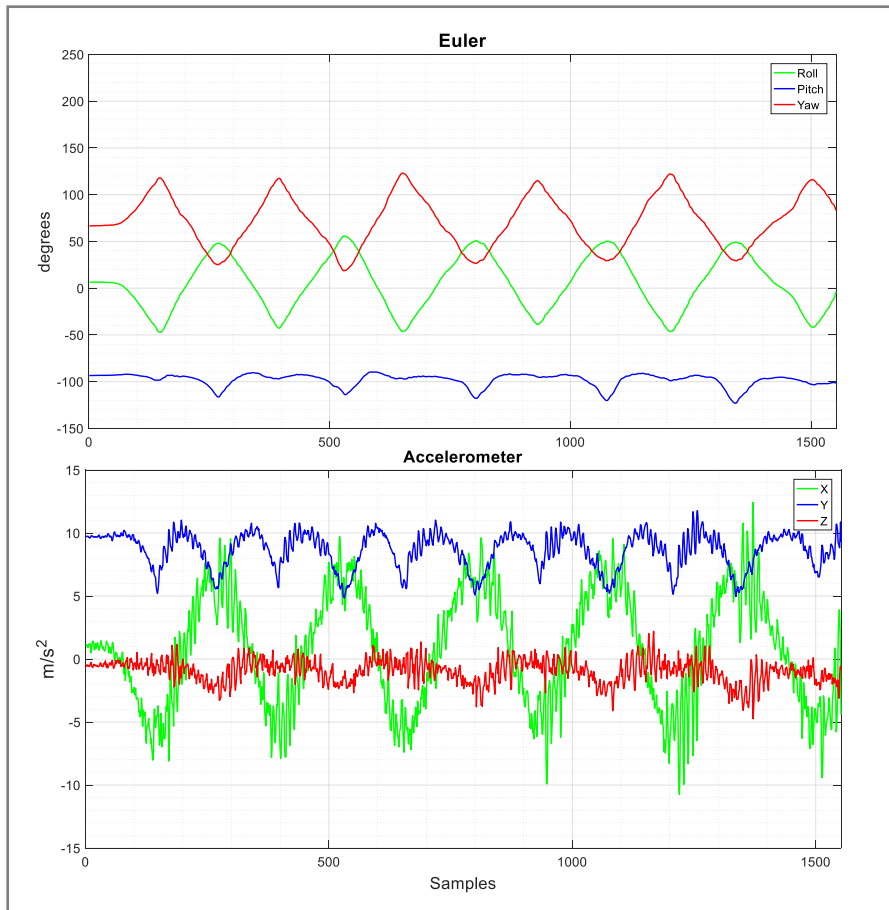
*Figura 29: Definición de Ángulos de Euler según el sistema de coordenadas del acelerómetro/giróscopo*

No obstante, la definición de los ángulos de Euler que tienen las IMUs no se muestra clara y lleva a muchas confusiones. En las gráficas de las figuras 26, 27 y 28, se realizan giros respecto a los ejes: primero positivos (según la ley de la mano derecha), y luego negativos. Sin embargo, las variaciones de los ángulos tienen el signo opuesto a lo esperado. Esto puede significar que la fusión sensorial que realiza el BNO055 para obtener los ángulos de Euler se encarga de reajustar el sistema de coordenadas de forma que permanece fijo y con unas direcciones como las que muestran la figura 29.

Para un usuario que quiera emplear el dispositivo, el sistema de coordenadas que debe seguir si solo quiere utilizar los acelerómetros, giróscopos y magnetómetros es el que muestra la figura 24. Este sistema de referencia se mueve de forma simultánea con el cambio de orientación del dispositivo, pero no es aplicable a la definición de ángulos de Euler XYZ.

Para comprobar esta limitación, se han realizado un conjunto de pruebas con el dispositivo BNO055 USB Stick probando distintas posiciones y simulando el movimiento de pasos con variaciones de 90 grados aproximadamente en el ángulo de detección de pasos correspondiente, como muestra la figura 30 y 31.

- Posición vertical y utilizando el ángulo Yaw como señal de detección de pasos:



*Figura 30: Prueba de análisis de limitación de los ángulos de Euler del BNO055 USB Stick*

Con la posición de uso utilizada, el único ángulo que debería variar de manera notable sería el Yaw desde los 0 grados (o  $\pm 180$ ) con variaciones de  $\pm 45$  grados. En cambio, varían de la misma manera pero de forma negada los ángulos Yaw y Roll, respectivamente. Los valores del acelerómetro sí se corresponden a lo esperado, ya que al tener el dispositivo verticalmente, el eje X debe ser del valor de la gravedad, y al aumentar el ángulo debe disminuir hasta llegar a cero. Con el eje Y ocurre lo contrario.



- Variación del Roll de forma continua mientras se pasa de posición horizontal a vertical:

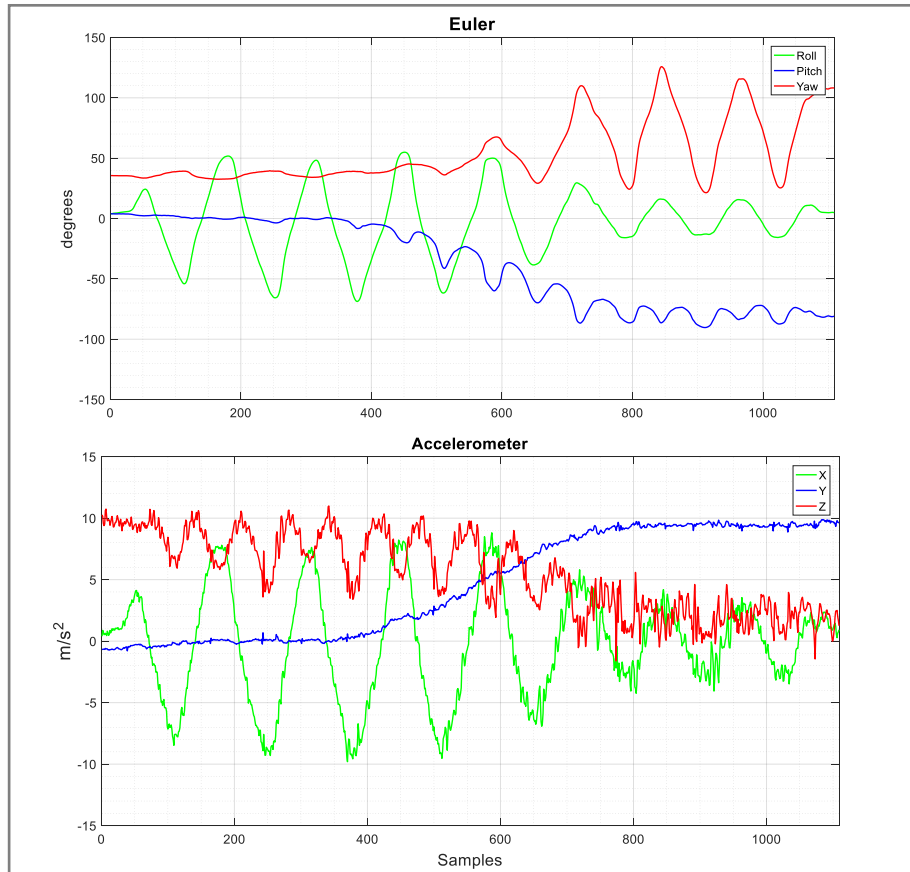
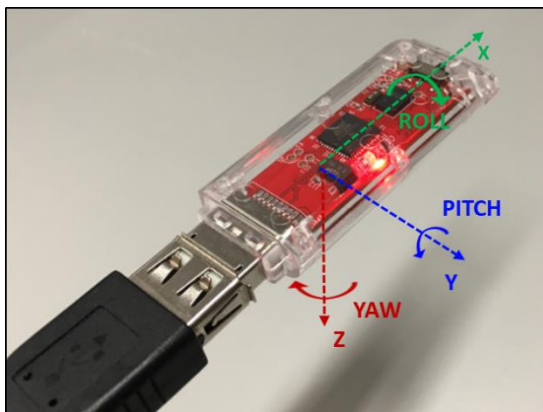


Figura 31: Prueba 2 de análisis de limitación de los ángulos de Euler del BNO055 USB Stick

Al comienzo de la prueba solo varía el ángulo Roll, y lo esperado es que al cambiar la posición de horizontal a vertical solo haya una variación del Pitch desde 0 hasta -90 grados. En cambio, se puede observar cómo a medida que se va cambiando de posición, el Roll disminuye su magnitud de variación y tanto el Yaw como el Pitch sufren variaciones con los giros del Roll.

Las pruebas anteriores indican que los ángulos de Euler de este dispositivo no se definen como ángulos de giro respecto de la disposición de ejes del acelerómetro o giróscopo, si no que siguen un sistema fijo.



La IMU define de forma constante y fija el Yaw como el ángulo respecto de la vertical, de forma que no siempre es un giro respecto del eje Z. A partir de la definición de este ángulo, se definen el Roll y el Pitch en un sistema de coordenadas de dextrógiro.

Figura 32: Definición de Ángulos de Euler del BNO055 USB Stick

## 4.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE ÁNGULOS DE EULER

Esta sección describe el proceso de adaptación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler presentado en el capítulo 2 [Muñoz 2016] para el BNO055 USB Stick.

### Ajuste de parámetros del filtro de Kalman extendido (EKF):

Una vez establecido el sistema de coordenadas del dispositivo, se ha procedido a ajustar los parámetros y umbrales de funcionamiento del EKF desarrollado por [Muñoz 2016] incluido en el algoritmo de estimación de los ángulos de Euler.

El primer paso será fijar el valor de la matriz de covarianza del ruido de la medida  $R$ . Para ello se han realizado pruebas con el dispositivo en reposo y se han calculado con Matlab las desviaciones estándar de las estimaciones del Roll y del Pitch. Este valor varía, en este caso, en función del cable utilizado como conector al PC. La matriz  $R$ , caracterizada por los valores calculados en las pruebas, sigue la siguiente expresión:

$$R = \begin{bmatrix} 0.0011^2 & 0 \\ 0 & 0.0011^2 \end{bmatrix} \text{grados}^2 \quad (4.1)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.0014^2 & 0 \\ 0 & 0.0014^2 \end{bmatrix} \text{grados}^2 \quad (4.2)$$

Las expresiones (4.1) y (4.2) se corresponden a los cálculos con un cable de corta longitud, y con uno de mayor longitud, respectivamente. En este TFG se ha empleado el valor de (4.2) para la matriz  $R$ , ya que para las pruebas se ha necesitado un cable de larga longitud.

Para calibrar el valor de la matriz  $Q$  del EKF, se ha realizado un análisis paramétrico variando la diagonal principal de la matriz  $Q$  del EKF de forma gradual. Se ha analizado el efecto que tiene esta variación de  $Q$  en la señal estimada a partir del algoritmo de una prueba sencilla, basada en hacer girar el dispositivo en torno al eje  $X$ , simulando pasos, siendo el ángulo Pitch (señal de detección de pasos) el que se analizará con detalle para realizar el ajuste comparada con la señal directamente obtenida del dispositivo.

- Variación de la diagonal principal de Q desde un valor  $10 \cdot 10^{-4}$  hasta  $1.56 \cdot 10^{-4}$  en 3 pasos:

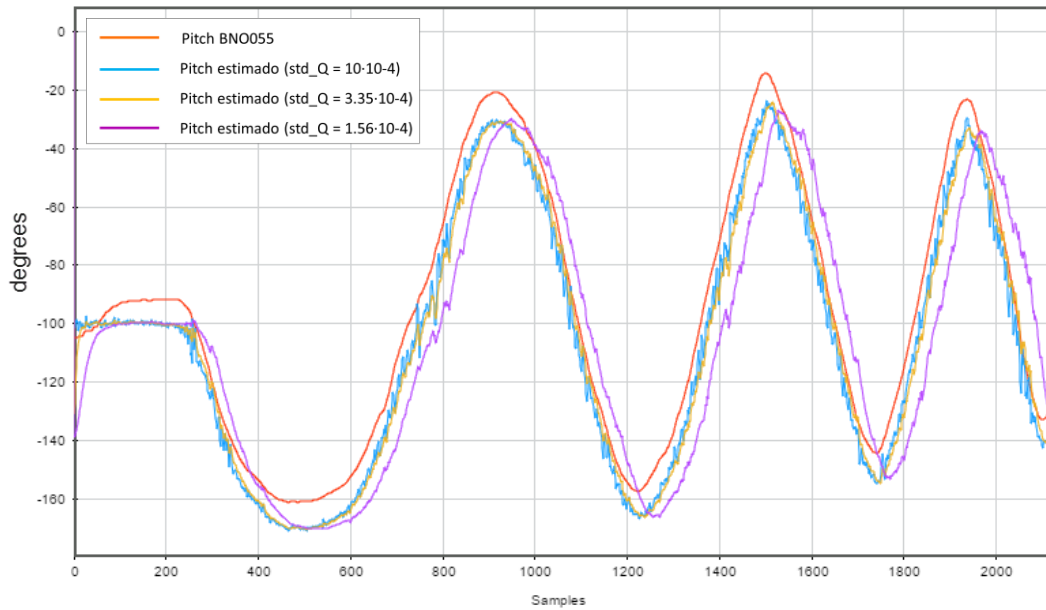


Figura 33: Análisis paramétrico del BNO055 para la obtención de Q

En la figura 33 se compara la señal procedente del dispositivo PitchB (señal naranja) con las estimadas a partir del algoritmo variando la varianza del ruido de proceso ( $std\_Q$ ), de mayor a menor. Se puede observar que para un valor de la varianza del ruido de proceso ( $std\_Q$ ) de  $10 \cdot 10^{-4}$  (señal azul) la señal muestra un rizado notable, mientras que para un valor de  $1.56 \cdot 10^{-4}$  (señal morada) el ruido de la señal disminuye pero se produce un retardo que a largo plazo puede provocar pérdida de información.

Para tener una precisión mayor, se ha acotado el rango de variación del parámetro de Q para el análisis paramétrico:

- Variación de la diagonal principal de Q desde un valor  $5 \cdot 10^{-4}$  hasta  $1 \cdot 10^{-4}$  en 4 pasos:

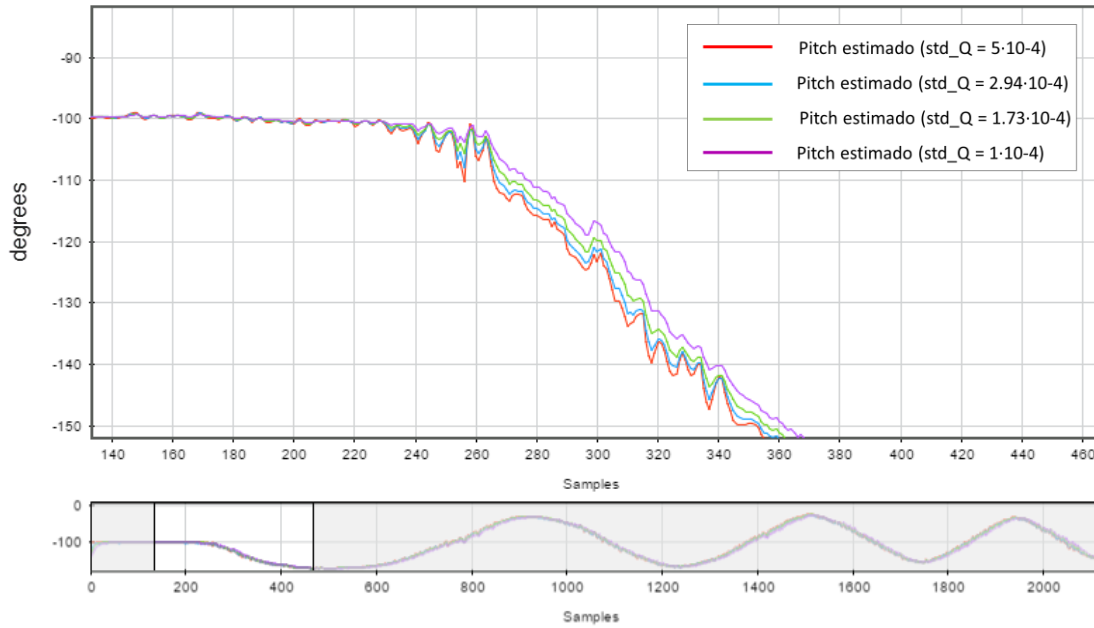


Figura 34: Análisis paramétrico 2 del BNO055 para la obtención de Q (la gráfica inferior muestra el tramo de la señal analizado, y la superior, las señales del tramo ampliado en detalle)

Para un valor  $\text{std\_Q} = 1 \cdot 10^{-4}$  (señal morada) el ruido de la señal disminuye con respecto a las señales con valores mayores de  $\text{std\_Q}$ . El aumento del retardo de la señal en función de la variación de Q se puede analizar con más detalle en la figura 35.

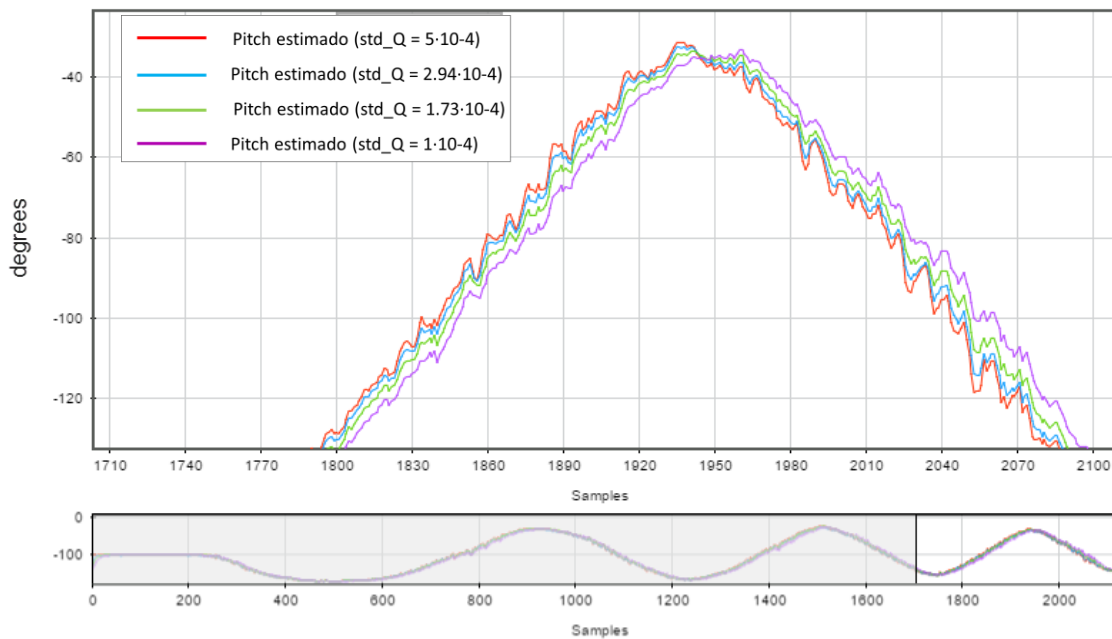


Figura 35: Análisis paramétrico 3 del BNO055 para la obtención de Q (la gráfica inferior muestra el tramo de la señal analizado, y la superior, las señales del tramo ampliado en detalle)

El estudio paramétrico anterior demuestra que para elegir el valor de la varianza del ruido de proceso de una IMU es necesario establecer una relación de compromiso entre el rizado y el retardo de la señal estimada. En este caso, ha servido para fijar el valor de  $1.56 \cdot 10^{-4}$  para el BNO055 USB Stick. Sin embargo, la obtención del valor de la matriz  $Q$  es uno de los procesos más complejos en las aplicaciones que emplean el EKF. Esta matriz cuantifica en cierta medida lo adecuado que es el modelo de estimación (lo mucho que se aproxima al modelo real). Por lo tanto, el proceso anterior sirve como ejemplo de cómo calibrar el valor de  $Q$  mediante un análisis paramétrico, pero se trata de un proceso que debe repetirse si se cambia de condiciones (tipo de aplicación, posición de la IMU, tipo de dispositivo..., etc.). A partir del análisis anterior, se han obtenido los siguientes valores para los parámetros del EKF:

$$\text{Umbral} = 1 \text{ m/s}^2; \quad Q = \begin{bmatrix} 0.000156^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000156^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.000156^2 \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0.0014^2 & 0 \\ 0 & 0.0014^2 \end{bmatrix}$$

Donde Umbral representa el margen de error que se comete cuando la norma da el valor de la aceleración de la gravedad y realiza la etapa de corrección, como muestra el diagrama de la figura 9.

La conclusión que se puede extraer de esta sección es que mediante la variación de los parámetros del EKF no se consigue mejorar la estimación de la señal hasta el punto de ser muy próxima a la generada por el propio dispositivo con su propio algoritmo. Esto podría significar que el algoritmo interno que emplea el BNO055 USB Stick para la obtención de los ángulos de Euler no solo realiza una fusión de los sensores procedentes del giróscopo y acelerómetro, si no que muy probablemente disponga de bloques adicionales donde se lleve a cabo algún tipo de filtrado de la señal para reducir el ruido.

Por lo tanto, para mejorar la estimación de los ángulos de Euler mediante el algoritmo implementado con Matlab a partir de los datos brutos de acelerómetro y giróscopo, es necesario añadir un procesamiento posterior que realice algún tipo de filtrado de la señal. Esto supondría un aumento de la densidad de código y, por lo tanto, una reducción de la optimización de las diversas aplicaciones donde se emplee dicho algoritmo.

### 4.2.3 EFECTO DEL MAGNETÓMETRO EN LOS ÁNGULOS DE EULER

Las IMUs que incorporan un magnetómetro utilizan sus medidas para llevar a cabo la fusión de datos. En algunos casos, como en el BNO055 USB Stick, la opción de utilizar o no el magnetómetro está disponible, ya que los datos proporcionados por el sensor en presencia de materiales ferromagnéticos y corrientes eléctricas se pueden mostrar erróneos por las perturbaciones que se producen [E. Muñoz 2016]. Por lo tanto, en aplicaciones donde se utilicen las medidas del magnetómetro para obtener los ángulos de Euler en entornos metálicos, los resultados pueden verse afectados negativamente como consecuencia de las perturbaciones del campo magnético.

Se ha realizado una prueba para analizar los resultados de los ángulos de Euler del propio dispositivo en función de las interferencias que existen en los entornos de trabajo, basada en variar el ángulo Yaw (ángulo de giro respecto de la vertical) de manera constante realizando aproximaciones a un motor eléctrico para ver el efecto de las perturbaciones. Los resultados de la prueba se muestran en la figura 36.

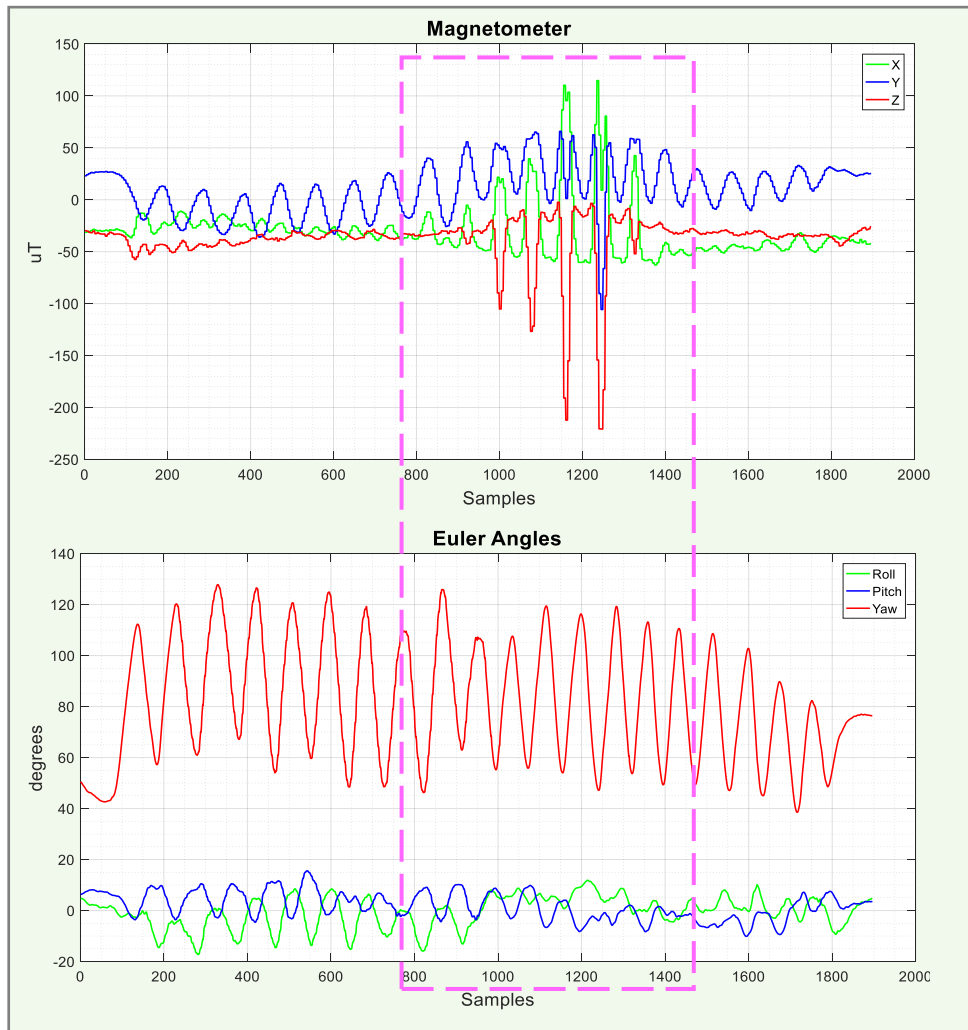


Figura 36: Efecto de las interferencias en el magnetómetro del BNO055 USB Stick (gráfica superior) y en los ángulos de Euler (gráfica inferior) con la calibración del magnetómetro activada.

En la figura 36, el recuadro marcado indica el momento en el que se aproximó el dispositivo a un motor eléctrico en funcionamiento. El efecto puede verse en los resultados del magnetómetro, donde se observa un notable aumento del ruido en las señales. Hasta ese punto de la prueba, el campo magnético medido en los tres ejes se mostraba constante y consecuente al movimiento realizado en la prueba, pero en ese intervalo se aprecia una distorsión de las medidas de los tres ejes, y más significativa en el eje Z.

Es en el ángulo Yaw (señal de orientación), definido como el ángulo respecto del eje X y el norte magnético, donde se observaría el mayor efecto de la perturbación. Sin embargo, no puede apreciarse un cambio significativo en dicha señal. Existe una variación constante durante toda la prueba de 60 grados aproximadamente, acorde a los movimientos realizados, pero dicha

variación no parece modificarse en presencia de las interferencias que produce el motor eléctrico. Se realizó la misma prueba con la opción de utilizar el magnetómetro en la fusión de datos desactivada, y los resultados se muestran en la figura 37.

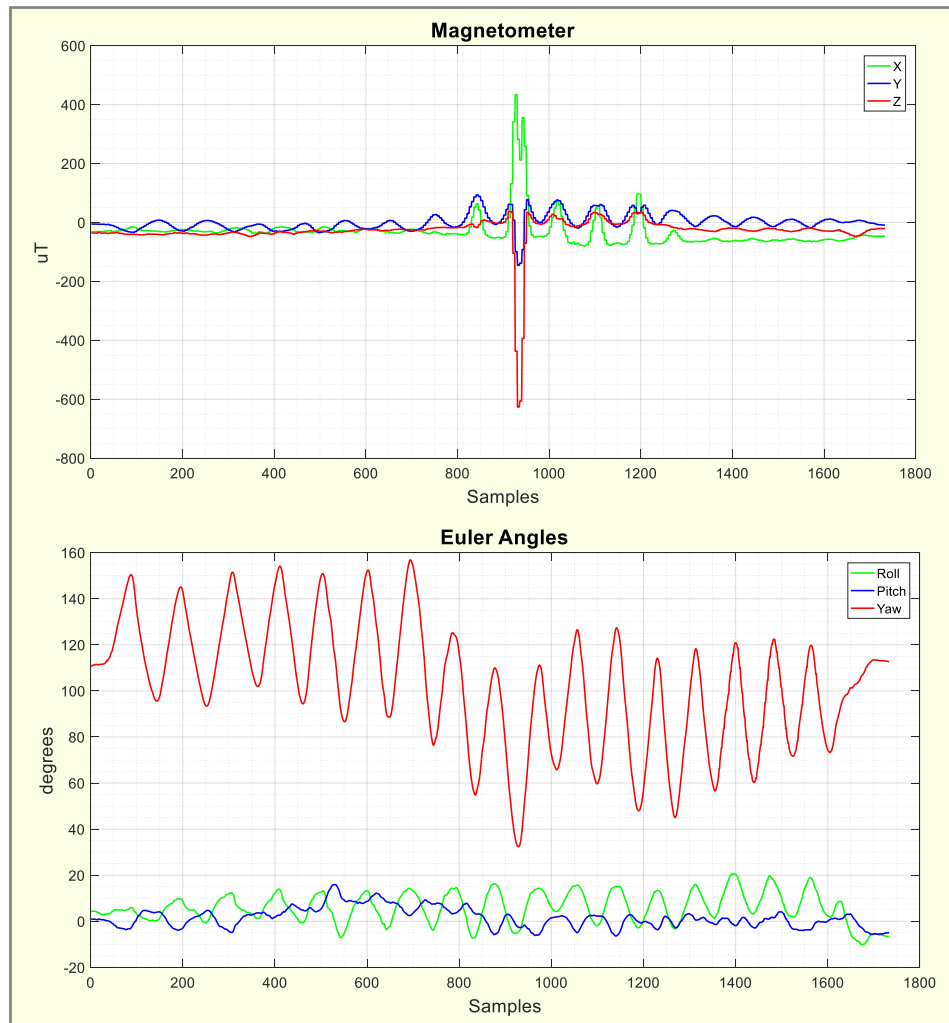


Figura 37: Efecto de las interferencias en el magnetómetro del BNO055 USB Stick (gráfica superior) y en los ángulos de Euler (gráfica inferior) con la calibración del magnetómetro desactivada

La figura 37 muestra que no existe una dependencia clara de los resultados del magnetómetro ante un entorno con interferencias por campo magnético, ya que la señal de orientación (Yaw) no sufre variaciones significativas en los dos casos en el intervalo de la perturbación.

En este TFG se descartó la utilización del magnetómetro en las ecuaciones del algoritmo de estimación de ángulos de Euler. En base a otros trabajos de investigación, se partía de la premisa de que los datos que proporcionan en entornos metálicos, como es el caso de la EPS, son erróneos. Esto se debe a que el campo magnético en estos entornos no es constante, y las medidas erróneas del magnetómetro afectarían negativamente a la estimación de los ángulos de Euler.

Se realizaron pruebas experimentales en diferentes entornos, dentro y fuera de las instalaciones de la EPS, para comprobar esta característica, pero no se pudo llegar a la conclusión de que el magnetómetro tiene un efecto significativo en los datos proporcionados por las IMUs.

## 4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA NGIMU

### 4.3.1 VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS

El propio dispositivo muestra la disposición de sus ejes de coordenadas. Para comprobarlo, se ha realizado una prueba donde la IMU se gira 90 grados en torno al eje Y desde una posición horizontal para luego volver a la posición horizontal, y luego repetir el proceso con el giro de-90 grados en torno al eje X. Los resultados del acelerómetro y giróscopo se muestran en las figuras 38 y 39, respectivamente.

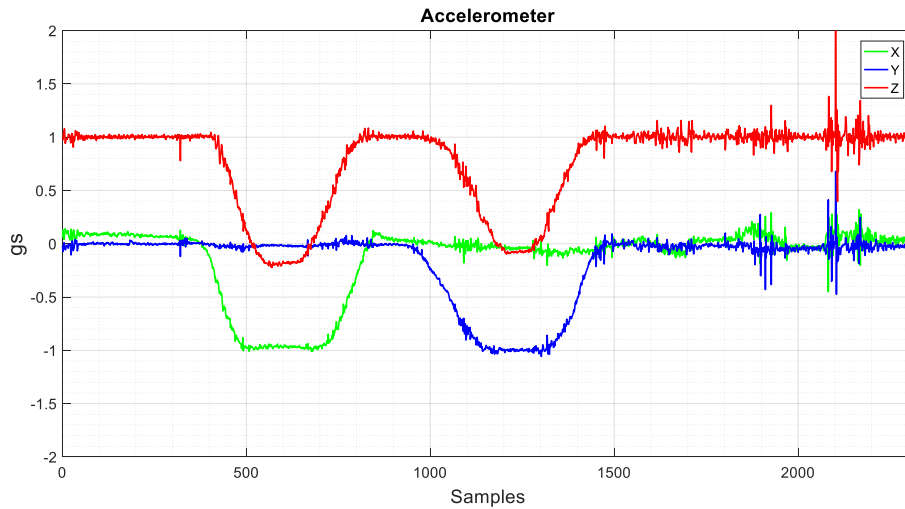


Figura 38: Valores del acelerómetro del NGIMU

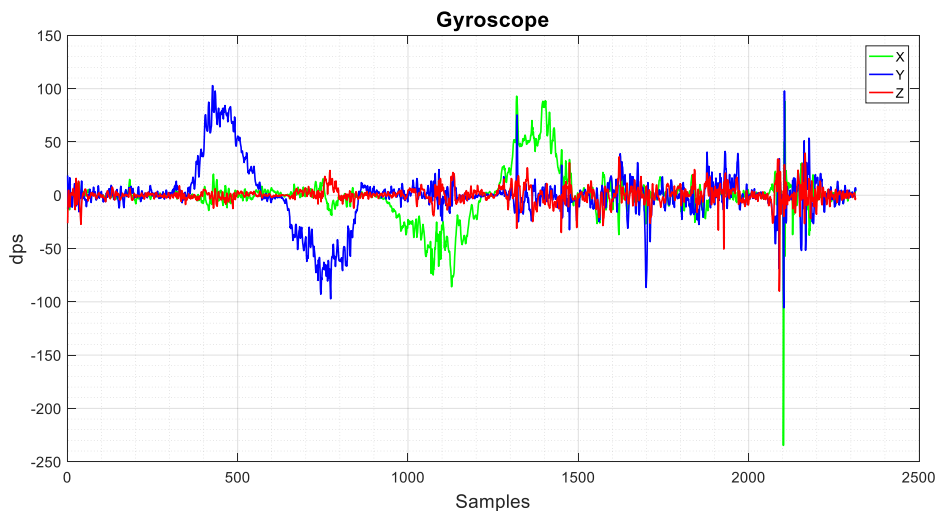


Figura 39: Valores del giróscopo del NGIMU

En este caso, el dispositivo interpreta el vector de aceleración como negativo hacia abajo, por lo tanto cuando el eje X e Y están direccionados hacia abajo obtienen un valor de -1 g, y el eje Z obtiene 1 g cuando el dispositivo está en posición horizontal al mirar hacia arriba. Los valores del giróscopo también se corresponden con lo esperado al hacer el giro en torno al eje Y positivo, y el giro en torno al eje X negativo.



Se ha verificado asimismo la definición de los ángulos de Euler del NGIMU, realizando una prueba que consiste en girar 90 grados el dispositivo en torno al eje X, eje Y, y eje Z, en ese orden. La figura 40 muestra que la variación de las señales se corresponde con lo esperado, ya que al realizar giros de 90 grados en torno a los ejes X, Y, y Z, los ángulos Roll, Pitch y Yaw sufren esas variaciones, respectivamente.

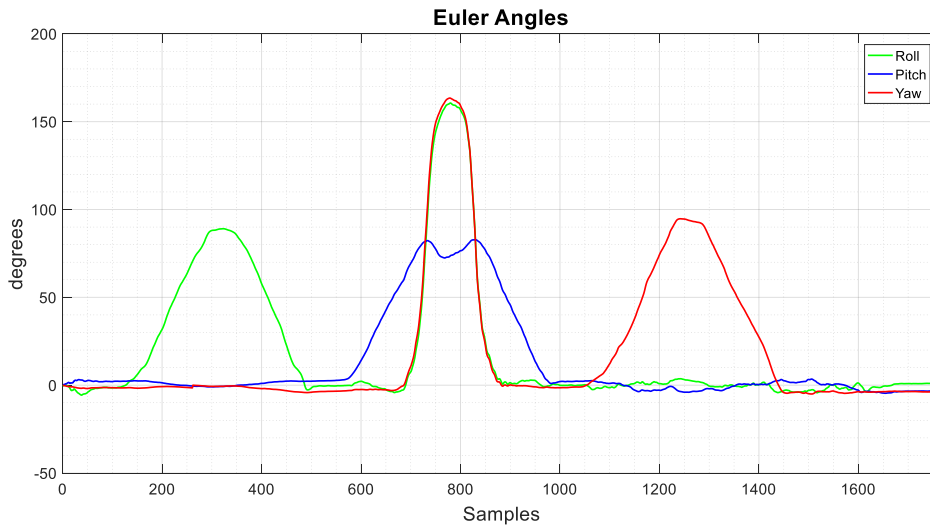
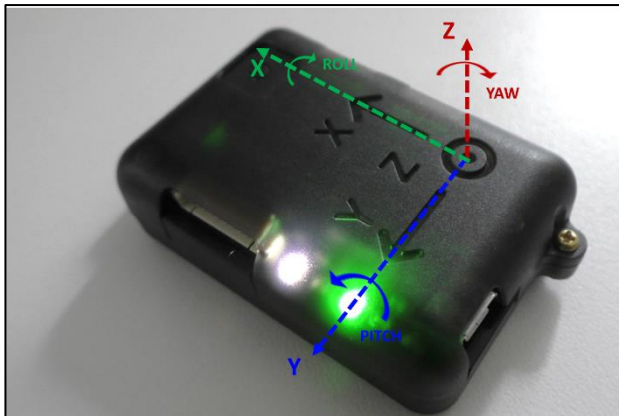


Figura 40: Ángulos de Euler del NGIMU

Se puede afirmar pues, que la configuración del sistema de coordenadas del NGIMU y la definición de ángulos de Euler para esa configuración es la que indica la figura 41.



Al igual que ocurre con el BNO055 USB Stick, la fusión sensorial que se realiza para la obtención de los ángulos de Euler no puede analizarse al tratarse de un sistema cerrado, pero sigue el mismo proceso de reajuste de ejes para que el Yaw sea el ángulo de giro respecto de la vertical.

Figura 41: Definición de los Ángulos de Euler del NGIMU

Esto supone que para se puedan emplear los ángulos de Euler del dispositivo de manera correcta es necesario posicionar la IMU en una configuración igual a la ENU. De otra manera, los ángulos de Euler serán erróneos.

### 4.3.2 COMPARATIVA DE LOS ALGORITMOS DE OBTENCIÓN DE LOS ÁNGULOS DE EULER

Esta sección describe el proceso de adaptación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler presentado en el capítulo 2 [Muñoz 2016] para el NGIMU.

#### Ajuste de parámetros del Filtro de Kalman Extendido (EKF):

Una vez establecido el sistema de coordenadas del dispositivo, se ha procedido a ajustar los parámetros y umbrales de funcionamiento del EKF desarrollado por el departamento [Muñoz 2016] para la estimación de los ángulos de Euler.

El primer paso será fijar el valor de la matriz de covarianza del ruido de la medida R. Para ello se han realizado pruebas con el dispositivo en reposo y se han calculado con Matlab las desviaciones estándar de las estimaciones del Roll y del Pitch. A partir de ese cálculo, la matriz R obtiene el siguiente valor:

$$R = \begin{bmatrix} 0.0029^2 & 0 \\ 0 & 0.0031^2 \end{bmatrix} \text{ grados}^2 \quad (4.3)$$

Para estimar el valor de la varianza del ruido del proceso, se ha recurrido al estudio paramétrico como se ha realizado con el BNO055 USB Stick. Para ello se han evaluado los resultados de una prueba basada en girar el dispositivo en torno al eje Y, simulando pasos, siendo el ángulo Pitch (ángulo de detección de pasos). Se analizará con detalle dicha señal, comparando los resultados obtenidos mediante el algoritmo y los obtenidos directamente con el dispositivo. El análisis paramétrico de la señal se ha realizado con la variación de la diagonal principal de la matriz Q del EKF de forma gradual. Los resultados se muestran en las figuras siguientes.

- Variación de la diagonal principal de Q desde un valor  $10 \cdot 10^{-4}$  hasta  $1.25 \cdot 10^{-4}$  en 4 pasos:

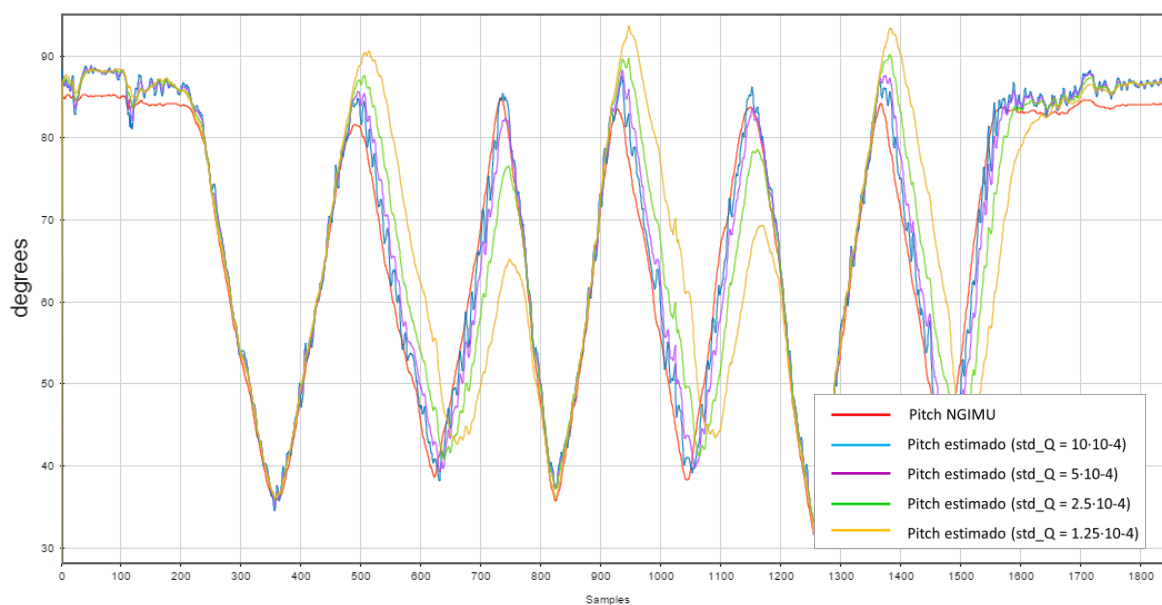


Figura 42: Análisis paramétrico del NGIMU para la obtención de Q

En la figura 42 se compara la señal obtenida directamente del NGIMU Pitch (señal naranja) con las estimadas a partir del algoritmo, variando el valor de la varianza del ruido de proceso (std\_Q), de mayor a menor. Para un valor de  $10 \cdot 10^{-4}$  (señal azul) se observa un rizado importante. El rizado disminuye a medida que se reduce el valor de std\_Q, pero un valor muy reducido como el que se ha utilizado en la señal amarilla ( $1.25 \cdot 10^{-4}$ ) implica que la señal presente un retardo y adquiera una deformación que puede significar pérdida de información. Para analizar más detalladamente este efecto, se ha acotado el rango de variación, como indica la figura 43.

- Variación de la diagonal principal de Q desde un valor  $5 \cdot 10^{-4}$  hasta  $3 \cdot 10^{-4}$  en 4 pasos:

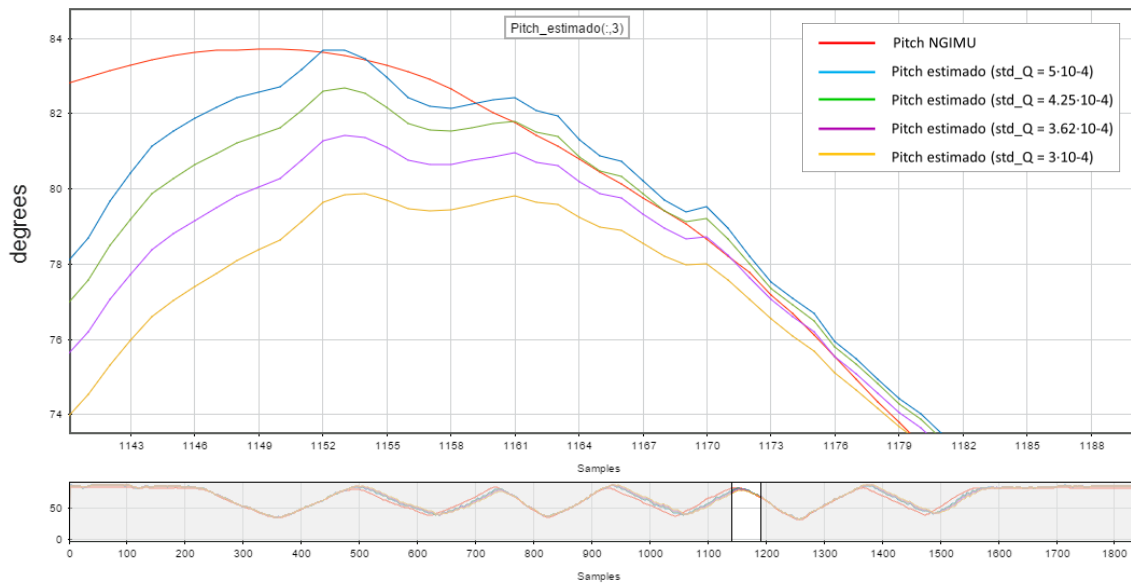


Figura 43: Análisis paramétrico del NGIMU para la obtención de Q (la gráfica inferior muestra el tramo de la señal analizado, y la superior, las señales del tramo ampliado en detalle)

La figura 43 muestra cómo disminuye el ruido en la señal estimada cuando se emplea un valor de std\_Q reducido, de  $3 \cdot 10^{-4}$  (señal amarilla), comparado con las señales estimadas con valores de std\_Q mayores. Sin embargo, al ser un valor reducido, el retardo y la distorsión de la señal aumenta, por lo que si se reduce aun más el valor de std\_Q, la estimación sería errónea, como muestra la figura 42.

Para el NGIMU se utilizará un valor de la varianza del ruido del proceso de  $3 \cdot 10^{-4}$ , con el que la señal de estimación se realiza con un ruido reducido y con un retardo permisible. Por lo tanto, los valores de las matrices R y Q del EKF utilizados para el NGIMU son los siguientes:

$$\text{Umbral} = 1 \text{ m/s}^2 ; Q = \begin{bmatrix} 0.0003^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0003^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0003^2 \end{bmatrix} ; R = \begin{bmatrix} 0.0029^2 & 0 \\ 0 & 0.0031^2 \end{bmatrix}$$

Con estos valores, se ha realizado una comparación de los ángulos de Euler que se obtienen del dispositivo y los estimados mediante el algoritmo. La prueba consiste en hacer giros de  $\pm 40$  grados en torno al eje Y, por lo que la única señal que debe variar es la del ángulo Pitch, manteniéndose el resto de señales constantes. Los resultados de la prueba se muestran en la figura 44.

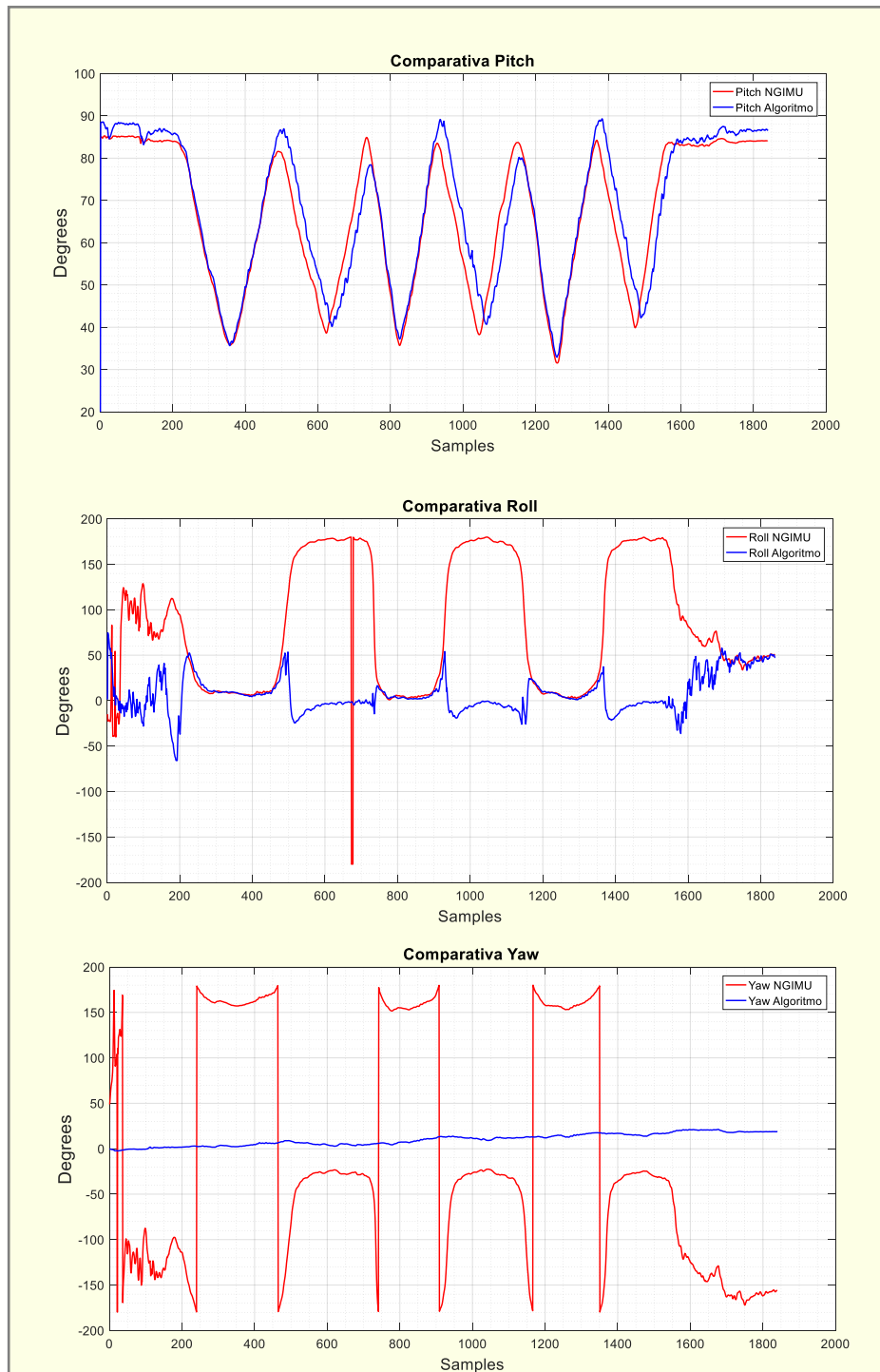


Figura 44: Comparación de los ángulos de Euler del NGIMU

La figura 44 evidencia que existen diferencias notables entre las señales obtenidas directamente del dispositivo y las estimadas por el algoritmo. La señal de detección de pasos (ángulo Pitch) obtenida directamente del dispositivo se muestra con poco ruido y con valores que se corresponden a lo esperado. La señal de detección de pasos generada por el algoritmo (Pitch algoritmo) muestra un ruido notable y una diferencia de amplitud con respecto a la anterior. No obstante, dicha señal sigue correctamente la forma de la obtenida con la NGIMU, y para una posible detección de pasos no habría errores significativos.

Las diferencias se muestran en las señales de balanceo y de orientación (Roll y Yaw). Ambas señales sufren saturaciones y muestran valores que no se corresponden con lo esperado cuando se obtienen directamente del dispositivo. Sin embargo, el algoritmo de estimación de orientación sí arroja resultados más acordes con lo esperado, ya que el Yaw se mantiene constante e igual a cero, y el Roll sufre menores variaciones que la del dispositivo, aunque debería mantenerse constante. Una señal de orientación (Yaw) errónea implica que se comentan errores en la estimación de la posición relativa, por lo que lo adecuado para las aplicaciones del TFG es emplear las señales obtenidas con la estimación de ángulos de Euler.

#### **Conclusión:**

Al igual que ocurre con el BNO055 USB Stick, no es posible reducir por completo el ruido de las señales estimadas solo calibrando los parámetros del EKF. La señal de detección de pasos que se obtiene directamente del dispositivo presenta bajo ruido, por lo que lo más probable es que se incluyan en la IMU bloques de filtrado de señal para reducir errores. Si se añadiese este tipo de filtrado al código de la estimación de ángulos de Euler se reducirían los errores, pero supondría un aumento de la densidad de código. Sin embargo, las señales de los ángulos Roll y Yaw sí presentan una mejor disposición cuando se emplea el algoritmo de estimación propuesto, y para una posible estimación de la posición relativa del objeto o persona que porta el dispositivo podría ser más ventajoso que si se empleasen las del propio dispositivo.

### 4.3.3 ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA DESVIACIÓN EN LA SEÑAL DE ORIENTACIÓN

La señal de orientación que se obtiene tanto de la estimación de los ángulos de Euler como del propio dispositivo presenta una desviación como consecuencia de los errores (bias) del giróscopo y, en menor medida, del acelerómetro [R. Chow 2011]. Al trabajar el algoritmo de posición relativa directamente con esta señal, el error se acumula y da lugar a una estimación errónea de la trayectoria. El efecto de la desviación es difícil de cuantificar, ya que depende de varios factores como la manera de andar, la posición donde se porta la IMU y la calidad de los sensores del dispositivo, entre otros. En esta sección se analiza cómo afecta el error de la desviación en función de estos factores.

Para ver cómo afecta el error de desviación en función de la posición donde se coloque el dispositivo, se ha realizado una prueba que consiste en recorrer el pasillo O22 portando dos IMUs del mismo modelo colocadas de forma distinta: en el frontal del tobillo (zona de la espinilla), y en el frontal del muslo. La figura 45 muestra los resultados de la prueba.

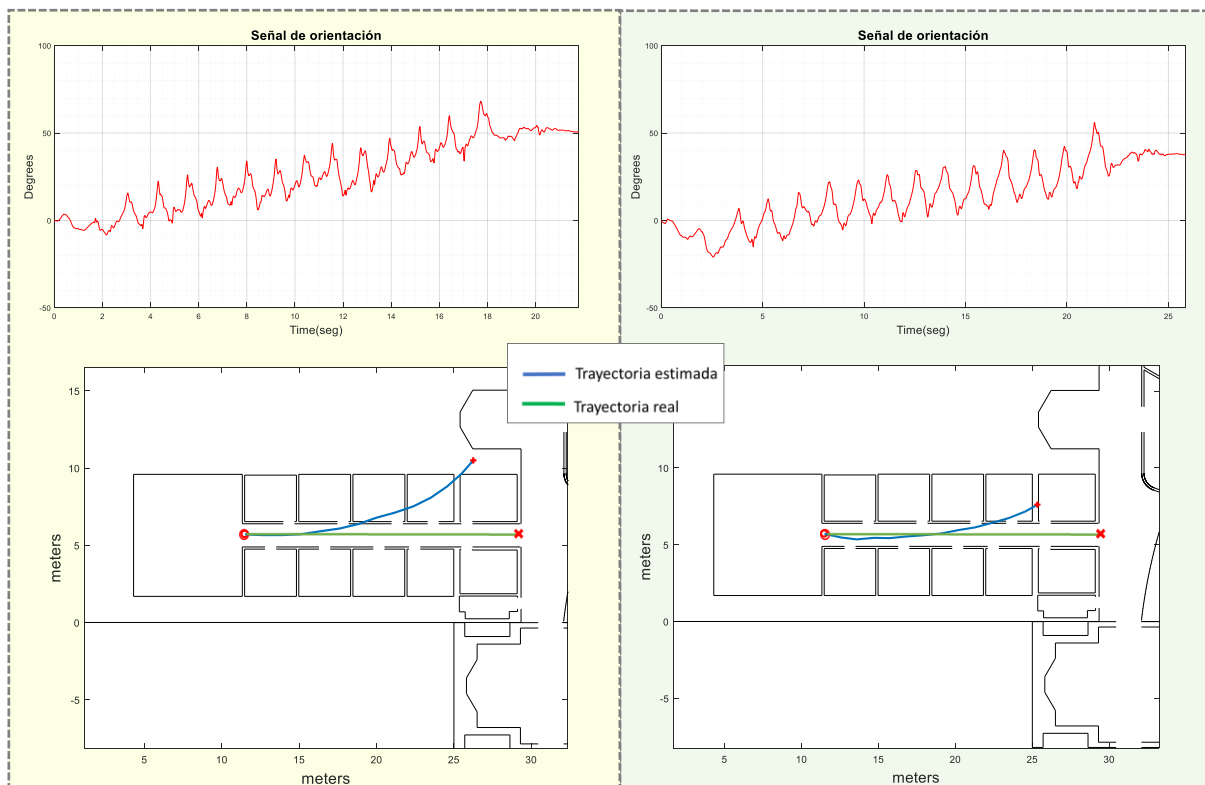


Figura 45: Pruebas del NGIMU, en el frontal del tobillo (izquierda), y en el frontal del muslo (derecha)

La figura 45 muestra que el error es más significativo en el caso de portar la IMU en el frontal del tobillo que en el muslo. Al recorrer de forma recta el pasillo, la señal de orientación debería mostrarse fija e igual a 0 grados, pero ambas gráficas muestran una acumulación de dicho error. En el caso de portar la IMU en el muslo, la desviación alcanza un valor inferior a 50 grados, y portando la IMU en la zona de la espinilla, esta desviación es mayor, superando los 50 grados. Esta diferencia se observa asimismo en la trayectoria estimada, donde el error de posición final de la gráfica de la izquierda (IMU en espinilla) es mayor que el de la derecha (IMU en muslo). Esto significa que existe una tendencia a aumentar el error de desviación cuando el dispositivo se posiciona en los lugares inferiores de la pierna.

El grado de desviación también varía dependiendo de la manera de andar de cada persona. Las pruebas siguientes se realizaron probando las IMUs en distintos voluntarios con la misma posición (frontal del muslo de la pierna derecha). Los resultados se muestran en la figura 46.

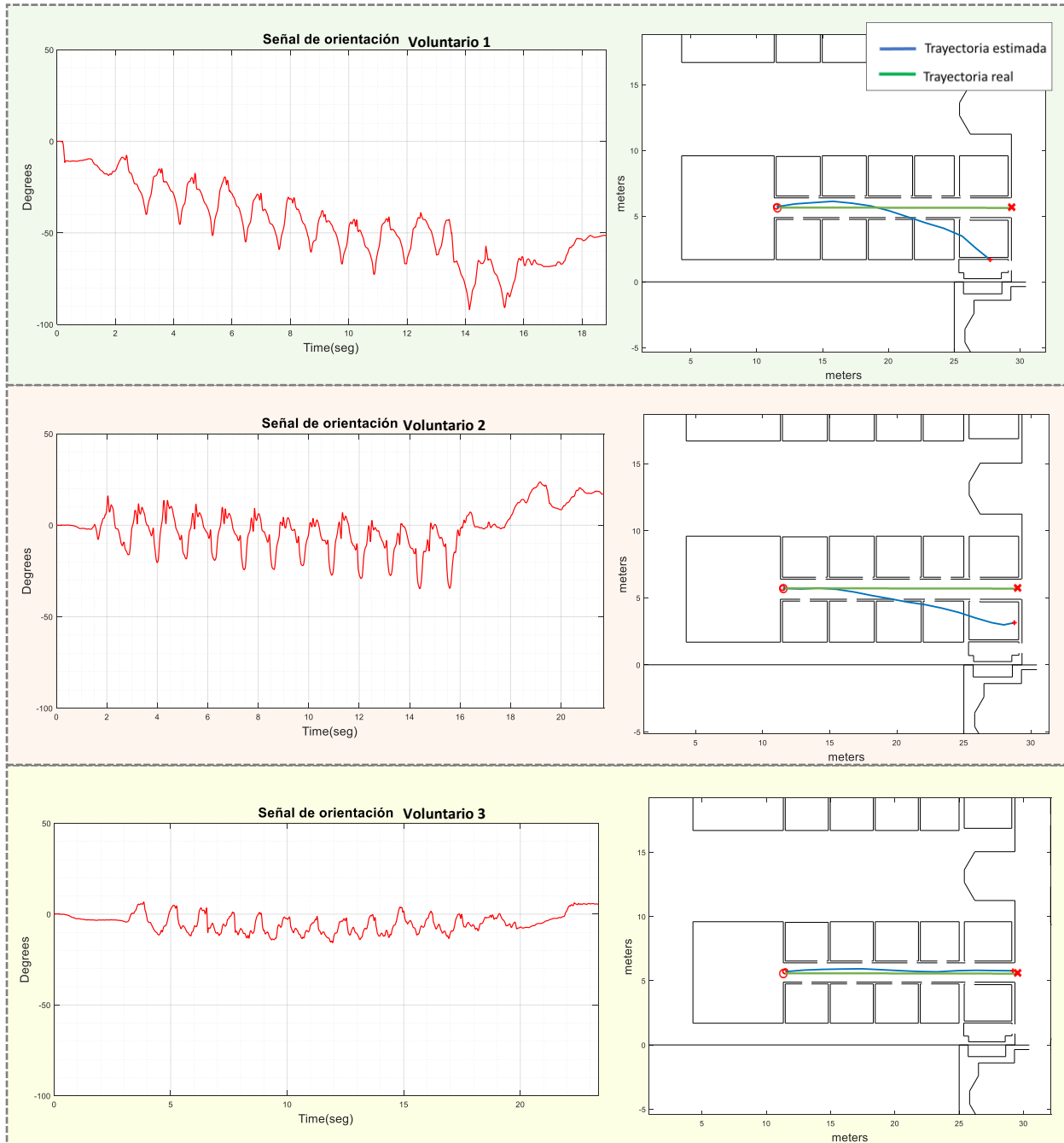


Figura 46: Análisis de la desviación en distintos voluntarios

La figura 46 muestra diferencias notables en los resultados de estimación de trayectoria y señal de orientación dependiendo del individuo que realiza la prueba. En el caso del voluntario 1, el grado de desviación es significativo, mientras que para los voluntarios 2 y 3, este error no se muestra tan crítico. Esto evidencia que el error de desviación es una característica difícil de cuantificar, ya que se muestra muy variable dependiendo, entre otros factores, de la persona que realiza la prueba y su manera de andar.

#### 4.3.4 MEJORA DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE EULER

La desviación (bias) de la señal de orientación (Yaw) en las IMUs es un error muy característico en este tipo de dispositivos, y es difícil de cuantificar y corregir ya que es muy variable dependiendo de varios factores como se ha comprobado en la sección anterior. El algoritmo utilizado en la etapa de corrección no se corrige la señal de orientación Yaw ya que a través de los ángulos de Euler no hay forma de extraer expresiones analíticas directas que relacionen los parámetros del acelerómetro y giróscopo como en los otros dos ángulos (Pitch y Roll).

En el desarrollo de este proyecto, se buscaron alternativas para reducir parcialmente los efectos de este error, llegando a una solución que reduce el error acumulativo en la señal de orientación y, como consecuencia, mejora la estimación de la trayectoria. La solución consiste en la utilización de una serie de ecuaciones desarrolladas por [L. Salinas 2015] para la etapa predictiva del giróscopo en la estimación de los ángulos de Euler. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\hat{x}_{\phi_k}^- = \hat{x}_{\phi_k} + \Delta t \cdot \left( \omega_{x_k} + \omega_{y_k} \cdot \sin(\hat{x}_{\phi_k}) \cdot \text{tg}(\hat{x}_{\theta_k}) + \omega_{z_k} \cdot \cos(\hat{x}_{\theta_k}) \cdot \text{tg}(\hat{x}_{\theta_k}) \right) \quad (4.4)$$

$$\hat{x}_{\theta_k}^- = \hat{x}_{\theta_k} + \Delta t \cdot \left( \omega_{y_k} \cdot \cos(\hat{x}_{\phi_k}) - \omega_{z_k} \cdot \sin(\hat{x}_{\phi_k}) \right) \quad (4.5)$$

$$\hat{x}_{\psi_k}^- = \hat{x}_{\psi_k} + \Delta t \cdot \left( \omega_{y_k} \cdot \sin(\hat{x}_{\phi_k}) / \cos(\hat{x}_{\theta_k}) + \omega_{z_k} \cdot \cos(\hat{x}_{\phi_k}) / \cos(\hat{x}_{\theta_k}) \right) \quad (4.6)$$

Donde la ecuación (4.4), (4.5) y (4.6) representan los vectores de estimación de los ángulos de Euler Roll ( $\Phi$ ), Pitch ( $\Psi$ ) y Yaw ( $\Psi$ ) a priori, respectivamente. La variables  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ , y  $\omega_z$  son los valores del giróscopo del eje x, y, y z, respectivamente, mientras que  $\Delta t$  es el incremento de tiempo entre muestras. El subíndice  $k$  indica la iteración actual.

En el algoritmo de estimación propuesto, la etapa predictiva consiste en una integración en el tiempo de los valores del giróscopo, como muestra la ecuación (4.7):

$$\hat{x}_k^- = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \omega_k dt \quad (4.7)$$

Con la utilización de las ecuaciones mejoradas en lugar de la ecuación (4.7), la etapa de predicción del EKF es más precisa, mejorando así la estimación de la orientación, y, por lo tanto, reduciendo el desvío en la señal de orientación (Yaw). Se realizaron una serie de pruebas para mostrar la mejora de los resultados con esta modificación.



En la figura 47 se muestra una comparativa de una misma prueba que consiste en recorrer el pasillo con el NGIMU portado en el frontal del tobillo. Se comparan los resultados empleando la estimación de ángulos de Euler utilizada en los casos anteriores y empleando la versión mejorada.

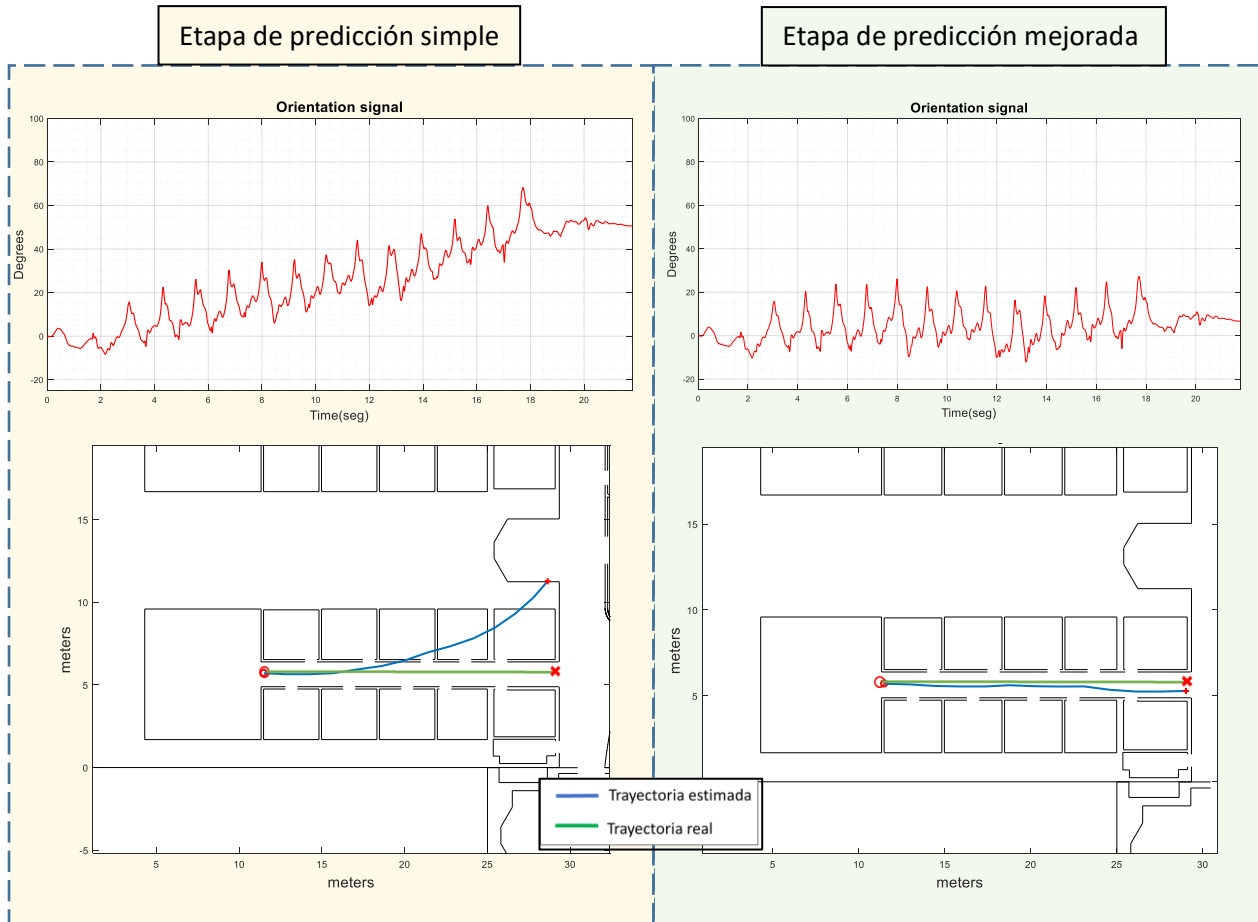


Figura 47: Comparativa entre la versión simple y la versión mejorada de la etapa del algoritmo de estimación de ángulos de Euler (IMU en el frontal del tobillo)

La figura 47 muestra que la reducción de la desviación es notable. El error acumulativo en el caso de utilizar la estimación habitual alcanza un valor de aproximadamente 50 grados, mientras que con la mejora, dicho error solo alcanza un valor inferior a los 10 grados.

A continuación, en la figura 48 se muestra otro ejemplo de la mejora obtenida con la nueva etapa de predicción del algoritmo de estimación de ángulos de Euler. En este caso el dispositivo es portado en el lateral del tobillo, donde el error de desviación tiende a ser mayor.

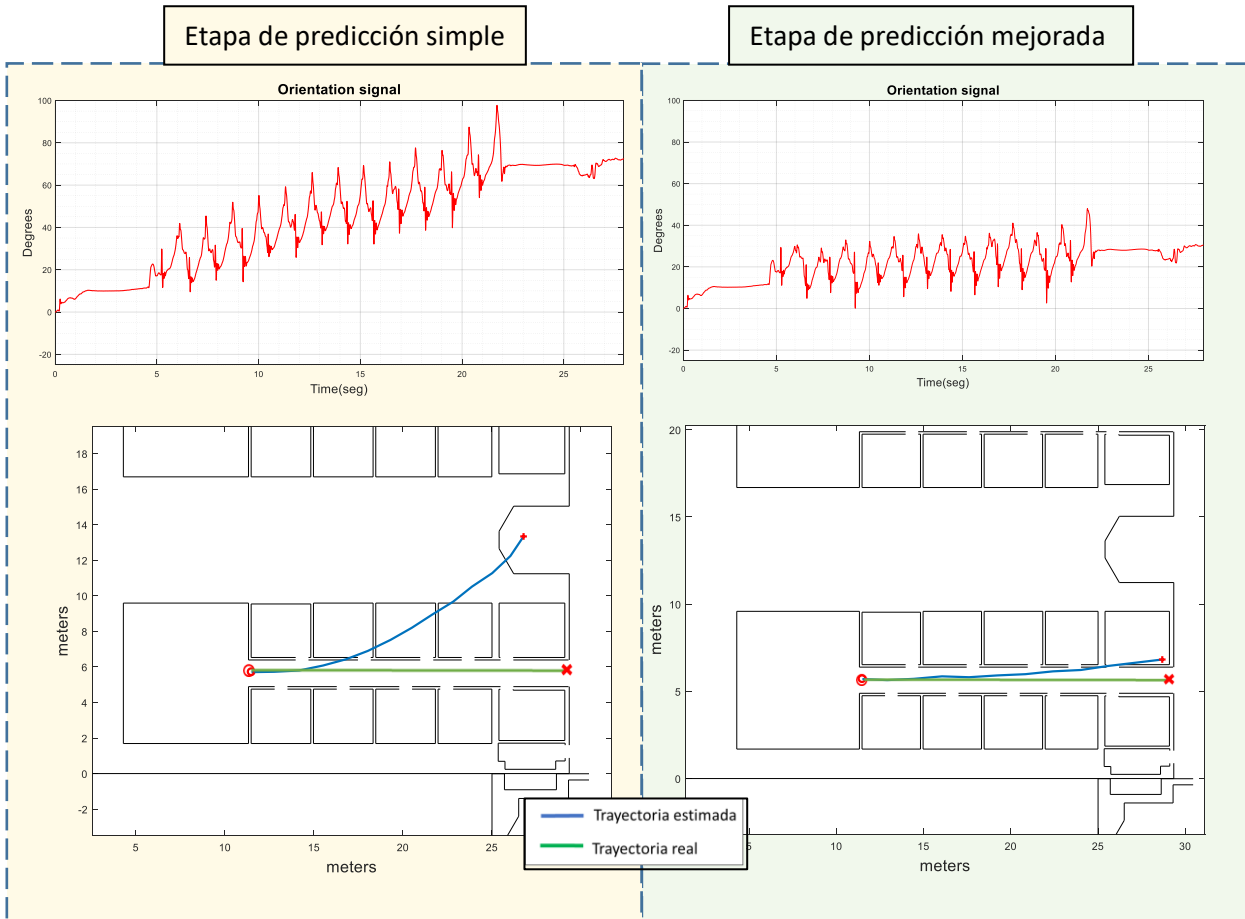


Figura 48: Comparativa entre la versión simple y la versión mejorada de la etapa del algoritmo de estimación de ángulos de Euler (IMU en el lateral del tobillo)

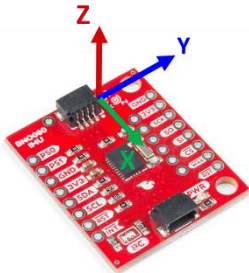
En este caso, la mejora es más significativa. El desvío que sufre la señal de orientación supera los 60 grados con la aproximación sencilla del algoritmo de partida, pero se reduce en más de 40 grados cuando se emplean las ecuaciones mejoradas.

Al ver que los resultados en las pruebas realizadas mejoran notablemente con la nueva etapa de predicción, en las siguientes secciones del TFG se empleará dicha etapa para la estimación de ángulos de Euler. Las ecuaciones están incluidas en la función de Matlab mostrada en el la sección Planos.

## 4.4 CARACTERIZACIÓN DEL BNO080

En las secciones siguientes se describen los procesos de caracterización del sensor BNO080.

### 4.4.1 VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS



El propio dispositivo muestra la disposición de sus ejes de coordenadas como indica la figura 49. Para comprobarlo, se ha realizado una prueba donde la IMU se gira 90 grados en torno al eje Y desde una posición horizontal, para luego volver a la posición horizontal, y luego repetir el proceso con el giro de 90 grados en torno al eje X.

Figura 49: Sistema de coordenadas del BNO080

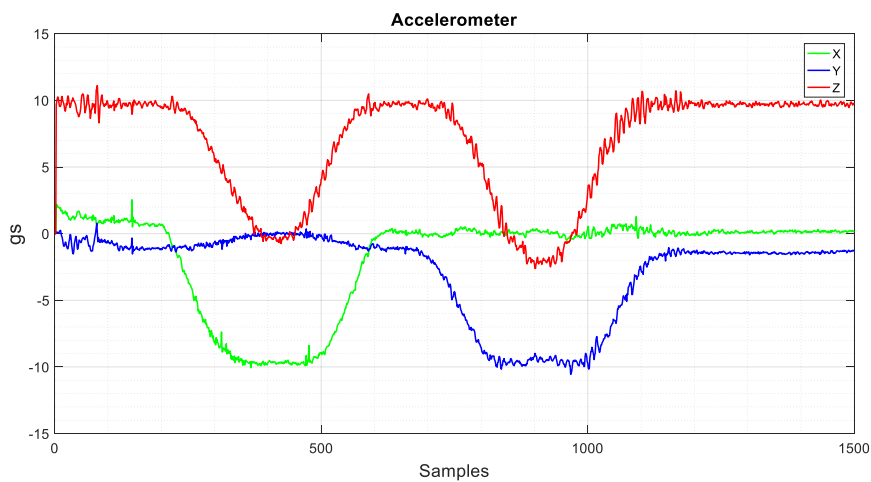


Figura 50: Datos del acelerómetro del BNO080

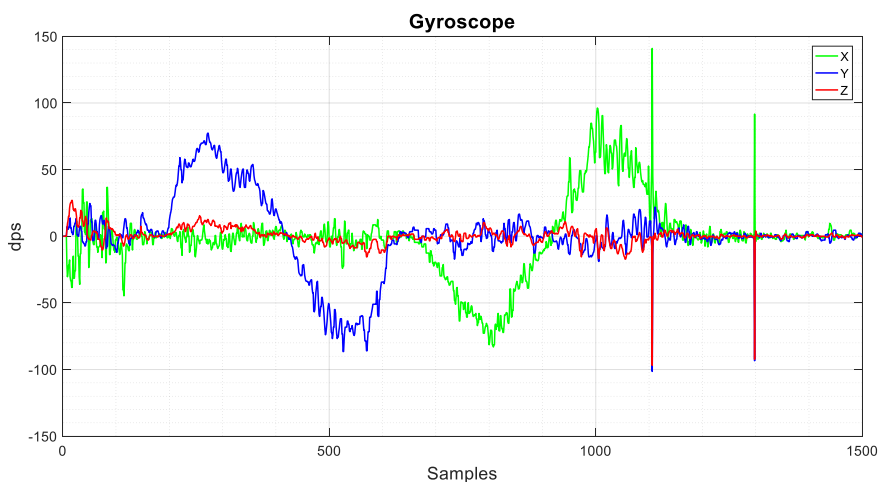


Figura 51: Datos del giróscopo del BNO080

Los valores de las figuras 50 y 51 demuestran que el sistema de coordenadas se corresponde con el de la figura 49. El acelerómetro mide  $9,8 \text{ m/s}^2$  en su eje correspondiente cuando éste tiene dirección ascendente, y  $-9.8 \text{ m/s}^2$  cuando es descendente.

El BNO080 no proporciona los ángulos de Euler de manera directa como hacen el NGIMU y el BNO055 USB Stick. La información de la orientación se proporciona en cuaterniones, por lo que es necesario un procesamiento de la señal recibida para realizar el cambio a ángulos de Euler. Se ha realizado una prueba que consiste en girar 90 grados el dispositivo en torno al eje X, eje Y, y eje Z, que se muestra en la figura 52.

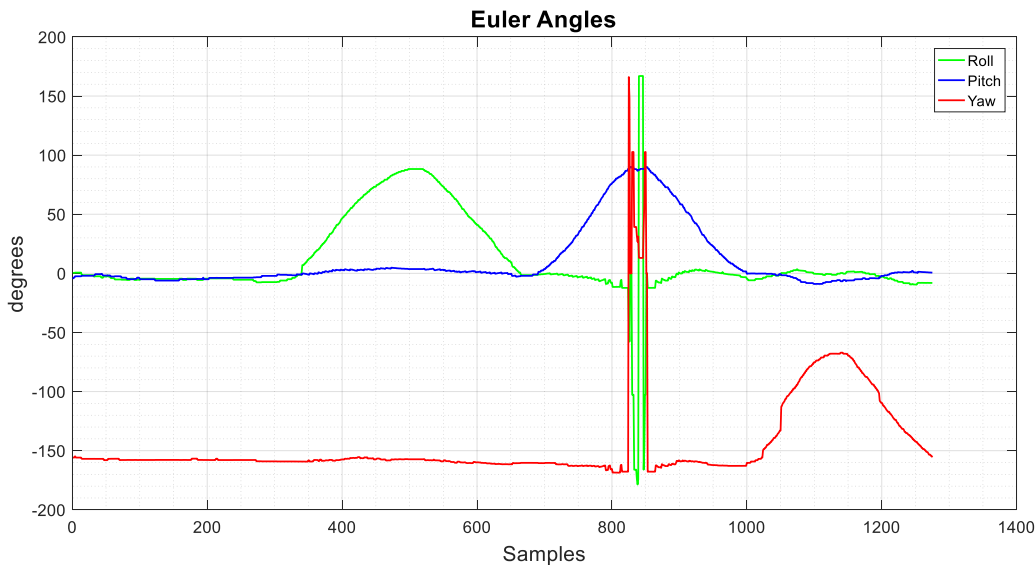


Figura 52: Ángulos de Euler del BNO080

Con la configuración utilizada para realizar la prueba de la figura 52 (configuración ENU), los ángulos de Euler se corresponden con lo esperado. Sin embargo la calidad de las señales que ofrece el BNO080 es más baja con respecto a los otros dispositivos al no proporcionar de manera directa los ángulos de Euler y tener que realizar un cambio de representación de orientación. Además, este sensor no dispone de un bloque adicional de filtrado de la señal como probablemente sí incluya el NGIMU, por ejemplo.

#### 4.4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE ÁNGULOS DE EULER

El proceso de adaptación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler para el BNO080 se centra en resolver el problema de la frecuencia de muestreo de los sensores. El algoritmo requiere de una sincronización precisa entre los valores del acelerómetro y los del giróscopo, y en los casos en los que existe un retardo entre ambos, el algoritmo proporciona resultados erróneos. Al tratarse de una IMU en formato chip, su caracterización en este proyecto se ha realizado con la ayuda de un microcontrolador (Arduino Uno). El sistema de evaluación de la IMU se basa en códigos de programación del Arduino Uno que permiten activar las funciones de la IMU, y esto implicaba imprecisiones, y como consecuencia, un tiempo de muestreo irregular que impedía implementar correctamente el algoritmo. Los valores de los parámetros del EKF que se han utilizado para este sensor son los mismos que los empleados en el BNO055, por lo que no hubo proceso de ajuste del EKF en este caso.

**Análisis de la frecuencia de muestreo de los sensores:**

Para comprobar que la frecuencia de muestreo con la que se configura la salida de datos de los sensores es la correcta se ha analizado la frecuencia de la señal de la línea de interrupción del BNO080, la cual se habilita cuando el sensor tiene un dato disponible. Para ello se habilitó una salida de datos del sensor (vector de rotación) y se utilizó el software 'PulseView'. Las figuras siguientes muestran capturas del software probando distintas frecuencias de salida de datos:

- Frecuencia de salida de datos configurada a 100 Hz ( $T_s = 10\text{ ms}$ ) y a 50 Hz ( $T_s = 20\text{ ms}$ ):

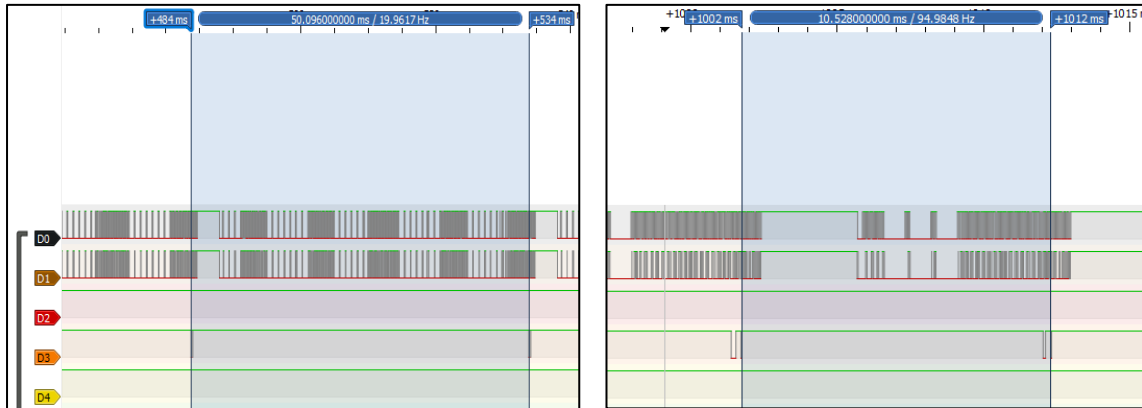


Figura 53: Frecuencia de muestreo de los sensores del BNO080 a 100 Hz (izqda.) y a 50 Hz (dcha.)

La figura 53 se corresponde a las distintas configuraciones de la frecuencia de salida de datos del sensor. Se ha comprobado que aunque existe un error poco significativo para las aplicaciones que se desarrollarán, el tiempo de muestreo fijado se corresponde con el tiempo de muestreo de la señal mostrada. El error es constante y no depende de si la frecuencia de muestreo es de menor o mayor valor.

Para corroborar que la frecuencia de muestreo es la correcta, se ha realizado un programa para Arduino que habilita un pin como salida a nivel alto cuando el sensor BNO080 dispone de datos, y a nivel bajo cuando termina de enviar dichos datos por el puerto serie. Las figuras muestran capturas de la señal de dicho pin con un osciloscopio para una configuración de salida de datos de 10 ms:

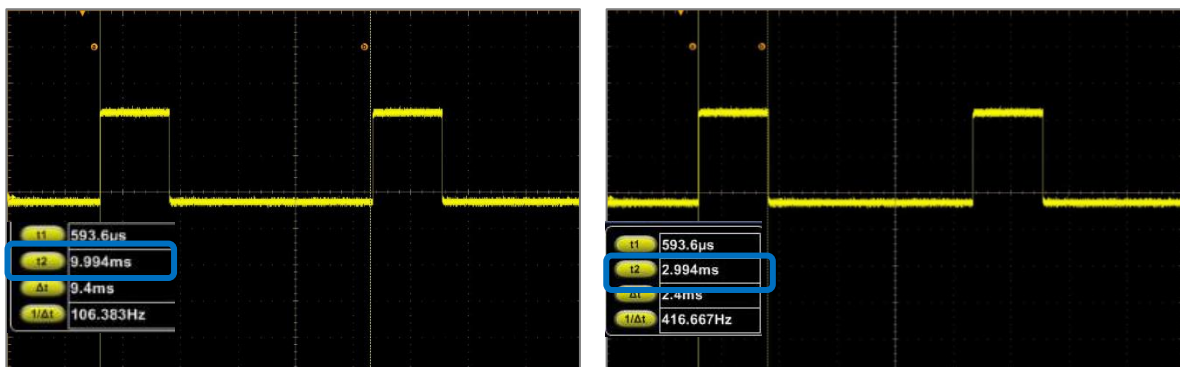


Figura 54: Verificación de la frecuencia de muestreo del BNO080

En la figura 54, la gráfica izquierda indica que la frecuencia de muestreo es próxima a 100 Hz (10 ms) con un error reducido, tal y como ocurre con la señal de la línea de interrupción. En la gráfica derecha, se observa que el tiempo empleado para la captura y envío de datos es de 3 ms

El análisis anterior concluye que la frecuencia de muestreo del BNO080 no es una limitación para valores como 100 Hz con los que suelen trabajar los sensores de este tipo. El sistema de transmisión de datos del sensor al microprocesador, y del microprocesador al PC, en cambio puede ser el causante de los retardos que producen la no sincronización entre el giróscopo y acelerómetro. El problema recae en cómo obtener el instante en el que se toman las muestras del sensor. Al igual que ocurre con el 'time sampling' del BNO055, dicho tiempo tiene valores que se repiten o que no se muestran constantes, y eso impide que la implementación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler sea correcta.

Para comprobar lo anterior se desarrolló un código en Arduino que habilita un 'timer' que ejecuta una interrupción cada ms, donde se incrementa un contador, para después acceder a dicha variable y transmitirla por el puerto serie al Matlab. El valor representado se muestra en la figura 55.

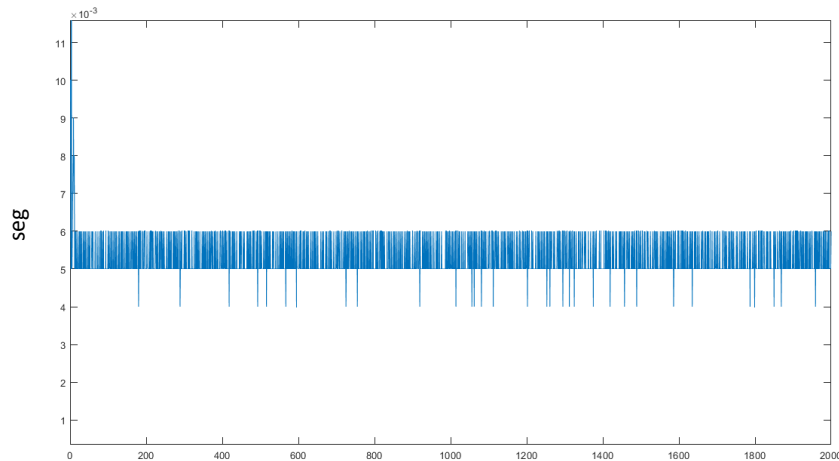


Figura 55: Análisis del tiempo de muestreo del BNO080

Se puede observar que la señal recibida es constante con valores alternados entre 5 y 6 ms, con instantes de 4 ms. Esto no se corresponde con los 10 ms que se habían fijado en la prueba para la salida de datos del sensor, lo cual puede significar que la salida de datos del giróscopo y del acelerómetro no está sincronizada, es decir, que al habilitar primero el acelerómetro y luego el giróscopo, existe un retardo que provoca esta desincronización entre los sensores. Este quizás sea el motivo por el cual no sea 10 ms el tiempo de muestreo. Esto no se corresponde con la figura 53 y 54, donde se comprobó que si se correspondían con los 10 ms (100 Hz) con los que se configuraban los sensores, pero solo se habilitó la salida de datos del vector de rotación, y no dos habilitaciones como es este caso.

Con el código de leer datos del acelerómetro y giróscopo, se realizó la misma prueba que en el anterior ejemplo. La señal del pin fue la que muestra la figura 56.

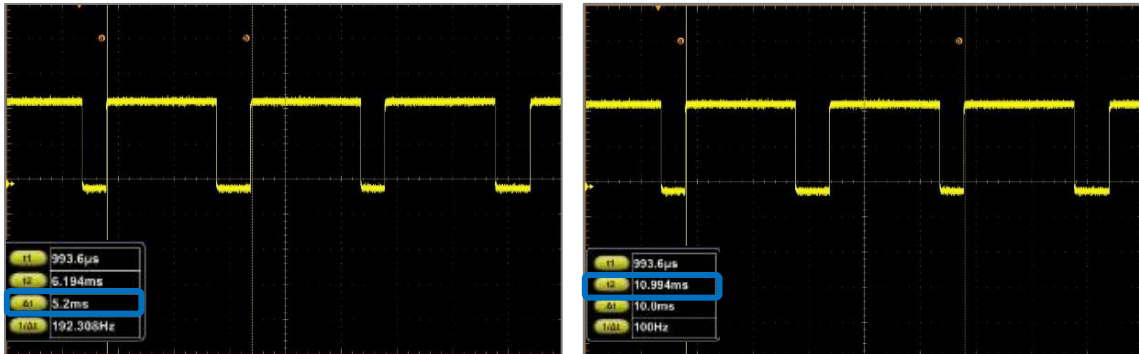


Figura 56: Análisis 2 de la frecuencia de muestreo del BNO080

Como se puede ver, la lectura de datos se realiza al doble de frecuencia (200 Hz, 5 ms) que la fijada por los sensores en el código, por lo que esto evidencia que no están sincronizados el acelerómetro y el giróscopo.

La conclusión que se puede extraer de lo mencionado anteriormente es que se produce un retardo entre la habilitación del acelerómetro y la del giróscopo que provoca una desincronización de ambos sensores. Al no habilitarse en un mismo instante, los datos que proporciona el acelerómetro no se corresponden con los que proporciona el giróscopo en ese mismo instante, y este puede ser el motivo por el que el algoritmo de estimación de los ángulos de Euler no funcione correctamente.

Para conseguir que este retardo fuese el menor posible y que la sincronización entre los dos sensores fuese lo más precisa posible, se modificó el código del microprocesador para configurar la salida de datos de los sensores a 1 kHz ( $T_s = 1\text{ms}$ ), y tener un control sobre la frecuencia de muestreo (ver código y conexiones en la sección Planos). La figura siguiente muestra un esquema del sistema de evaluación del BNO080 en este TFG.

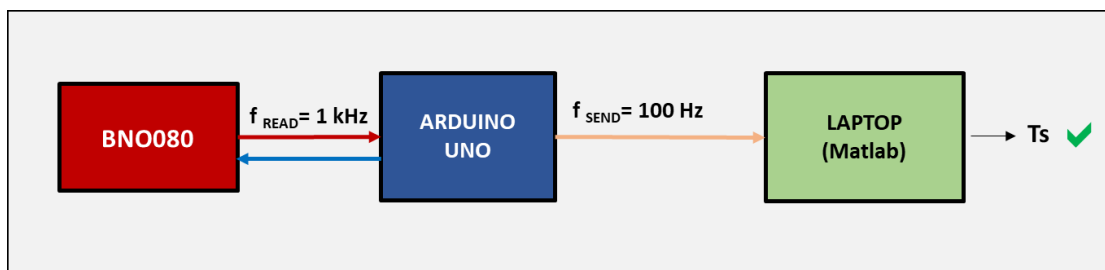


Figura 57: Sistema de evaluación del BNO080

Con este sistema de evaluación se ha comprobado que la frecuencia de muestreo de los sensores es la adecuada para que se pueda implementar de manera correcta el algoritmo de estimación de ángulos de Euler mejorado.

#### 4.4.3 COMPARATIVA DE RESULTADOS EMPLEANDO DISTINTOS MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE DATOS

El BNO080, como ya se ha mencionado antes, permite obtener directamente la representación de la orientación en formato cuaterniones, al incorporar un microprocesador que realiza la fusión de datos. Además, a diferencia del resto de IMUs analizadas, la fusión sensorial incluye una capa de alto nivel que, entre otros, permite registrar el número de pasos que se dan en una prueba. Al disponer de todas estas posibilidades, para la caracterización de este dispositivo se han analizado los distintos métodos de obtención de datos que el BNO080 ofrece para ser empleados en el algoritmo de posicionamiento. Para ello, se realizaron una serie de pruebas utilizando el algoritmo de posicionamiento, y evaluando los errores obtenidos con cada una de estas posibilidades.

Para estas pruebas, la IMU es portada en la zona del empeine del pie izquierdo, con la orientación ENU para que la representación de la orientación sea correcta en el caso de utilizar los que proporciona el propio dispositivo, y así realizar a comparativa correctamente.

En esta primera prueba se recorre el pasillo O22 de la EPS y se realiza un giro de 90 grados hacia la izquierda, hacia el inicio del pasillo donde está el laboratorio de pesados en dicho planta. Se han analizado los resultados en la señal de detección de pasos (ángulo Pitch), la señal de orientación (Yaw) y la trayectoria estimada. Los resultados se muestran en la figura 57 y en la tabla 8.



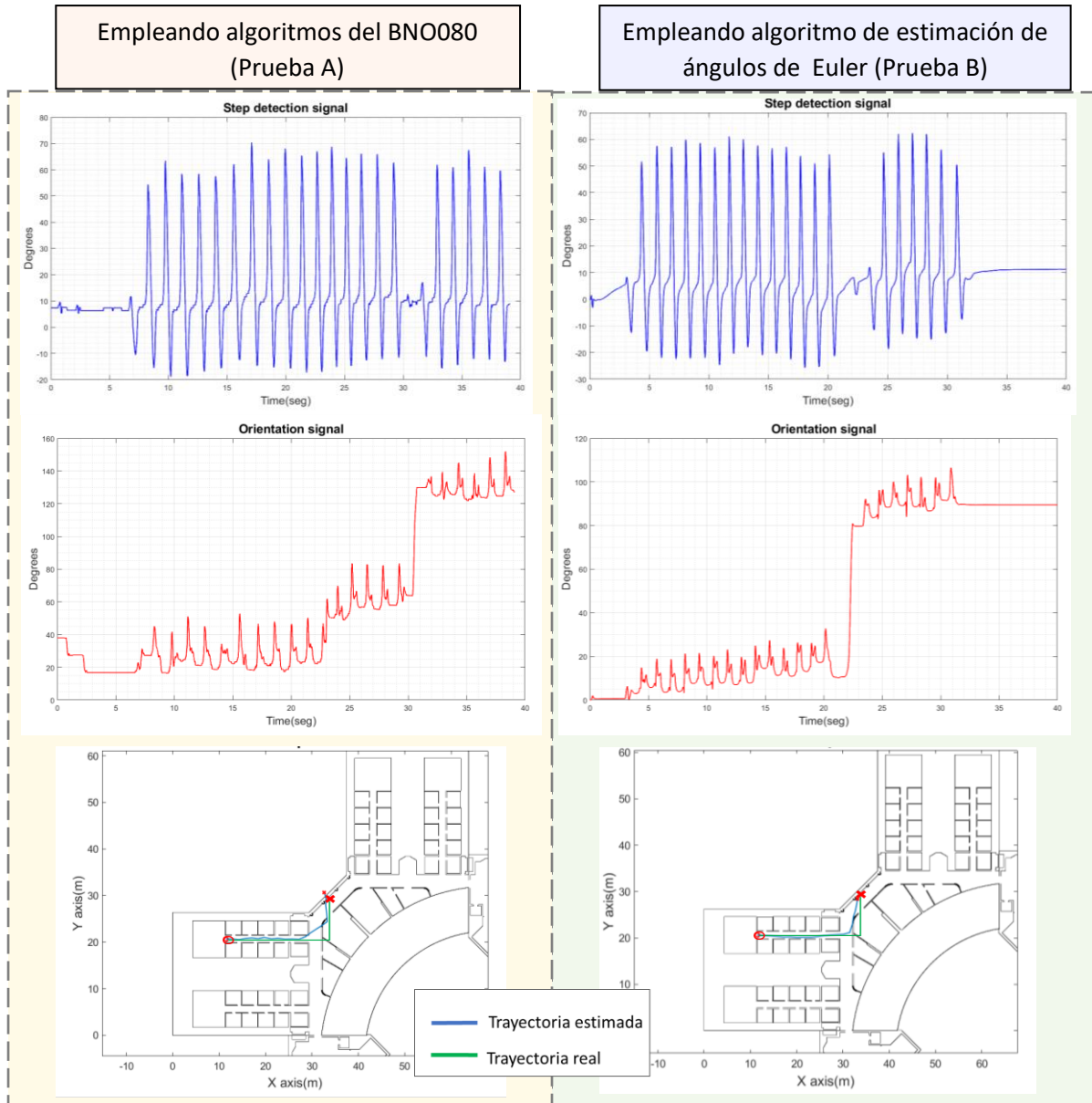


Figura 58: Prueba comparativa del BNO080. La grafica izqda. son los resultados de la prueba A y la gráfica de la dcha. los de la prueba B.

	Pasos dados	Pasos estimados (algoritmo)	Pasos estimados (IMU)	Error en pasos (algoritmo)	Error en pasos (IMU)
Prueba A	22	21	15	1	6
Prueba B	22	20	-	2	-

Tabla 8: Resultados de la prueba comparativa 1 del BNO080

Los datos obtenidos en la prueba anterior demuestran que la detección de pasos realizada por el propio dispositivo es imprecisa y presenta un error de 6 pasos. La estimación de la trayectoria en ambos casos obtiene resultados similares, pero empleando el algoritmo de estimación mejorado, el giro de 90 grados se muestra más claro.

Se realizó otra prueba que consiste en recorrer el pasillo O22 desde el fondo, y realizar un giro de 90 grados a la derecha, en dirección a la zona común que une las alas Oeste y Sur de la segunda planta. Los resultados se muestran en la figura 59 y en la tabla 9.

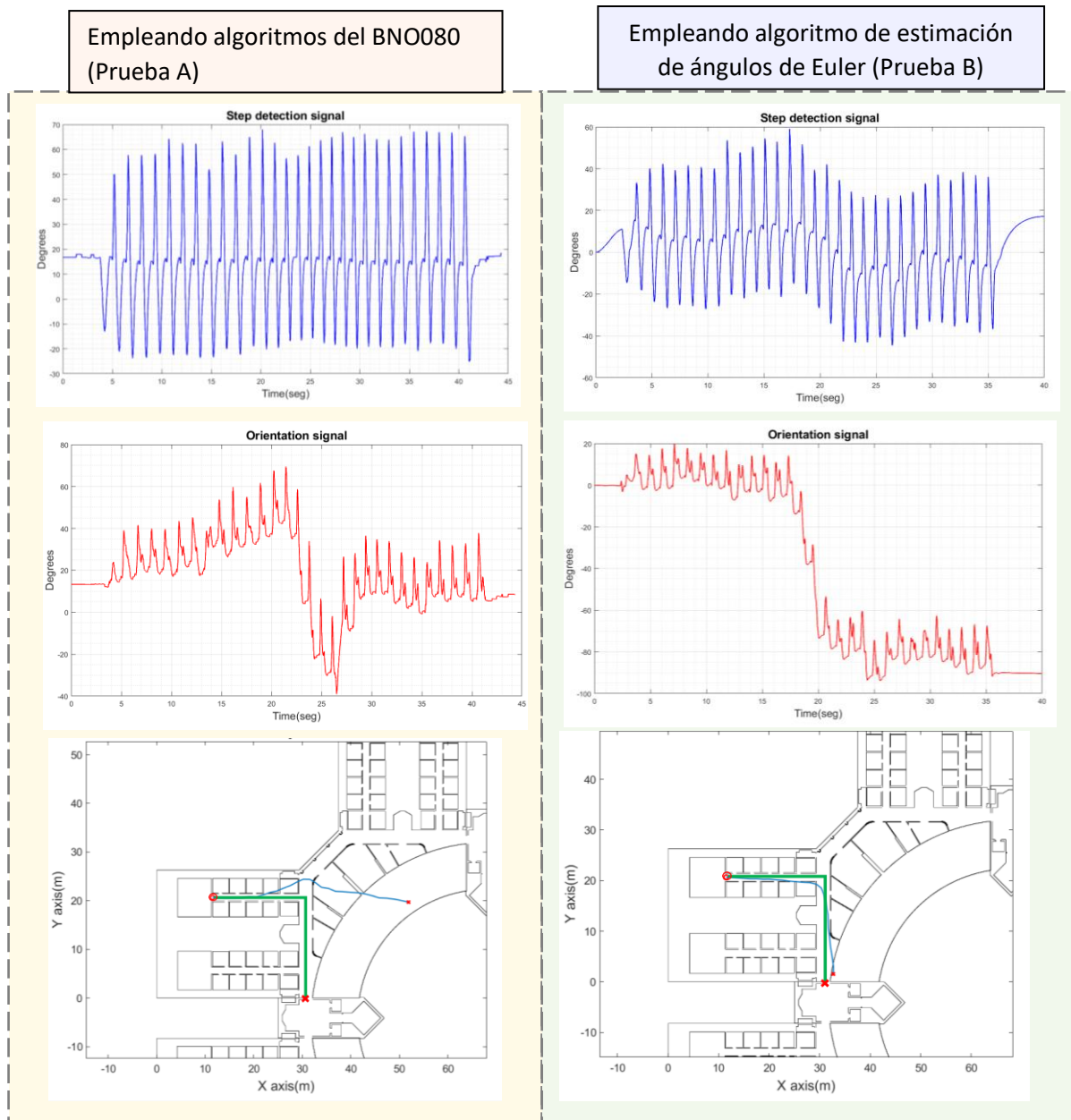


Figura 59: Prueba comparativa 2 del BNO080. La grafica izqda. son los resultados de la prueba A y la gráfica de la dcha. los de la prueba B

	Pasos dados	Pasos estimados (algoritmo)	Pasos estimados (IMU)	Error en pasos (algoritmo)	Error en pasos (IMU)
Prueba A	30	28	49	2	19
Prueba B	30	28	-	2	-

Tabla 9: Resultados de la prueba comparativa 2 del BNO080

Los datos obtenidos en esta prueba confirman que la detección de pasos realizada por el propio dispositivo presenta errores considerables comparado con los resultados que se obtienen utilizando el algoritmo de posicionamiento propuesto. El error en pasos que proporciona el BNO080 en esta prueba es alto (19 pasos, 63.3%), mientras que el obtenido con el algoritmo propuesto es de 2 pasos (6.67%). En la figura 59 se observa además que la estimación de la trayectoria es notablemente más próxima a la real en el caso de emplear el algoritmo de estimación de ángulos de Euler, ya que, empleando los cuaterniones proporcionados por el dispositivo, la trayectoria estimada se muestra errónea.

Analizando el conjunto de resultados de las pruebas anteriores se puede afirmar que para aplicaciones donde se emplee el BNO080 para la detección de pasos y la estimación de la trayectoria, el método que presenta menos errores y más precisión es el que emplea los algoritmos de estimación de ángulos de Euler para generar las señales de detección de pasos y de orientación. De esta forma, el error en pasos y la trayectoria estimada será menor que si se utiliza la detección de pasos del propio BNO080 y su representación de la orientación en cuaterniones, y su posterior conversión a ángulos de Euler.

Para las siguientes secciones del capítulo, la representación de la orientación que realiza el propio dispositivo y su detección de pasos no es empleada en ninguna prueba.

## 4.5 EVALUACIÓN DE ERRORES DEL ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO

Una vez que se han caracterizado las IMUs, y se han presentado una serie de mejoras para reducir errores e imprecisiones en la obtención de los ángulos de Euler, es necesario analizar el funcionamiento de las IMUs en aplicaciones que tienen como objetivo estudiar la actividad física. Para ello, se han realizado pruebas específicas con el suficiente número de repeticiones que permitan obtener errores y extraer conclusiones.

Para este apartado se ha desarrollado un código en Matlab que procesa los datos de las IMUs de las pruebas realizadas, y obtiene el error medio de los pasos (ciclo de marcha), de la distancia recorrida, y del error de posición, así como las desviaciones estándar de los errores. Muestra además las distintas trayectorias estimadas por el algoritmo de posición relativa. Se han utilizado los cuatro sensores seleccionados en el capítulo 3: NGIMU, BNO055 USB Stick, BNO080 y SHIMMER3.

### Sobre las pruebas

Las pruebas específicas se basan en recorrer en línea recta el pasillo O22 de la EPS desde la puerta del laboratorio hasta el inicio del pasillo, portando las IMUs en las zonas del pie y el tobillo de la pierna izquierda, como muestra la figura 60.

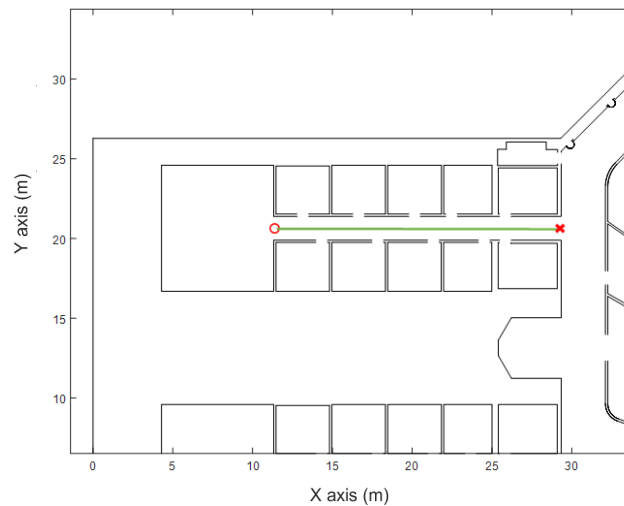


Figura 60: 'Ground truth' de las pruebas de evaluación de errores

El número de pasos dados en todas las pruebas es de 14 pasos y la distancia son 17.5 metros. Cada prueba ha tenido 20 repeticiones. Los errores medios que se evaluarán en esta sección son los siguientes:

- Error en pasos (nº pasos): diferencia en pasos entre el número de pasos estimados y el número de pasos real.
- Error de distancia (m): diferencia entre la distancia recorrida real y la estimada
- Error de posición (m): distancia entre el punto final de la trayectoria real y el de la trayectoria estimada

Se ha calibrado el valor del parámetro  $bh$  del algoritmo de anchura de paso para optimizar la distancia recorrida y reducir el error de distancia.

Los resultados de las trayectorias estimadas se muestran en las figuras 61, 62, 63 y 64.

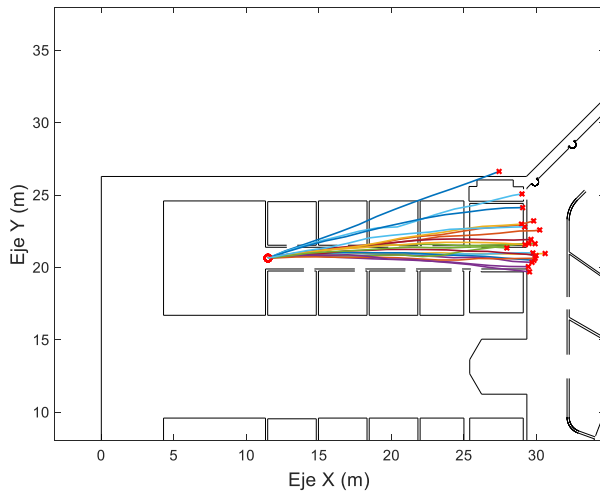


Figura 61: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del NGIMU

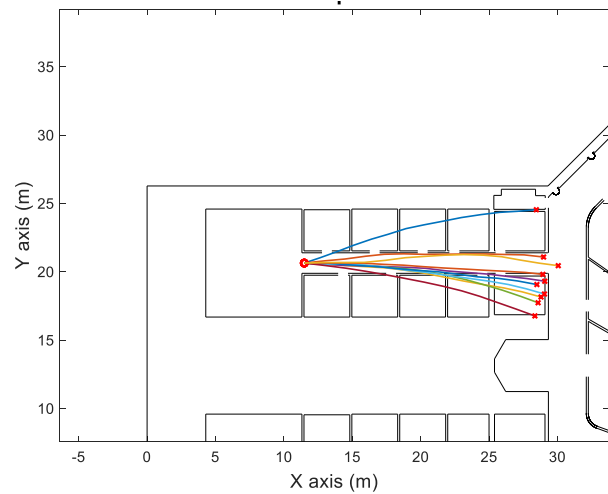


Figura 62: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del BNO080

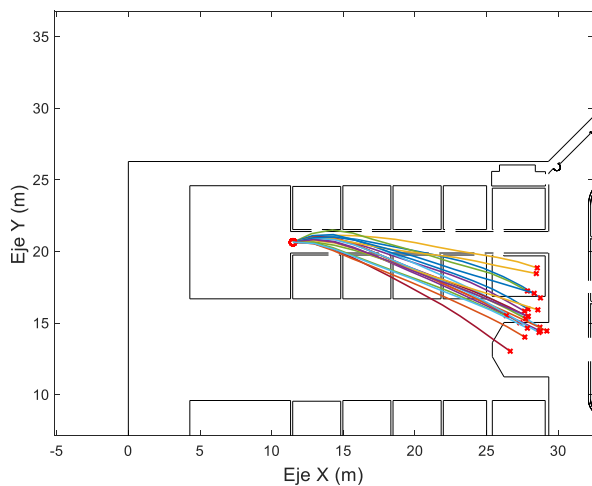


Figura 64: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del BNO055 USB Stick

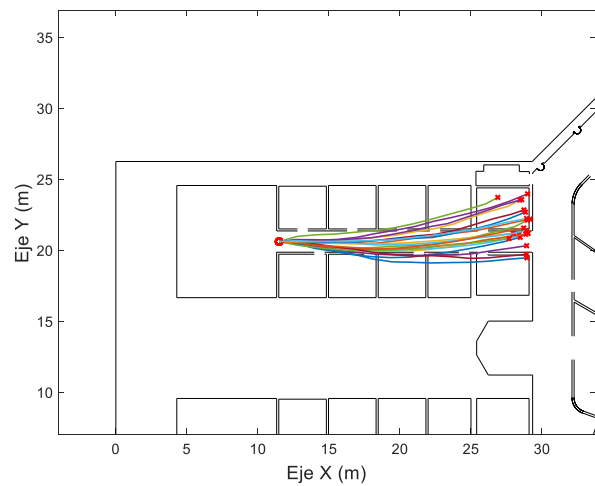


Figura 63: Trayectorias obtenidas en las pruebas de evaluación de errores del SHIMMER3

Las figuras anteriores indican que aunque se haya mejorado la etapa de predicción del algoritmo de estimación de ángulos de Euler, la desviación de la señal de orientación sigue teniendo un efecto sobre la estimación de la trayectoria.

Las trayectorias que presentan una desviación menor son las obtenidas con el NGIMU (figura 61), mientras que las que estiman con el BNO080 acumulan un error más significativo y presentan una aleatoriedad superior. El caso más desfavorable es el que muestra la figura 63, donde las trayectorias estimadas por el BNO055 USB Stick, empleando los ángulos de Euler del dispositivo, presentan un notable error de desviación. En el caso de utilizar el SHIMMER3 (figura 64), las trayectorias muestran una desviación superior a las obtenidas con el NGIMU, pero la aleatoriedad de dichas trayectorias es visiblemente inferior a las de las otras IMUs.

En la tabla siguiente se muestran los errores absolutos de forma cuantitativa.

		BNO055 USB STICK	NGIMU	BNO080	SHIMMER3
Posición IMU		ENU	Frontal	ENU	Frontal
Ángulos de Euler		IMU	Estimados	Estimados	Estimados
ERRORES	Pasos (nº pasos)	1.9	0.5	1.8	1.15
	Distancia (m)	0.5	0.755	0.2247	0.326
	Posición (m)	5.22	1.755	2.12	1.7
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	Pasos (nº pasos)	0.447	0.607	0.422	0.366
	Distancia (m)	0.537	0.362	0.351	0.455
	Posición (m)	1.488	1.513	1.267	0.985

Tabla 10: Resultados de las pruebas de evaluación de errores

Analizando los resultados de la tabla 10 se puede afirmar que la detección de pasos se realiza correctamente en la totalidad de las IMUs evaluadas. El error más alto en pasos se comete con el BNO055 USB Stick, el cual es de 1.9 pasos (13.57%), y el más bajo se obtiene con el NGIMU (0.5 pasos, 3.57%). Estos valores de error no suponen limitaciones para las aplicaciones donde las IMUs se emplean para estudiar la actividad física, ya que se han realizado pruebas durante el proyecto donde se observa que este error no es proporcional al número de pasos dados, si no que a medida que se da un mayor número de pasos, el error relativo disminuye. Estos resultados también confirman que las señales de detección de pasos que se obtienen con las IMUs portadas en la zona del tobillo, con o sin estimación, son de calidad suficiente para realizar correctamente la detección de pasos.

Los errores de distancia que se cometen adquieren valores bajos en todos los casos. Esto se debe a que se ha buscado el valor óptimo del parámetro  $bh$  de la ecuación de anchura de paso de [E. Muñoz 2016] para cada IMU, por lo que se trata de un error “ideal”. En el capítulo siguiente se analizan pruebas donde el valor de  $bh$  no está optimizado, lo cual implica errores muy significativos en la estimación de la distancia recorrida.

El error de posición es el que se muestra más variable dependiendo de la IMU utilizada. Las IMUs en formato chip como el BNO055 USB Stick y el BNO080 son las que presentan una aleatoriedad más notable en las trayectorias, y esto se traduce a un error de posición superior al que se obtiene con el resto de las IMUs. El BNO055 USB Stick es el más impreciso, con un error de posición de 5.22 m, y en el caso del BNO080 es más reducido, de 2.12 m. En el caso de las IMUs encapsuladas, la aleatoriedad es menor, por lo que dicho error es también inferior.

## CAPÍTULO 5: VALIDACIÓN DE LAS PRESTACIONES DE LAS IMUs

---





Para el desarrollo del capítulo anterior se evaluaron los resultados de los dispositivos utilizando posiciones centradas en la zona de la pierna, y realizando trayectorias simples y de corta duración, pero no se incluye un análisis de cómo se comportan los algoritmos de estimación en otras posibles zonas del cuerpo donde portar los dispositivos. Este capítulo, pues, tiene como objetivo validar las características de las IMUs **NGIMU** y **BNO080** analizadas en el capítulo 4 para distintas posiciones del cuerpo y para trayectorias más largas. Para ello, el capítulo se ha dividido en tres secciones, las cuales se centran en realizar una serie de pruebas de optimización, en efectuar posteriormente un conjunto de pruebas para evaluar resultados, y por último, en realizar un análisis comparativo de los resultados mediante tablas y figuras. En todos los casos las pruebas son realizadas por el autor del TFG.

## 5.1 PRUEBAS DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo de estas pruebas es realizar una optimización previa a las pruebas de verificación de prestaciones de las IMUs. Su función es obtener el valor de los parámetros de entrada del algoritmo de posicionamiento para que las pruebas siguientes tengan unos resultados que permitan realizar comparativas de manera correcta.

Las pruebas se basan en realizar una trayectoria que se define previamente portando los dispositivos NGIMU y BNO080 en distintas posiciones del cuerpo (tobillo izquierdo y muñeca izquierda, y pecho). Dicha optimización se basa en comparar con el ‘ground truth’ los valores obtenidos del algoritmo de posicionamiento tras las pruebas y variar los parámetros de entrada para reducir en la medida de lo posible los errores cometidos. La figura 65 muestra un diagrama de cómo se realiza la optimización.

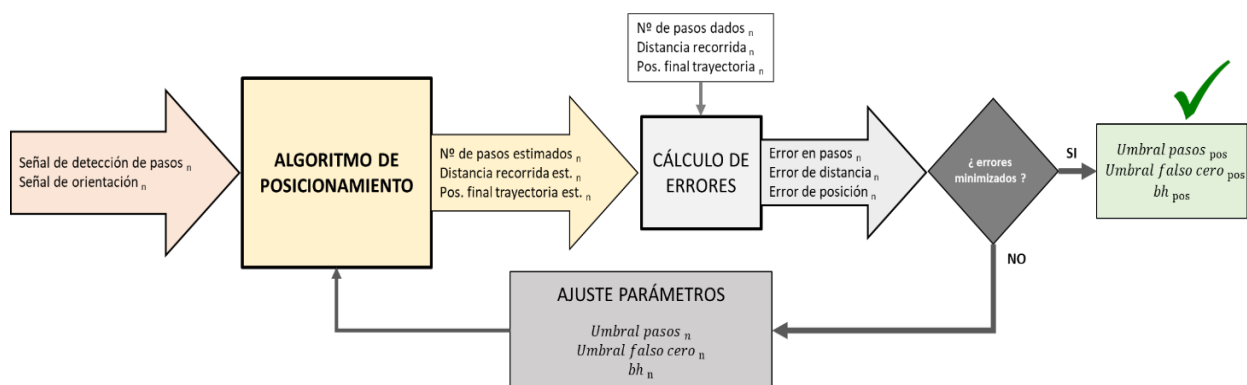


Figura 65: Diagrama del proceso de optimización

En la figura 65,  $n$  representa la prueba actual que se optimiza, y  $pos$  es la posición con la que se portan las IMUs (posición 1: tobillo; posición 2: muñeca; posición 3: pecho).

El proceso de obtención de la señal de detección de pasos y la señal de orientación se realiza en ambos casos (NGIMU y BNO080) mediante el algoritmo de estimación de ángulos de Euler mejorado. En ningún caso se hace uso de los ángulos de Euler que proporcionan directamente los dispositivos, ya que quedaría limitado a una posición/orientación concreta, como se vio en el capítulo 4. Se ha definido una prueba concreta para llevar a cabo dicha optimización.

**Características de la prueba ('Ground truth')**

- nº de pasos: 109 pasos
- Distancia recorrida: 151.72 m (utilizando Google Maps)
- Trayectoria: partiendo del hall que une la zona Oeste y Sur de la planta 3 del EPS, se ha recorrido de forma circular la planta hasta llegar al mismo punto del hall que une la zona Norte y Este, realizando unos giros de 90 grados en el hall que une la zona Oeste y Norte:

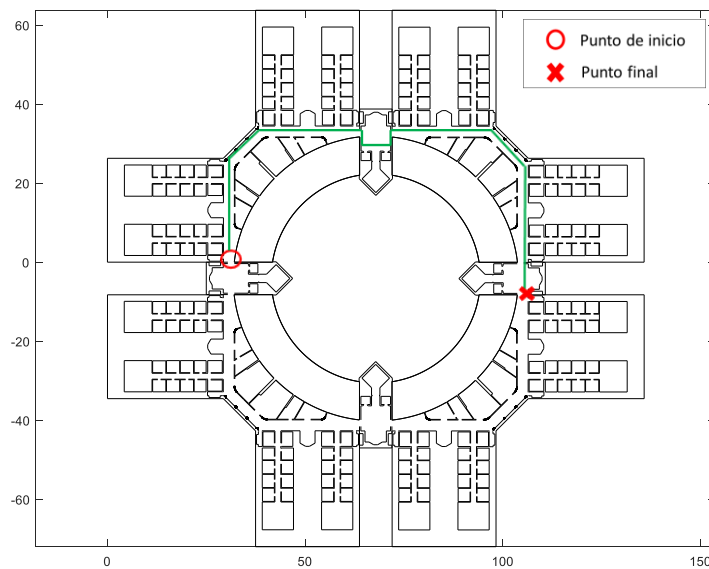


Figura 66: 'Ground truth' de las pruebas de optimización

**POSICIÓN 1: Pie/tobillo**



Figura 67: Posición 1 del pie/tobillo

Los resultados de la prueba portando los dispositivos en el pie y espinilla se muestran en las figuras 68 y 69.

**NGIMU:** posicionada en el frontal de la espinilla.

- Nº de pasos detectados: 108 pasos
- Error en pasos: 1 paso
- Distancia recorrida estimada: 144.6 m
- Error de distancia: 20.88 m
- Error de posicionamiento: 24.55 m

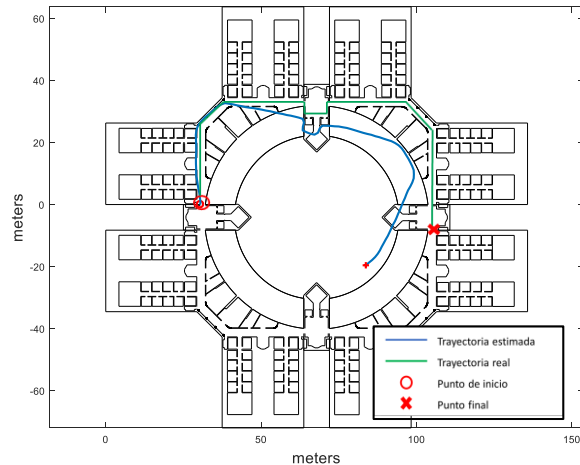


Figura 68: Trayectoria NGIMU pos. 1

**BNO080:** posicionada en el empeine.

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 134.6 m
- Error de distancia: 17.12 m
- Error de posicionamiento: 64.98 m

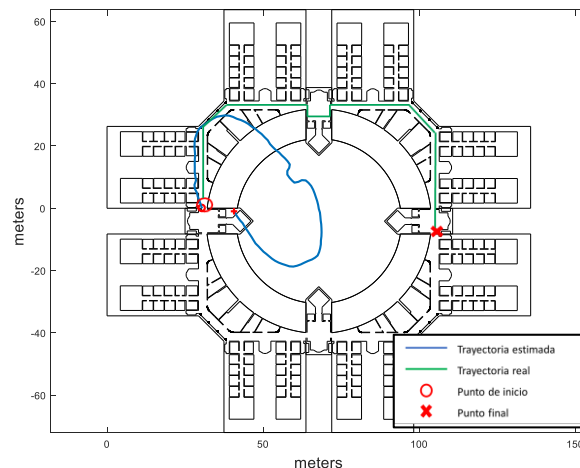


Figura 69: Trayectoria BNO080 pos. 1

Los resultados de la prueba anterior demuestran que aunque se reduzca el recorrido se siguen produciendo imprecisiones en la estimación de la trayectoria. El dispositivo NGIMU, sin embargo, realiza dicha estimación de manera más precisa e igualada a la trayectoria real. Se observa en ambas figuras 68 y 69 que se detecta de manera correcta el intervalo donde se realizan unos giros de 90 grados, pero de nuevo el error acumulativo de la deriva provoca que los giros de mayores de 90 grados se detecten de forma errónea y con un valor superior a lo realizado, dando lugar a una trayectoria totalmente errónea. Estos errores en el caso de utilizar el BNO080 se acentúan aún más. La detección de pasos en la prueba anterior se realiza de manera correcta, como ocurre anteriormente, y muestra errores en pasos dentro del rango permitido (entre 2 y 5 pasos).

Se ha realizado otra prueba pero conmutando las posiciones de ambas IMUs, como muestra la figura 70. Los resultados se muestran en las figuras 71 y 72.



Figura 70: Posición 1 alternativa del pie/tobillo

**NGIMU:** posicionada en el empeine.

- Nº de pasos detectados: 105 pasos
- Error en pasos: 4 pasos
- Distancia recorrida estimada: 149.8 m
- Error de distancia: 1.92 m
- Error de posicionamiento: 3.61 m

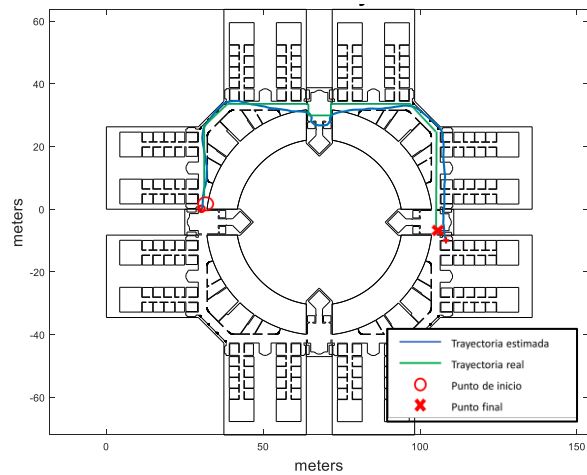


Figura 71: Trayectoria NGIMU pos. 1 alternativa

**BNO080:** posicionada en el frontal de la espinilla.

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 143.76 m
- Error de distancia: 7.96 m
- Error de posicionamiento: 38.75 m

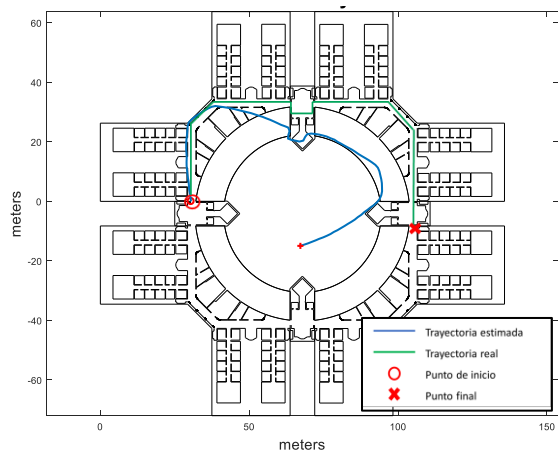


Figura 72: Trayectoria BNO080 pos. 1 alternativa

En este caso, se observa una notable mejora en la estimación de la trayectoria realizada con la NGIMU con respecto a la posición anterior (espinilla), pero en cambio se obtiene un mayor error en la detección de pasos. Los resultados del BNO080 en la estimación de la trayectoria también son mejores que los obtenidos portando el sensor en el empeine, y la detección de pasos se sigue realizando correctamente.

**POSICIÓN 2: Muñeca**

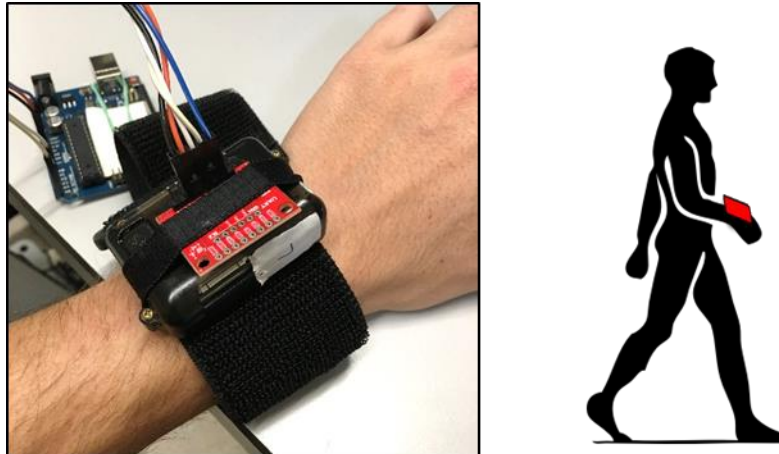


Figura 73: Posición 2

Los resultados de la prueba portando los dispositivos en la muñeca se muestran en las figuras 74 y 75.

**NGIMU:**

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 145.9 m
- Error de distancia: 5.82 m
- Error de posicionamiento: 40.6 m

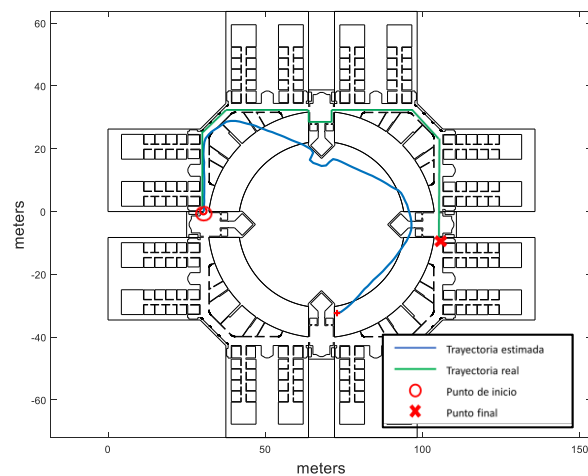


Figura 74: Trayectoria NGIMU pos. 2

**BNO080:**

- Nº de pasos detectados: 109 pasos
- Error en pasos: 0 pasos
- Distancia recorrida estimada: 142.36 m
- Error de distancia: 9.36 m
- Error de posicionamiento: 16.91 m

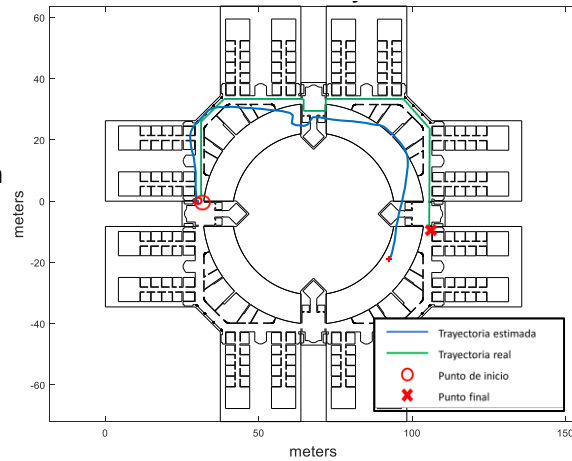


Figura 75: Trayectoria BNO080 pos. 2

Utilizando esta posición para los dispositivos, se observa que la detección de pasos se sigue realizando de manera correcta en ambos casos. En el caso del BNO080, se obtiene una mejor estimación de la trayectoria realizada en comparación con la posición anterior (empeine).

**POSICIÓN 3: Pecho**



Figura 76: Posición 3

Los resultados de la prueba portando los dispositivos en la zona del pecho se muestran en las figuras 77 y 78.

**NGIMU:**

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 153.25 m
- Error de distancia: 1.53 m
- Error de posicionamiento: 24.64 m

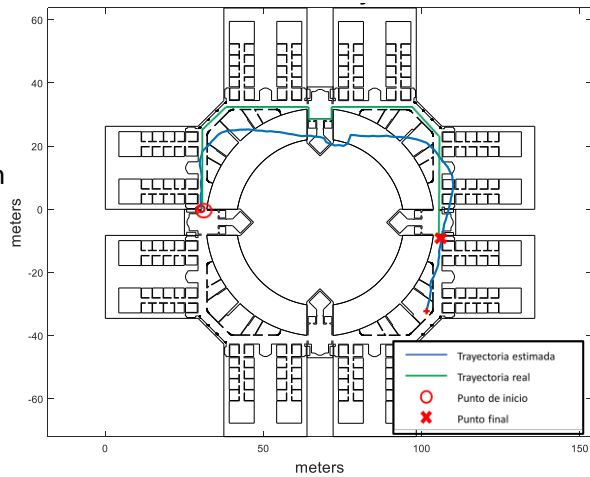


Figura 77: Trayectoria NGIMU pos. 3

**BNO080:**

- Nº de pasos detectados: 108 pasos
- Error en pasos: 1 paso
- Distancia recorrida estimada: 150.04 m
- Error de distancia: 1.68 m
- Error de posicionamiento: 34.13 m

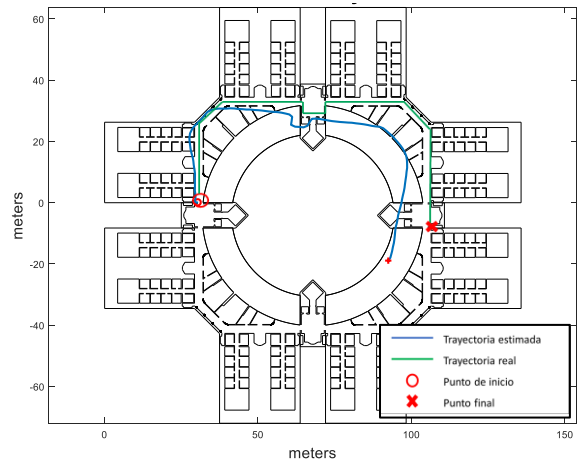


Figura 78: Trayectoria BNO080 pos. 3

La tabla 11 recopila los valores de los parámetros de entrada del algoritmo de posicionamiento para cada posición.

Posición	NGIMU			BNO080		
	Umbral amplitud de paso	Umbral detección falso cero	bh	Umbral amplitud de paso	Umbral detección falso cero	bh
Frontal espinilla	25	5	0.35	25	5	0.2
Empeine	25	5	0.065	25	5	0.2
Muñeca	10	5	0.95	10	2	0.9
Pecho	6	2	1.2	8	2	1.2

Tabla 11: Parámetros de entrada optimizados del algoritmo de posicionamiento



## 5.2 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS

Las pruebas que se presentan a continuación tienen como objetivo analizar los datos que se obtienen mediante el algoritmo de posicionamiento utilizando las tres posiciones que se definieron en las pruebas de optimización. En las pruebas se recorre la trayectoria mostrada en la figura 70, y se realizan tres repeticiones por cada posición (Prueba 1, Prueba 2 y Prueba 3). En todos los casos se han utilizado los parámetros de entrada del algoritmo de posicionamiento mostrados en la tabla 11. Es necesario mencionar que se ha realizado un ajuste del ángulo de orientación inicial en cada prueba, ya que éste presenta una aleatoriedad tal y como se ha visto en el capítulo anterior.

### POSICIÓN 1: FRONTAL DE LA ESPINILLA



Figura 79: Posición 1 de las pruebas de verificación

Analizando los resultados de las pruebas de optimización, la posición de los dispositivos más apropiada en la zona del pie y tobillo es el frontal de la espinilla. Aunque la estimación de la trayectoria en el caso de portar la NGIMU en el empeine con la configuración ENU, la forma física del dispositivo y su carcasa están diseñadas para que sea más fácil portar el dispositivo en esta posición.



Los resultados de las tres pruebas realizadas con esta posición son las que muestran las figuras 80, 81 y 82 (NGIMU), y 83, 84 y 85 (BNO080).

**NGIMU:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 108 pasos
- Error en pasos: 1 pasos
- Distancia recorrida estimada: 156.74 m
- Error en distancia: 5.02 m
- Error de posicionamiento: 40.05 m

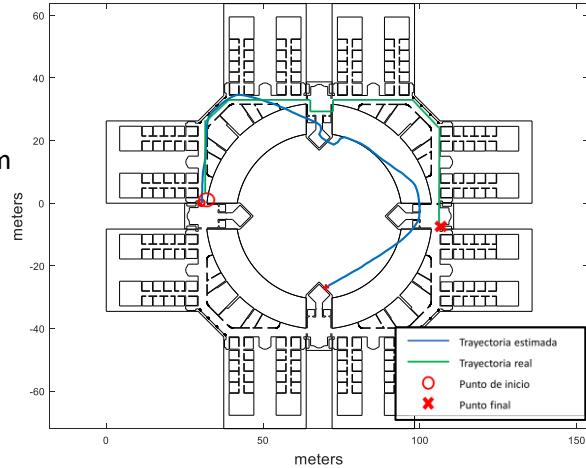


Figura 80: Trayectoria prueba 1 pos. 1 NGIMU

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 156.61 m
- Error de distancia: 4.89 m
- Error de posicionamiento: 48.88 m

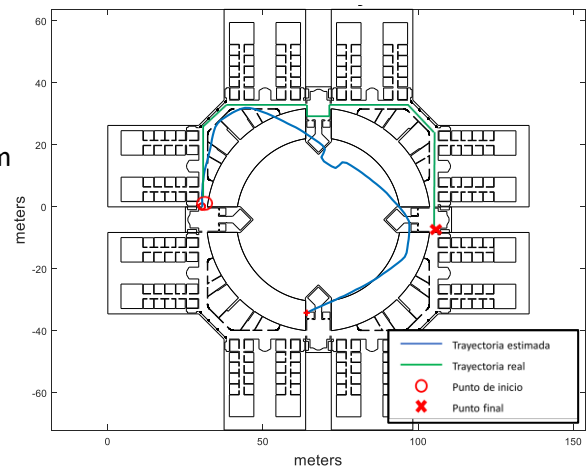


Figura 81: Trayectoria prueba 2 pos.1 NGIMU

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 106 pasos
- Error en pasos: 3 pasos
- Distancia recorrida estimada: 155.83 m
- Error de distancia: 4.11 m
- Error de posicionamiento: 30.32 m

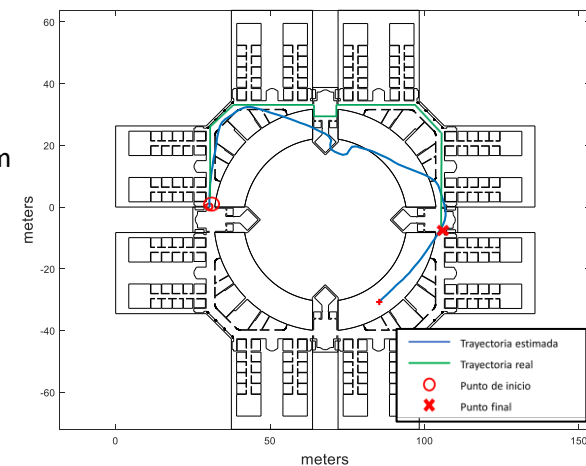


Figura 82: Trayectoria prueba 3 pos.1 NGIMU

**BNO080:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 150.2 m
- Error de distancia: 1.52 m
- Error de posicionamiento: 28.55 m

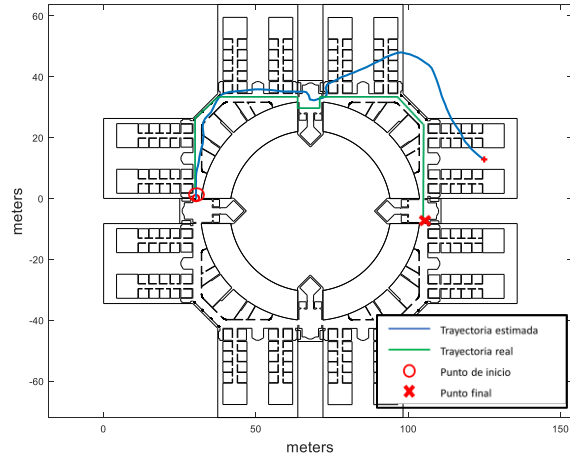


Figura 83: Trayectoria prueba 1 pos.1 BNO080

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 107 pasos
- Error en pasos: 2 pasos
- Distancia recorrida estimada: 151.47 m
- Error de distancia: 0.25 m
- Error de posicionamiento: 11.27 m

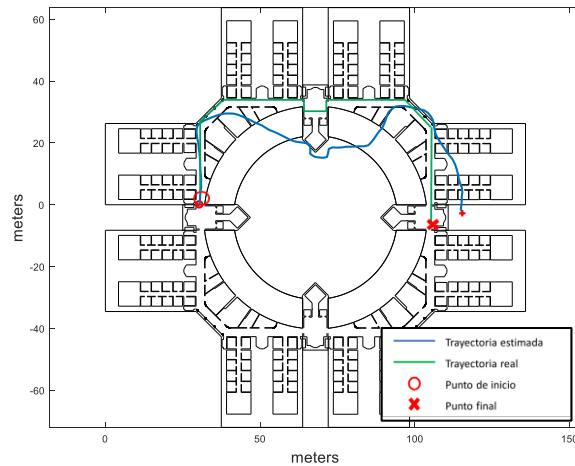


Figura 84: Trayectoria prueba 2 pos.1 BNO080

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 106 pasos
- Error en pasos: 3 pasos
- Distancia recorrida estimada: 150.46 m
- Error de distancia: 1.26 m
- Error de posicionamiento: 52.74 m

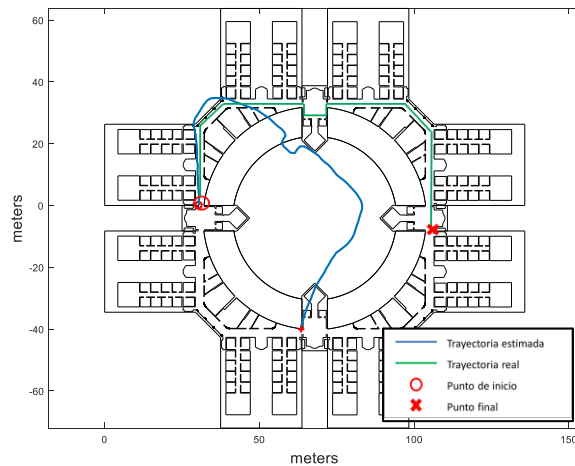


Figura 85: Trayectoria prueba 3 pos.1 BNO080

**POSICIÓN 2: MUÑECA**

Los resultados de las pruebas realizadas utilizando esta posición fueron los siguientes.

**NGIMU:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 105 pasos
- Error en pasos: 4 pasos
- Distancia recorrida estimada: 141.83 m
- Error de distancia: 9.89 m
- Error de posicionamiento: 42.12 m

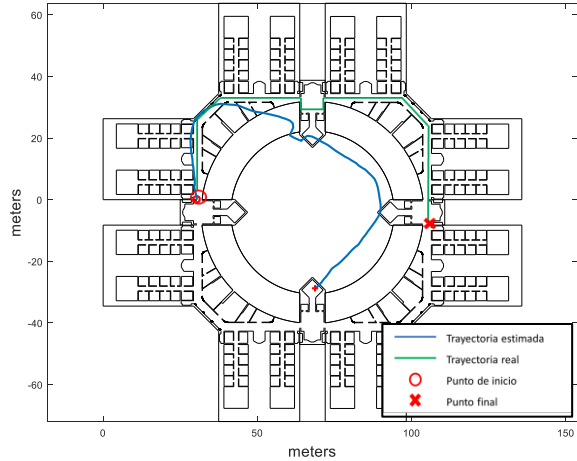


Figura 86: Trayectoria prueba 1 pos.2 NGIMU

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 89 pasos
- Error en pasos: 20 pasos
- Distancia recorrida estimada: 110.60 m
- Error de distancia: 41.12 m
- Error de posicionamiento: 64.69 m

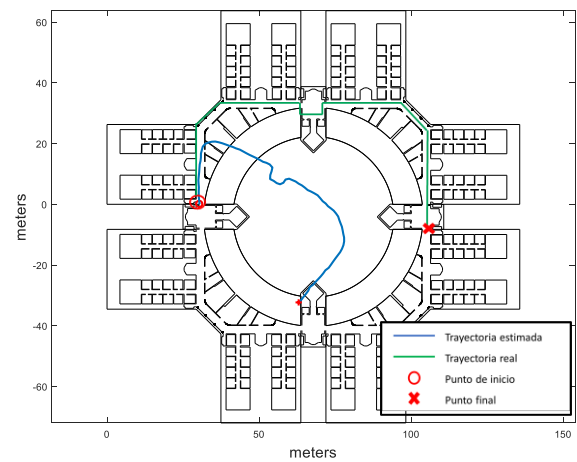


Figura 87: Trayectoria prueba 2 pos.2 NGIMU

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 87 pasos
- Error en pasos: 22 pasos
- Distancia recorrida estimada: 107.09 m
- Error de distancia: 44.63
- Error de posicionamiento: 37.38 m

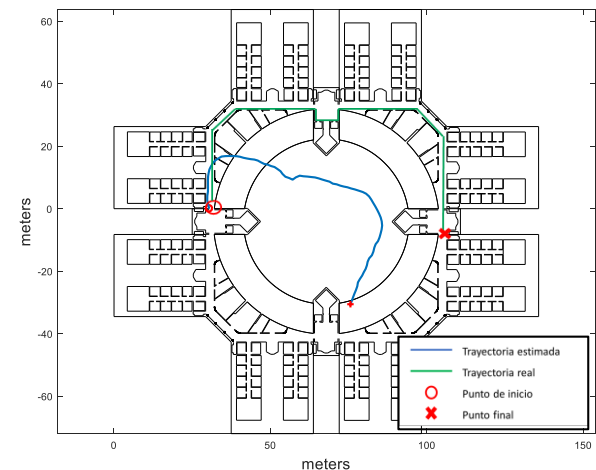


Figura 88: Trayectoria prueba 3 pos.2 NGIMU

**BNO080:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 109 pasos
- Error en pasos: 0 pasos
- Distancia recorrida estimada: 143.91m
- Error de distancia: 7.82 m
- Error de posicionamiento: 9.51 m

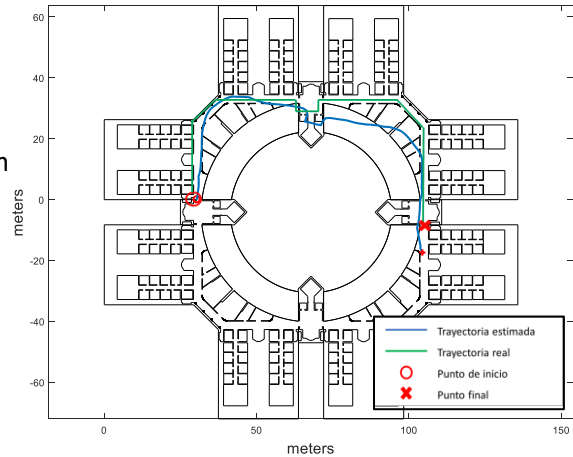


Figura 89: Trayectoria prueba 1 pos.2 BNO080

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 103 pasos
- Error en pasos: 6 pasos
- Distancia recorrida estimada: 122.16 m
- Error de distancia: 29.56 m
- Error de posicionamiento: 18.18 m

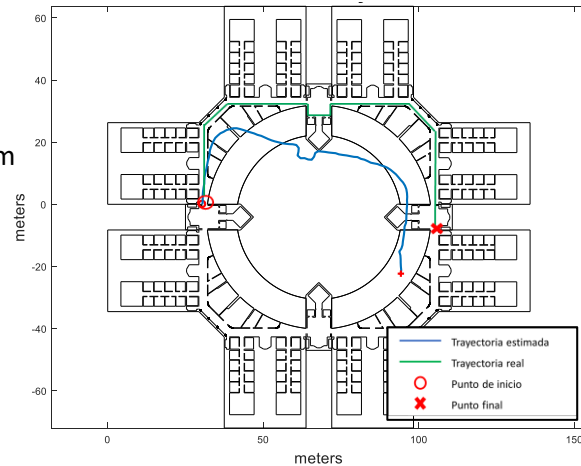


Figura 90: Trayectoria prueba 2 pos.2 BNO080

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 100 pasos
- Error en pasos: 9 pasos
- Distancia recorrida estimada: 115.20 m
- Error de distancia: 36.52 m
- Error de posicionamiento: 3.05 m

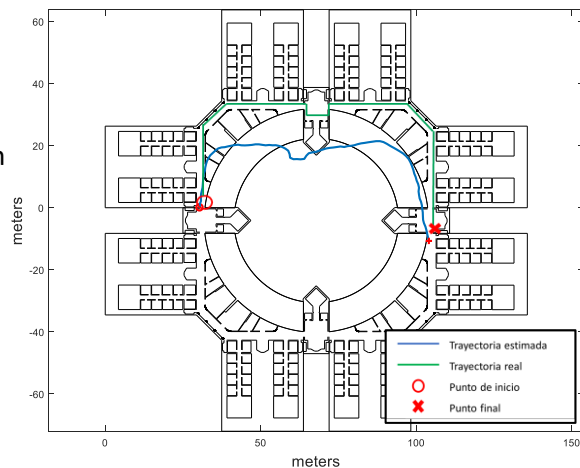


Figura 91: Trayectoria prueba 3 pos.2 BNO080

**POSICIÓN 3: PECHO**

Los resultados de las pruebas realizadas ubicando las IMUs en el pecho fueron los siguientes.

**NGIMU:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 118 pasos
- Error en pasos: 9 pasos
- Distancia recorrida estimada: 166.89 m
- Error de distancia: 15.17 m
- Error de posicionamiento: 45.15 m

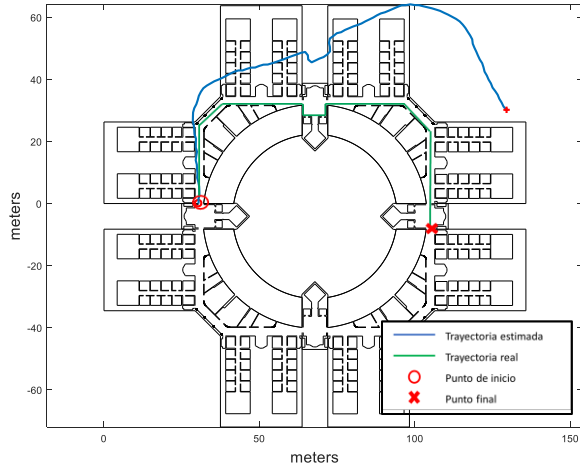


Figura 92: Trayectoria prueba 1 pos.3 NGIMU

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 77 pasos
- Error en pasos: 32 pasos
- Distancia recorrida estimada: 108.31 m
- Error de distancia: 43.12 m
- Error de posicionamiento: 17.06 m

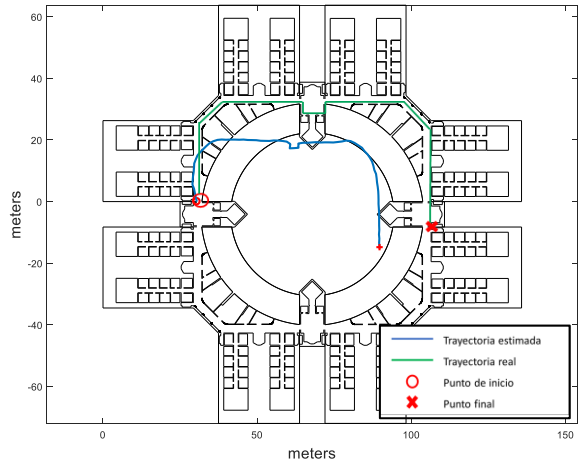


Figura 93: Trayectoria prueba 2 pos.3 NGIMU

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 65 pasos
- Error en pasos: 44 pasos
- Distancia recorrida estimada: 91.38 m
- Error de distancia: 60.34 m
- Error de posicionamiento: 21.03 m

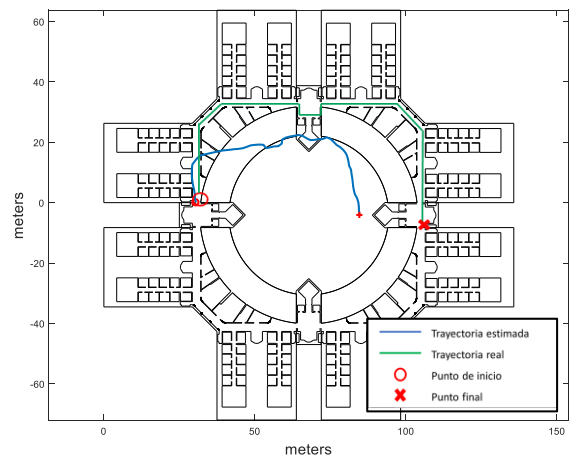


Figura 94: Trayectoria prueba 3 pos.3 NGIMU

**BNO080:**

Prueba 1

- Nº de pasos detectados: 81 pasos
- Error en pasos: 28 pasos
- Distancia recorrida estimada: 108.49 m
- Error de distancia: 43.23 m
- Error de posicionamiento: 46.84 m

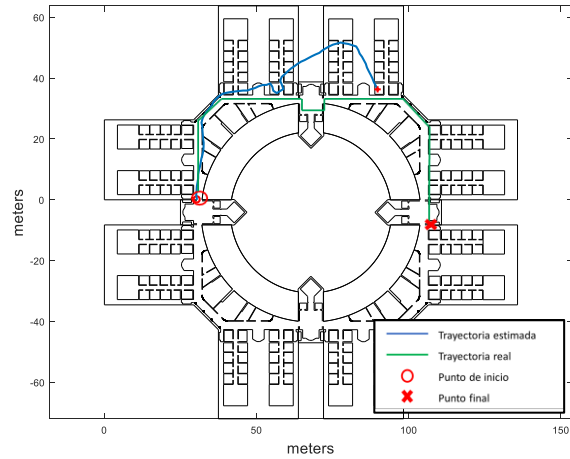


Figura 95: Trayectoria prueba 1 pos.3 BNO080

Prueba 2

- Nº de pasos detectados: 37 pasos
- Error en pasos: 72 pasos
- Distancia recorrida estimada: 48.9 m
- Error de distancia: 102.82 m
- Error de posicionamiento: 37.42 m

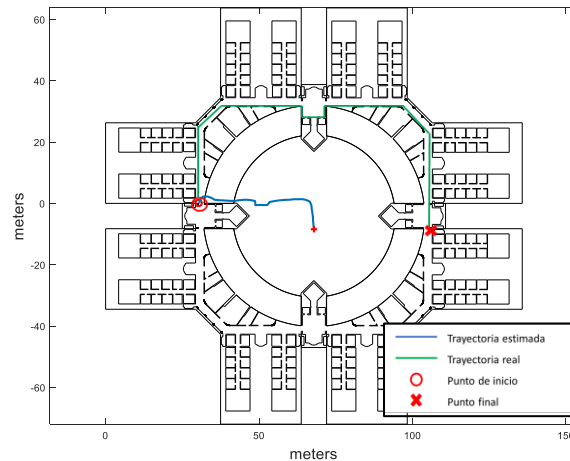


Figura 96: Trayectoria prueba 2 pos. 3 BNO080

Prueba 3

- Nº de pasos detectados: 20 pasos
- Error en pasos: 87 pasos
- Distancia recorrida estimada: 26.72 m
- Error de distancia: 125
- Error de posicionamiento: 53.36 m

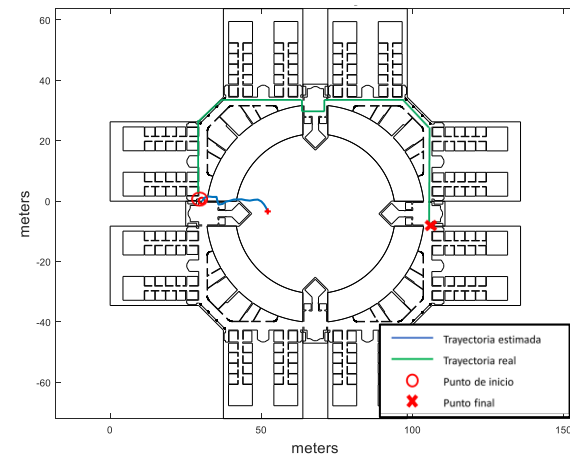


Figura 97: Trayectoria prueba 3 pos.3 BNO080

### 5.3 COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS

Una vez procesadas las pruebas de verificación, se han agrupado los resultados para facilitar la comparativa y llegar a conclusiones más precisas en este capítulo. Para ello se muestran las tablas siguientes.

Posición	Pruebas	NGIMU			BNO080		
		Error en pasos (pasos)	Error de distancia (m)	Error de posición (m)	Error en pasos (pasos)	Error de distancia (m)	Error de posición (m)
Frontal espinilla	1	1	5.02	40.05	2	1.52	28.55
	2	2	4.89	48.88	2	0.25	11.27
	3	3	4.11	30.32	3	1.26	52.74
Muñeca	1	4	9.89	42.12	0	7.82	9.51
	2	20	41.12	64.69	6	29.56	18.18
	3	22	44.63	37.38	9	36.52	3.05
Pecho	1	9	15.17	45.15	28	43.23	46.84
	2	32	43.41	17.06	72	102.82	37.42
	3	65	60.34	21.03	89	125	53.36

Tabla 12: Errores absolutos de las pruebas de verificación

Posición	Pruebas	NGIMU		BNO080	
		Error en pasos (%)	Error de distancia (%)	Error en pasos (%)	Error de distancia (%)
Frontal espinilla	1	0.917	3.308	1.83	1.00
	2	1.83	3.17	1.83	0.16
	3	2.75	2.709	2.75	0.83
Muñeca	1	3.67	6.518	0	5.154
	2	18.35	27.102	5.50	19.483
	3	20.18	29.416	8.257	24.07
Pecho	1	8.256	10	25.68	28.49
	2	29.357	28.61	66.05	67.77
	3	59.63	39.77	81.65	82.39

Tabla 13: Errores relativos de las pruebas de verificación

En las tablas 12 y 13 se muestran los errores cometidos en las tres pruebas realizadas por cada posición de uso de los dispositivos NGIMU y BNO080. Se puede observar que en el caso de posicionar las IMUs en el frontal de la espinilla, el error en la detección de pasos es menor y prácticamente despreciable, y el error en la distancia recorrida presenta valores reducidos próximos al 3% en la NGIMU y menores del 1% en el BNO080.

Utilizando esta posición, sin embargo, se obtienen valores significativamente altos en el error de posición, ya que al ser las trayectorias muy imprecisas pero cercanas a la distancia real, la posición final de dichas trayectorias está muy distanciada de la posición final real. Es destacable la diferencia del error de posición que presenta la NGIMU con respecto al BNO080, el cual es significativamente mayor en el primer caso. No obstante, el error de posición se evalúa de manera más precisa observando las trayectorias estimadas, lo cual se hará más adelante en esta sección.

En el caso de portar los dispositivos en la muñeca, los errores en la detección de pasos y en la distancia aumentan consecuentemente, y son más altos en el caso de utilizar la NGIMU, llegando a valores de 22 pasos (20.18%), y 44.63 m (29.416%), respectivamente, como se puede ver en las tablas 12 y 13. Con el BNO080 estos dos errores son menores que los que se obtienen con la NGIMU, pero son mayores que los obtenidos con la posición anterior. Los errores de posición en este caso disminuyen con respecto a portar las IMUs en el frontal de la espinilla, pero se evaluará de manera más correcta analizando las trayectorias estimadas.

Los errores más elevados se producen cuando los dispositivos se portan en el pecho, de la manera que muestra la figura 76. En este caso, la detección de pasos no se realiza de manera correcta, llegando a un error de casi el 60% (65 pasos) en pruebas con la NGIMU, y del 81% (89 pasos) con el BNO080, como se puede ver en las tablas 12 y 13. Esto afecta directamente a los demás parámetros de error como se puede observar en las tablas, obteniendo errores máximos de distancia de casi un 40% (60.3 m) con la NGIMU y del 82% (125 m) con el BNO080. Esto implica que el error de posición, al igual que el resto, sea desorbitado, al no detectarse correctamente los pasos y no estimar bien las trayectorias.

La tabla 14 muestra los errores medios obtenidos de las tres pruebas realizadas con cada posición para ver de forma más clara que la mayor precisión en la estimación del paso es en el caso de portar la IMU en el tobillo, y la peor, en el pecho.

Posición	NGIMU					BNO080				
	Error medio en pasos		Error medio de distancia		Error medio de posición (m)	Error medio en pasos		Error medio de distancia		Error medio de posición (m)
	pasos	%	m	%		pasos	%	m	%	
<b>Frontal espinilla</b>	2	1.83	4.67	3.06	39.75	2.33	2.13	1.01	0.66	30.85
<b>Muñeca</b>	15.3	14.06	31.88	21.01	48.06	5	4.58	24.63	16.236	10.24
<b>Pecho</b>	35.3	32.41	39.64	26.12	27.74	63	57.79	90.35	59.55	45.87

Tabla 14: Errores medios de las pruebas de verificación de características



A partir de la tabla 14 y analizando las figuras siguientes se estudiará las ventajas e inconvenientes de portar los dispositivos en las tres posiciones del cuerpo y las diferencias que existen entre los resultados de ambos dispositivos en estos casos.

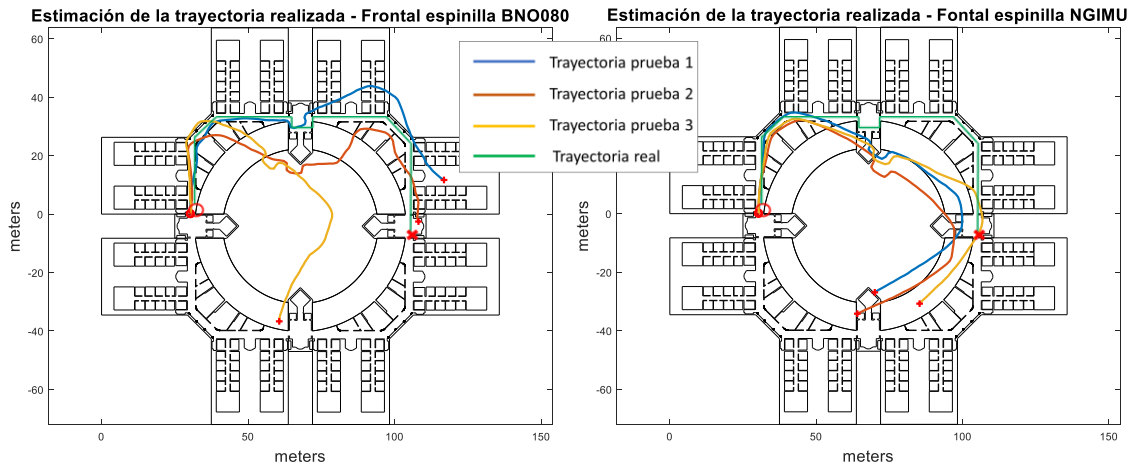


Figura 98: Trayectorias estimadas utilizando la posición 1

Los resultados obtenidos portando las IMUs en el frontal de la espinilla como indica la figura 79 son precisos en la detección de pasos tanto con la NGIMU como con el BNO080, obteniéndose errores medios del 1.83% y 1.01%, respectivamente, como indica la tabla 14. Al realizarse correctamente la detección de pasos, la distancia recorrida estimada se aproxima a la real, y de manera más precisa utilizando el BNO080, con un error medio del 0.66%. Con la NGIMU se obtiene un error medio mayor, del 3% (4.67 m).

A pesar de los buenos resultados en la detección de pasos y estimación de la distancia recorrida, la figura 98 muestra unas trayectorias estimadas que presentan imprecisiones que resultan en un error de posición muy significativo. Ambos dispositivos estiman de manera correcta el primer tramo recto de la trayectoria, pero al realizar el primer giro de 90 grados aparece un error de desviación acumulativo en la señal de orientación que altera la trayectoria y muestra resultados incoherentes. Este error se muestra más perjudicial para la trayectoria en el caso de utilizar la BNO080 que utilizando la NGIMU. La figura 98 muestra que la estimación de la trayectoria del NGIMU, aun con imprecisiones muy altas, se realiza de manera más precisa que utilizando la BNO080, posicionando las IMUs en el frontal de la espinilla. El tramo de los giros de 90 grados se detecta de manera correcta con ambos dispositivos, pero al verse afectada por la desviación del giro anterior, la trayectoria estimada transcurre por zonas ilógicas y termina en puntos que están muy lejos del punto final real.

En el caso de la NGIMU, el error de posición medio obtenido con esta posición es mayor que el obtenido con el BNO080, pero la trayectoria presenta menos imprecisiones en el primer caso. Analizando la figura 98 se puede confirmar, tal y como se estudió en el capítulo anterior, que en esta zona el dispositivo tiende a mostrar un mayor error acumulativo en la señal de orientación.

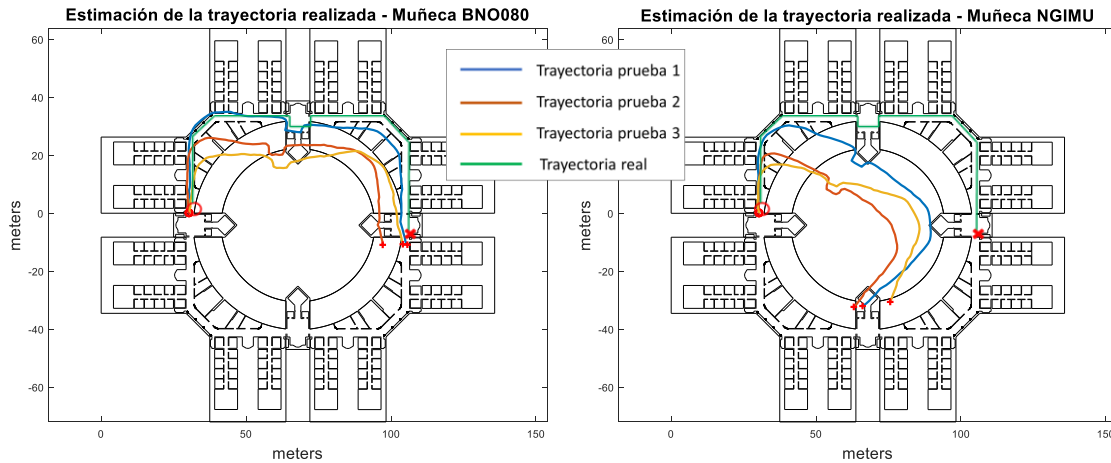


Figura 99: Trayectorias estimadas utilizando la posición 2

Cuando las IMUs se portan en la muñeca, los resultados en la detección de pasos y estimación de distancia recorrida empeoran notablemente con respecto a la posición anterior, aumentando a un 14.06% y un 21% de error medio, respectivamente, como muestra la tabla 14.

Se observa, sin embargo, una mejora significativa en la estimación de la trayectoria en el caso de utilizar el BNO080, comparada con las trayectorias de la figura 98. El error acumulativo en la señal de orientación es menor en este caso y afecta directamente a la estimación de la trayectoria, obteniendo unos resultados más acordes al ‘ground truth’ de las pruebas. Con la NGIMU, en cambio, la desviación sigue presente e incluso aumenta con respecto a la posición anterior. Es por ello que el error medio de posición de la NGIMU cuando es portada en la muñeca es el más alto de todas las posiciones analizadas, de 48 m, como muestra la tabla 14.

Es importante mencionar que cuando las IMUs se portan en la muñeca, existe una incertidumbre que no aparece cuando los dispositivos se portan en los otros dos lugares. Al andar, el movimiento del brazo presenta una oscilación si éste permanece próximo a la cintura, para que el algoritmo de detección de pasos detecte la oscilación en la señal. Pero la realidad es que al andar, el brazo no presenta una oscilación constante ya que al tener un teléfono móvil en la mano, por ejemplo, la señal de detección de pasos no sufriría cambios y no se detectarían pasos durante ese periodo. Algo similar ocurriría si durante las pruebas se llevasen las manos en los bolsillos. Esta incertidumbre es muy característica cuando se portan las IMUs en la muñeca, y es uno de los motivos por los que en la estimación de pasos la posición más apropiada es la zona de la pierna. En las pruebas, se ha procurado que el movimiento del brazo no fuese ‘ideal’, es decir, se han tenido en cuenta las situaciones puestas como ejemplo (manos en los bolsillos, coger un teléfono móvil) durante algún tramo de la prueba para que quede reflejado en los resultados.

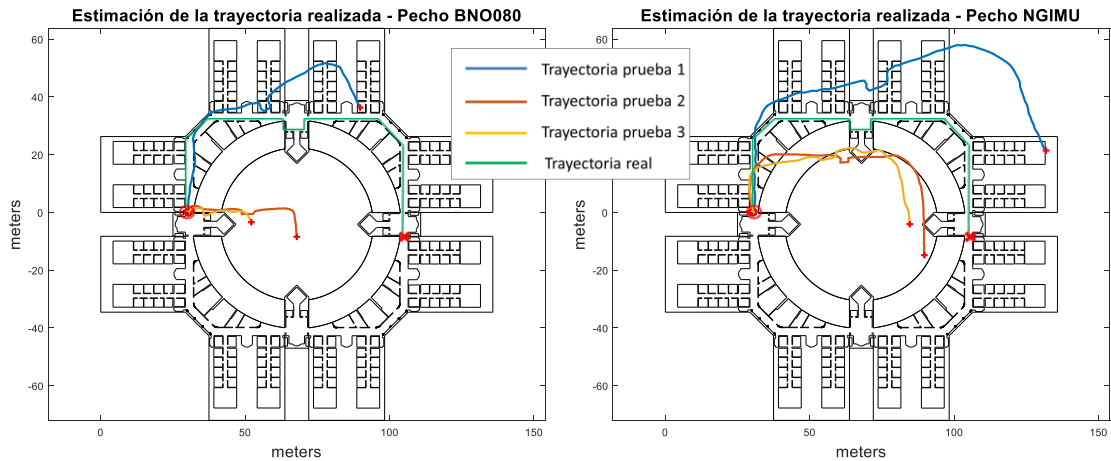


Figura 100: Trayectorias estimadas utilizando la posición 3

La última posición donde se han ubicado las IMUs para hacer las pruebas ha sido en la zona del pecho, como muestra la figura 76. En este caso, los errores que se cometen tanto con la NGIMU como con el BNO080 son notablemente mayores. El error en la detección de pasos es donde mejor se refleja el inconveniente de utilizar esta posición de uso, el cual llega a un valor medio del 32.4% en la NGIMU y del 57.8% en la BNO080. Al detectarse los pasos de manera mucho menos óptima que en los anteriores casos, la estimación de la distancia recorrida también obtiene errores medios muy altos en ambos dispositivos, siendo del 26.12% en la NGIMU y del 59.55% en el BNO080.

En la figura 100 se muestran las trayectorias de las tres pruebas realizadas con las IMUs en el pecho. La estimación de la trayectoria en este caso es notablemente más errónea que en el caso de ubicar las IMUs en las otras dos zonas del cuerpo. La distancia recorrida estimada es mucho menor que el valor real, por lo que las trayectorias calculadas son mucho más cortas que el 'ground truth'. Al igual que ocurre con las pruebas en la muñeca, se observa que la desviación en la señal de orientación en este caso no es tan significativa como en el caso de portar las IMUs en el frontal de la espinilla. Las curvas de 90 grados, además, se estiman con mejor precisión con esta posición de uso.

Aunque exista incertidumbre en el movimiento cuando las IMUs se portan en el pecho mediante un colgante, como en la figura 76, esta posición es más independiente de posibles situaciones que impliquen una difícil detección de pasos como ocurre con la posición de la muñeca. Sin embargo, es complicado ajustar el umbral de detección de pasos para que esta detección sea óptima. La variación de la señal de detección de pasos en este caso es muy inferior a los otros dos, y presenta una sensibilidad mayor ante otros factores externos como la forma de andar de cada persona o lo ajustada que está la correa del colgante. Este último factor puede verse reflejado en las pruebas, ya que la primera prueba está realizada con la correa menos ajustada que en las otras dos pruebas, y, como se puede observar en la figura 100, hay diferencias notables en los resultados.

### Comentarios finales

Utilizando el algoritmo de posicionamiento que se ha empleado a lo largo de este proyecto, y evaluando todos los resultados y errores, la posición más óptima donde portar las IMUs es la del frontal de la espinilla. Portando los dispositivos de este modo, los errores en la detección de pasos y distancia son reducidos y mucho menores que eligiendo las otras dos posiciones probadas. En este caso, el dispositivo NGIMU ofrece unos resultados más precisos y con menos aleatoriedad que los que presenta el BNO080. Para corregir la deriva que sufre la estimación de la trayectoria se puede recurrir a ecuaciones más precisas en el algoritmo de estimación de ángulos de Euler o fusionando otros sistemas de posicionamiento en interiores como los basados en señales de radiofrecuencia, ultrasonidos, o señales GPS, o aplicando el sistema 'Map Matching' como se propone en la literatura.

Para las otras dos posiciones de uso es evidente que el algoritmo de posicionamiento empleado requiere de una modificación o mejora para evitar unos errores tan altos. En el caso de portar la IMU en la muñeca sería necesario detectar las situaciones en las que se están dando pasos pero no se está produciendo una variación de la señal, como cuando se está llevando un teléfono móvil o cuando se tienen las manos en los bolsillos. A pesar de esto, los resultados que presentan las pruebas realizadas con el BNO080 en la muñeca son mejores que los que ofrece la NGIMU, como se puede observar en la figura 103. En las pruebas donde se portan las IMUs en el pecho, los resultados son notablemente peores, pero estudiando posibles modificaciones en el código del algoritmo de posicionamiento, como un ajuste más preciso de los parámetros de entrada, sería posible sacar mayor rendimiento a esta posición de uso.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---



El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado ha permitido conocer los sistemas de medida inercial en profundidad desde el punto de vista tanto teórico como técnico. Las diversas pruebas realizadas han servido para estudiar las limitaciones que este tipo de dispositivos tienen cuando se aplican en las líneas de trabajo orientadas al estudio de la actividad física en personas.

La selección de dispositivos comerciales mostrada en el capítulo 3 indica que existe una amplia variedad de sensores inerciales en el mercado, con distintos niveles de prestaciones y características. Tras el análisis se ha comprobado que la mayoría presentan prestaciones similares en cuanto a la precisión en los acelerómetros, giróscopos o magnetómetros, por lo que la selección ha dependido de otros factores. En el caso particular de aplicaciones de detección de actividad física, donde se centra el actual TFG, es necesaria la posibilidad de almacenamiento de datos o transmisión de los mismos vía USB para su posterior procesamiento. Estas características limitan considerablemente la oferta actual en el mercado. Otros métodos de transmisión mediante conexiones inalámbricas como Bluetooth o WiFi por lo general realizan una transmisión de datos lenta que en los casos donde la cantidad de datos es significativa puede ser una limitación a tener en cuenta. Por otro lado, los sensores inerciales que están en formato chip tienen precios reducidos, pero requieren de un diseño añadido para poder acceder a sus datos o poder implementarlos en otro sistema.

La evaluación de las IMUs en las que se basa el capítulo 4 ha generado multitud de resultados. Inicialmente, se ha comprobado que es necesaria una caracterización mínima de los dispositivos para identificar los ángulos de Euler respecto de la orientación del sistema. La teoría define el eje Z como el eje vertical, y el ángulo Yaw (o Heading) como el giro respecto de la vertical, y los ejes X e Y se definen para que el conjunto siga un sistema de dextrógiro. Esto puede dar lugar a confusión en la interpretación de los resultados proporcionados por el algoritmo del sistema. Por lo tanto, para poder utilizar los ángulos de Euler proporcionados por el sistema es necesario haber identificado previamente dichos ángulos o utilizar algoritmos propios, como los propuestos en el presente TFG, de los que se conoce a ciencia cierta cuáles son. Se ha comprobado que algunos dispositivos como el NGIMU y el BNO080 ofrecen una representación de los ángulos de Euler más preciso cuando tienen una orientación específica, definida como ENU (East North Up), que sigue la regla de la mano derecha con el eje de abscisas en dirección al movimiento.

Otros de los resultados ha sido que los ángulos de Euler que ofrecen de forma directa las IMUs no se ven significativamente afectados por la presencia de un motor eléctrico, pero sí se producen perturbaciones en los valores del magnetómetro. Además, las pruebas realizadas no han permitido concluir si el uso del magnetómetro está desaconsejado en determinados edificios o entornos, como es el caso de la EPS, debido a su estructura interna que afecta de forma irregular a las medidas del mismo, como se había demostrado en trabajos previos.

Por otro lado, la caracterización del dispositivo NGIMU revela que el error de desviación que presenta la señal de orientación es mayor cuando la IMU es portada en la zona del tobillo, mientras que disminuye cuando se posiciona en el muslo. Asimismo, se ha comprobado que este error es variable en función de numerosos factores, como la manera de andar de cada individuo o la posición donde esté montada la IMU. Por lo tanto, se trata de un error en las IMUs difícil de predecir, y por lo tanto, de compensar.

Se ha propuesto una modificación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler inicial que ha demostrado ser más eficiente en la reducción de la desviación en la señal de orientación (Yaw). Esta mejora se basa en la utilización de ecuaciones más precisas en la etapa de predicción del giróscopo, y reduce la desviación hasta en un 66% como se ha mostrado en varias pruebas. Esta reducción de la desviación a su vez ofrece unos resultados más precisos en la estimación de la trayectoria.

Otra conclusión que se extrae del capítulo 4 es que en las IMUs en formato MEM, como el BNO080, se requiere de una sincronización precisa entre la salida de datos del giróscopo y del acelerómetro para una correcta implementación del algoritmo de estimación de ángulos de Euler. También se ha concluido que la detección de pasos que el BNO080 proporciona es imprecisa y da errores mayores (63%) que los que se obtienen con el algoritmo de posicionamiento propuestos (6.67%).

La evaluación de errores del algoritmo de posicionamiento indica que la detección de pasos de las IMUs se realiza correctamente en todos los casos analizados, pero la estimación de la trayectoria es más precisa en las IMUs tipo encapsulado (NGIMU y SHIMMER3) que las IMUs tipo MEM (BNO055 USB Stick y BNO080). Esto evidencia que las IMUs avanzadas presentan unas prestaciones de mayor nivel que el resto.

Por último, en el capítulo de validación de características se ha comprobado que la posición más adecuada donde portar las IMUs es la del frontal del tobillo, donde el error medio en la detección de pasos y distancia es más reducido, del 2% y 3%, que eligiendo las otras dos posiciones probadas (pecho y muñeca), que aumentan incluso a un 33% y 60%. Para las otras dos posiciones de uso el algoritmo de posicionamiento empleado requiere de una modificación o mejora para evitar errores significativos.



Con la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado se plantean una serie de ideas o mejoras que pueden ser propuestas como líneas de trabajos futuros:

#### **Evaluación de sistemas de medida inercial más avanzados**

Las IMUs más avanzadas del mercado ofrecen prestaciones de alto nivel que pueden ser ventajosas para la clasificación de la actividad física, como la velocidad, detección de escaleras, o las pulsaciones del corazón. Se propone un estudio detallado de estos sistemas y de sus prestaciones para valorar su rendimiento en las aplicaciones en las se basa el proyecto.

#### **Estudio de métodos de transformación en los datos directos de orientación de las IMUs**

Se propone estudiar métodos de transformación a aplicar en los datos de representación proporcionados directamente por los dispositivos. De esta forma las IMUs podrían utilizarse con una orientación distinta que la que sigue la configuración ENU, con unos resultados suficientemente precisos para que puedan ser empleados correctamente en el algoritmo de posicionamiento.

#### **Mejora del algoritmo de estimación de ángulos de Euler**

La mayoría de las IMUs del mercado incorporan magnetómetros, por lo que sería ventajoso añadir a las ecuaciones del algoritmo una etapa donde se empleen los datos del magnetómetro para la corrección de errores en la estimación de las señales de orientación. Asimismo, se propone extender el algoritmo a otras posibles formas de representación como los cuaterniones o las matrices de rotación.

#### **Mejora del algoritmo de posicionamiento para otras posiciones de las IMUs**

Los resultados en el posicionamiento que se obtienen con las IMUs cuando son portadas en otros lugares del cuerpo como la muñeca o el pecho son imprecisos. La detección de pasos en el caso de llevar la IMU en la muñeca muestra errores muy elevados, por lo que sería necesario detectar las situaciones en las que se están dando pasos pero no se está produciendo una variación de la señal, como cuando se está llevando un teléfono móvil o cuando se tienen las manos en los bolsillos. De igual modo, se propone mejorar el algoritmo de detección de pasos en el caso de ubicar los dispositivos en el pecho.



## IV. - PLIEGO DE CONDICIONES

---

En esta sección se muestra el Pliego de Condiciones del proyecto, el cual se dividirá en las siguientes secciones:

### PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

El presente Pliego de Condiciones Técnicas resume las características que se deben cumplir para el desarrollo del proyecto. El objetivo principal de este documento es el realizar un estudio detallado de los sistemas de medida inercial para:

- Comprender la teoría matemática básica de los sensores inerciales.
- Analizar y comparar los dispositivos inerciales que están disponibles en el mercado.
- Analizar el funcionamiento y el nivel de prestaciones que ofrecen los dispositivos en aplicaciones orientadas a la actividad física.

El proyecto está compuesto de la siguiente documentación:

- Memoria.
- Planos.
- Presupuesto.
- Pliego de condiciones.
- Anexos.

Se entiende por documentación aquella que es de obligado cumplimiento.

### PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES

#### ○ REQUERIMIENTOS SOFTWARE

Para el desarrollo del proyecto han sido necesarias las siguientes herramientas software comerciales:

- MATLAB R2016b y R2018b: entorno de desarrollo integrado con lenguaje de programación propio, y es el programa más utilizado en este TFG. Se ha utilizado para implementar los algoritmos con los que se trabaja en el desarrollo del proyecto, y para representar los datos de las IMUs de las pruebas realizadas.
- Arduino 1.8.9: entorno de desarrollo integrado de Arduino. Se ha utilizado únicamente para evaluar el sensor BNO080. Para ello, se han desarrollado una serie de códigos que permiten configurar el sensor y obtener sus datos de salida. En estos códigos se ha hecho uso de una serie de funciones que se incluyen en la librería 'SparkFun BNO080 Cortex Based IMU'.

- NGIMU GUI v1.13: software propietario de IO Technologies, como interfaz para poder acceder a los datos proporcionados por la NGIMU y para configurar sus parámetros de funcionamiento.
  - CONSENSYS v0.4.0: Software propietario de SHIMMER que permite acceder a los datos proporcionados por la SHIMMER3 y configurar sus parámetros de funcionamiento.
  - BOSCH Development Desktop 2.0 v3.18.0.0: Entorno de evaluación desarrollado por BOSCH para los sus propios sensores, utilizado para evaluar el BNO055 USB Stick.
  - PulseView v0.4.1: programa para analizar datos lógicos procedentes de sensores. En este TFG se ha utilizado para evaluar la frecuencia de muestreo del sensor BNO080.
  - Microsoft Office v365 2013: software utilizado para la elaboración de la memoria (Microsoft Word), así como para la realización de tablas y diagramas (Excel y Power Point).
- REQUERIMIENTOS HARDWARE

En cuanto al hardware utilizado en el desarrollo del TFG, se describen las siguientes IMUs:

- NGIMU

IMU del fabricante IO Technologies que combina los sensores internos y los algoritmos de procesamiento de datos con un amplio rango de interfaces de comunicación para crear una plataforma versátil y enfocada tanto a aplicaciones en tiempo real como al registro de datos. Su diseño compacto junto con una batería de 1000 mAh hace que sea un dispositivo de fácil uso para las aplicaciones enfocadas a la clasificación de la actividad física. En este proyecto, se ha utilizado para gran parte de las pruebas de análisis en el capítulo 4 y 5. Sus principales características técnicas son:

#### Sensores y adquisición de datos

- Giróscopo triaxial ( $\pm 2000^\circ/\text{s}$ ,  $F_{\text{MUESTREO}} = 400\text{Hz}$ )
- Acelerómetro triaxial ( $\pm 16\text{g}$ ,  $F_{\text{MUESTREO}} = 400\text{Hz}$ )
- Magnetómetro triaxial ( $\pm 1300\mu\text{T}$ )
- Presión barométrica (300-1100 hPa)
- Humedad
- Temperatura (para calibración)
- Porcentaje de tensión y corriente de alimentación, y tiempo de muestreo

#### Procesamiento de datos interno

- Calibración de sensores
- Algoritmos AHRS (cuaterniones, ángulos de Euler, matrices de rotación, aceleración lineal)

#### Interfaces de comunicación

- USB
- Puerto serie
- WiFi
- Tarjeta micro SD

#### ▪ BNO080

Sistema en chip que integra el acelerómetro, giróscopo y magnetómetro triaxial con un microcontrolador desarrollado por Hillcrest Labs. Sus algoritmos de procesamiento de señales proporcionan precisión en datos en tiempo real de orientación, aceleración y velocidad angular calibradas y más datos de salida de alto nivel. En el TFG, el BNO080 se ha utilizado como dispositivo sometido a evaluación en el capítulo 4, y como dispositivo de pruebas en el capítulo 5. Las principales características técnicas del sensor son:

#### Sensores y adquisición de datos

- Giróscopo triaxial ( $\pm 2000^\circ/s$ , 12-bit)
- Acelerómetro triaxial ( $\pm 8g$ , 16-bit)
- Magnetómetro geomangético triaxial
- Microcontrolador de 32-bit ARM Cortex

#### Procesamiento de datos interno

- Calibración de sensores
- Fusión sensorial (cuaterniones, contador de pasos, clasificación de actividad, detector de vibraciones)

#### Interfaces de comunicación

- I2C
- UART
- SPI
- UART-RVC

#### ▪ BNO055 USB Stick

El dispositivo BNO055 USB Stick, diseñado por BOSCH Sensortec, integra el sensor BNO055 junto con un microprocesador que realiza la fusión de datos y actúa como interfaz al puerto USB. A través del software proporcionado por el fabricante, permite evaluar las prestaciones del sensor BNO055 y realizar las configuraciones del mismo. Para este proyecto, este dispositivo se ha utilizado como ejemplo para entender el funcionamiento de las IMUs. Es uno de los sensores seleccionados para la evaluación realizada en el capítulo 4. Sus principales especificaciones técnicas son:

#### Sensores y adquisición de datos

- Giróscopo triaxial ( $\pm 2000^\circ/s$ , 16-bit)
- Acelerómetro triaxial ( $\pm 16g$ , 14-bit)
- Magnetómetro geomagnético triaxial (resolución de aproximadamente  $0.3\mu T$ )
- Microcontrolador de 32-bit ARM Cortex

#### Procesamiento de datos interno

- Calibración de sensores
- Fusión sensorial (cuaterniones, ángulos de Euler, vectores de rotación, aceleración lineal, vector gravedad)

#### ▪ SHIMMER3

Se trata de un dispositivo diseñado para detección remota y para uso portátil. Destaca por ser altamente flexible y adaptable, y es utilizado con frecuencia en aplicaciones enfocadas a la clasificación de la actividad, el deporte, y las aplicaciones de construcción inteligente. Para este proyecto, la Shimmer3 se ha utilizado para la sección de pruebas comparativas del capítulo 4. Sus principales características técnicas son:

#### Sensores y adquisición de datos

- Giróscopo triaxial ( $\pm 2000^\circ/s$ , 16-bit)
- Dos acelerómetros triaxiales seleccionables (*Low noise*,  $\pm 2g$ ; *Wide range*  $\pm 16g$ )
- Magnetómetro triaxial ( $\pm 49.152$ gauss)
- Sensor de temperatura/presión (resolución de  $0.16Pa/0.01^\circ C$ )
- Microcontrolador de 12-bit 24 MHz

#### Interfaces de comunicación

- Bluetooth
- Almacenamiento en tarjeta microSD de 8GB
- UART

El resto del hardware empleado en el proyecto es el siguiente:

- PC portátil LENOVO G50 i7 2.40 GHz.
- Arduino UNO
  - Microcontrolador: ATmega328
  - Voltaje Operativo: 5v
  - Voltaje de Entrada (Recomendado): 7 – 12 v
  - Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (De las cuales 6 son salidas PWM)
  - Pines de Entradas Análogas: 6
  - Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB es usado por Bootloader.
  - SRAM: 2 KB (ATmega328)
  - EEPROM: 1 KB (ATmega328)
  - Velocidad del Reloj: 16 MHZ.

- OTROS REQUERIMIENTOS

A lo largo del desarrollo del TFG se han utilizado distintas herramientas de trabajo como cintas ajustables para portar las IMUs o la herramienta de Google Maps para calcular distancias. Se han utilizado asimismo documentos de referencia especificados en el apartado de bibliografía.





## V. - PRESUPUESTO

En esta sección se van a exponer todas las partidas presupuestarias necesarias para la realización del TFG. En él se desglosarán tanto los costes del material utilizado, como los gastos indirectos del proyecto de investigación.

### COSTES DEL MATERIAL UTILIZADO

En la tabla 15 se adjunta el desglose de los costes asociados a los dispositivos electrónicos y sensores empleados para la realización del proyecto:

Material	Precio Unitario (€)	Periodo de amortización (años)	Uso (meses)	Coste amortización (€)
BNO055 USB Stick	27.97	3	8	6.21
BNO080	31.28	3	8	6.95
NGIMU	345.82	3	8	76.85
SHIMMER3	428	3	8	95.11
Arduino Uno	24.14	5	8	3.22
LAPTOP LENOVO G50 i7 2.40 GHz	850	3	8	188.89
<b>TOTAL</b>	<b>1657.21 €</b>		<b>TOTAL</b>	<b>277.23 €</b>

Tabla 15: Costes del material utilizado

### COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO

El coste directo debido al tiempo invertido en el proyecto, tanto por labores de investigación como por el desarrollo de código, realización de pruebas y desarrollo de documentos, se muestra en la tabla 16.

Se han empleado aproximadamente 600 horas, de las cuales 150 horas se han invertido en labores de investigación, 150 horas en desarrollo software, 200 horas en realización de pruebas, y 100 horas en la elaboración de la memoria. Se ha asumido un coste estándar como “investigador” de 50 €/h.

Actividad	Tiempo empleado (horas)	Coste (€)
Investigación	150	7500
Desarrollo software	150	7500
Realización de pruebas	200	10000
Documentación	100	5000
<b>TOTAL</b>		30000

Tabla 16: Costes directos del proyecto

### COSTES INDIRECTOS DEL PROYECTO

En la tabla 17 se adjuntan los costes indirectos del TFG, que reflejan los costes que suponen las licencias de los programas y entornos de programación necesarios para el desarrollo del proyecto.

Licencia	Coste (€)	Periodo de amortización (años)	Uso (meses)	Coste amortización (€)
Matlab R2016b Matlab R2018b	2000	2	8	666.67
BOSCH Development Desktop 2.0	0	2	8	0
NGIMU GUI	0	2	8	0
CONSENSYS	0	2	8	0
Arduino IDE	0	2	8	0
Microsoft Office 2016	450	2	8	150
<b>TOTAL</b>	<b>2450</b>		<b>TOTAL</b>	816.67

Tabla 17: Costes indirectos del proyecto

El coste total del TFG de grado se resume en la tabla 18.

Concepto	Coste íntegro del proyecto (€)	Coste de amortización (€)
Coste del material utilizado	1657.21	277.23
Costes directos del proyecto	9000	30000
Costes indirectos del proyecto	2450	816.67
<b>Total (sin IVA)</b>	<b>34107.21</b>	<b>31093.9</b>
<b>Total (IVA incluido 21%)</b>	<b>41269.72</b>	<b>37623.62</b>

*Tabla 18: Coste del proyecto*

Por lo tanto, el importe total estimado del proyecto presente en este trabajo asciende a la cantidad de:

**Treinta y siete mil seiscientos veintitrés euros con sesenta y dos céntimos**

Alcalá de Henares, 1 de julio de 2019.

Firmado: Alejandro Cabezuelo Gutiérrez.

Graduado en Ingeniería Electrónica y Automática Industrial



## VII. - PLANOS

En esta sección se muestra el código de las funciones desarrolladas en Matlab para obtener los ángulos de Euler y para implementar el algoritmo de posicionamiento [R. Cervigón 2017]. Se incluye asimismo el código y el esquema de conexiones desarrollado para Arduino que permite evaluar el sensor BNO080.

### FUNCIÓN DEL ALGORITMO DE ESTIMACIÓN DE ÁNGULOS DE EULER

La función '*Euler\_estimation*' obtiene las tres señales correspondientes a los ángulos de Euler (señal de detección de pasos, señal de orientación y señal de balanceo) a partir de los datos del acelerómetro, giróscopo y tiempo de muestreo, y de unos parámetros de entrada como las constantes de las matrices de ruido del proceso y de medida, y una constante que define la posición/orientación de la IMU.

```
function [ step_signal , orien_signal , balan_signal ] = Euler_estimation(
pos_IMU, AccelerometerXg , AccelerometerYg , AccelerometerZg , GyroscopeXdegs
, GyroscopeYdegs , GyroscopeZdegs , std_Q , std_Euler_1 , std_Euler_2 , Times
, num_samples)

% EULER ESTIMATION WITH AN IMPROVED PREDICTION STAGE.
%
% INPUTS:
% - pos_IMU: constant variable to indicate IMU position (1 for frontal pos, 2
for side pos, 0 for ENU config )
% - 3 axis accelerometer data
% - 3 axis gyroscope data
% - std_Q: process variance noise constant from EKF P matrix
% - std_EULER_1: measurment 1 (Roll) noise variance constant from EKF R matrix
% - std_EULER_2: measurment 2 (Pitch) noise variance constant from EKF R matrix
% - Times: time stamp array
% - num_samples
%
% OUTPUTS:
% - 3 Euler Angles

% COORDINATE SYSTEM SETTING
if pos_IMU == 0 % ENU configuration
    Gyr_X = GyroscopeXdegs;
    Gyr_Y = -GyroscopeYdegs;
    Gyr_Z = -GyroscopeZdegs;
    Acc_X = AccelerometerXg;
    Acc_Y = -AccelerometerYg;
    Acc_Z = -AccelerometerZg;
end

if pos_IMU == 1 % frontal position
    Gyr_X = -GyroscopeZdegs;
    Gyr_Y = -GyroscopeYdegs;
    Gyr_Z = -GyroscopeXdegs;
    Acc_X = -AccelerometerZg;
    Acc_Y = -AccelerometerYg;
    Acc_Z = -AccelerometerXg;
end
```

```

if pos_IMU == 2 % side position
    Gyr_X = GyroscopeYdegs;
    Gyr_Y = -GyroscopeZdegs;
    Gyr_Z = -GyroscopeXdegs;
    Acc_X = AccelerometerYg;
    Acc_Y = -AccelerometerZg;
    Acc_Z = -AccelerometerXg;
end

%degrees to rad
Gyr_X=Gyr_X*pi/180;
Gyr_Y=Gyr_Y*pi/180;
Gyr_Z=Gyr_Z*pi/180;

%Initial conditions
Rolle=0; Piche=0; Yawe=0;
X=[0; 0; 0];

%EKF fixed variables
P=[std_Q^2 0 0;0 std_Q^2 0;0 0 std_Q^2];
Q=P;
H=[1 0 0;0 1 0];
R=[std_Euler_1^2 0;0 std_Euler_2^2];

for i=2:1:num_samples

dt=(Times(i)-Times(i-1));

%Prediction stage

sinRoll=sin(X(1)) ; cosRoll=cos(X(1)) ; tanRoll=tan(X(1)) ;secRoll=sec(X(1));
sinPitch=sin(X(2)); cosPitch=cos(X(2)); tanPitch=tan(X(2));secPitch=sec(X(2));
sinYaw=sin(X(3)) ; cosYaw=cos(X(3)) ; tanYaw=tan(X(3)) ;secYaw=sec(X(3));

X_(1,1)=X(1)+dt*(Gyr_X(i)+Gyr_Y(i)*sinRoll*tanPitch+Gyr_Z(i)*cosRoll*tanPitch)
X_(2,1)=X(2)+dt*(Gyr_Y(i)*cosRoll-Gyr_Z(i)*sinRoll);
X_(3,1)=X(3)+dt*(Gyr_Y(i)*sinRoll/cosPitch+Gyr_Z(i)*cosRoll/cosPitch);

A=[];
A(1,1) = Gyr_Y(i)*cosRoll*tanPitch - Gyr_Z(i)*sinRoll*tanPitch;
A(1,2) = Gyr_Y(i)*sinRoll*secPitch^2 + Gyr_Z(i)*cosRoll*secPitch^2;
A(1,3) = 0;
A(2,1) = -Gyr_Y(i)*sinRoll - Gyr_Z(i)*cosRoll;
A(2,2) = 0;
A(2,3) = 0;
A(3,1) = Gyr_Y(i)*cosRoll*secPitch - Gyr_Z(i)*sinRoll*secPitch;
A(3,2) = Gyr_Y(i)*sinRoll*secPitch*tanPitch +
Gyr_Z(i)*cosRoll*secPitch*tanPitch;
A(3,3) = 0;
A = eye(3) + A*dt;

%Quadrant detector
for j=1:3
    if X_(j)>=pi
        X_(j)=X_(j)-2*pi;
    end
    if X_(j)<=-pi
        X_(j)=X_(j)+2*pi;
    end
end
end
    
```

```
%Update stage: Roll & Pitch
Acc=sqrt(Acc_X(i)^2+Acc_Y(i)^2+Acc_Z(i)^2);

if ((abs(Acc-9.8)<0.1)) %zero acceleration detector
    % Observation vectors: Roll & Pitch with accelerometer
    Z(1,1)=atan(Acc_Y(i)/Acc_Z(i));
    Z(2,1)=atan(-Acc_X(i)/sqrt(Acc_Y(i)^2+Acc_Z(i)^2));

    % Estimation of observation vector:
    h_X_(1,1)=X_(1);
    h_X_(2,1)=X_(2);

    % EKF filter
    [X P]=Filtro_Kalman_Extendido(X_,P,A,H,Z,h_X_,Q,R);
else
    X=X_;
end

%radians to degrees
Rolle(i,1) = X(1)*180/pi;
Pitche(i,1) = X(2)*180/pi;
Yawe(i,1) = X(3)*180/pi;
end

%signal asignment
step_signal = Pitche;
balan_signal = Rolle;
orien_signal = Yawe;

end
```

## FUNCIÓN DEL ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO

La función '*step\_detection\_rel\_pos*' proporciona como datos de salida el número de pasos, la distancia recorrida y los datos de la posición relativa (coordenadas x e y, y orientación).

```
function [ num_steps , distance , x , y , O ] = step_detection_rel_pos( step_signal
, orien_signal , ah , bh , amplitudethreshold, false_zero_threshold, pos_o,
orien_o , num_samples)

% INPUTS:
% - 2 Euler angles (step_signal & orien_signal detection and orientation signal)
% - ah & bh: step length parameters
% - amplitudethreshold(degrees): it establishes the threshold to detect a step
(usually 25)
% - false_zero_threshold(degrees)
% - pos_o: initial position in the map
% - orien_o: initial orientation for the first relative position
% - num_samples
%
% OUTPUTS:
% - num_steps: number of steps detected
% - distance: distance walked (m)
% - x y O : relative position data (x,y axis & orientation)

%% Step detection parameters
min_average=inf;
max_average=-inf;
posmax_average=0;
posmin_average=0;
array_cont=0;
max=0;
cont=0;
initial_semaphore=0; % to firstly detect a max in step signal, min in averaged_step_signal
up=0; down=0;zero=0;num_steps=0;
distance=0;
%% Relative position parameters
x(num_steps+1)=pos_o(1); %x position
y(num_steps+1)=pos_o(2); %y position
O(num_steps+1)=orien_o; %attitude

%% Step detection
for i=2:1:num_samples

    if i>=101 %not considering first 100 samples for step detection

        average(i,1)=mean(step_signal(i-100:i)); %last 100 samples mean
        averaged_step_signal(i,1)=average(i,1)-step_signal(i,1); %removes signal offset.

        if averaged_step_signal(i-1,1)<0 && averaged_step_signal(i,1)>0
            %zero cross detection, rising direction

            zero=zero+1;
            up=1; indicates a rising direction
            down=0;

        end

        if averaged_step_signal(i-1,1)>0 && averaged_step_signal(i,1)<0
            %zero cross detection, descending direction

            if initial_semaphore>=1 zero=zero+1;
            else initial_semaphore=1;

        end

        down=1;
        up=0;

    end

end
```



```

if up==1 && averaged_step_signal(i,1)>max_average
%rising direction and the actual averaged sample is bigger than max average

    %fistly, 'max_average' = 0
    max_average = averaged_step_signal(i,1);
    %actual averaged step signal sample stored in 'max_average'
    posmax_average = i;
    %the position in which the max average is reached is 'i'

end

if down==1 && averaged_step_signal(i,1)<min_average
%descending direction and the actual averaged sample is lower than min average

    % firstly, 'min_average' = 0
    min_average = averaged_step_signal(i,1);
    %actual averaged step signal sample stored in 'max_average'
    posmin_average = i;
    %the position in which the min average is reached is 'i'

end

if zero==2 % two zero cross detection

    if abs(max_average-min_average)>amplitude_threshold

        if max_average>false_zero_threshold && min_average<-false_zero_threshold

            cont=cont+1;
            array_cont=array_cont+1;
            Array_posmax(array_cont)=posmax_average;
            %local max samples i position stored
            Array_posmin(array_cont)=posmin_average;
            %local min samples i position stored

            if cont>=2

                posmax=0;

                for j=Array_posmax(array_cont-1):1:Array_posmax(array_cont)
                    %detect 1 step signal period

                    if step_signal(j)>max
                        %real step signal used for step detection, not averaged one

                        %averaged step signal for zero cross detection
                        max=step_signal(j);
                        %if the actual step signal sample overcomes the previous max, the
                        new max is stored
                        posmax=j; %position in which the max is reached

                    end

                end

                min=max;
                posmin=0;

                %same for local min

                for j=Array_posmin(array_cont-1):1:Array_posmin(array_cont)

                    if step_signal(j)<min

                        min=step_signal(j);
                        posmin=j; %position in which the max is reached

                    end

                end

            end

        end

    end

```



**CÓDIGO DE EVALUACIÓN DEL BNO080 CON ARDUINO**

Código para obtener los datos muestreados por el sensor BNO080 vía I2C y transmitirlos por el puerto serie a una velocidad de 204300 baudios.

```
void setup()
{
  Serial.begin(2*115200);           // set serial speed at 204300 baudios
  Wire.begin();                   // enable I2C communication

  myIMU.begin();
  Wire.setClock(400000);           //Increase I2C data rate to 400kHz
  myIMU.enableAccelerometer(1);    //Send data update every 1ms
  myIMU.enableGyro(1);            //Send data update every 1ms
  Timer1.initialize(1000);         // Timer enabled at 1ms
  Timer1.attachInterrupt(milis);   // Interrupt asociated
}

void milis()
{
  cont++;
  contTs++;

  if (contTs == 10)               // Ts = 10ms
  {
    t = cont*0.001;               // Time stamp (seg)

    // time stamp
    Serial.print(t, 3);
    Serial.print(F(" "));

    // Print Accel data
    Serial.print(Ax, 2);
    Serial.print(F(" "));
    Serial.print(Ay, 2);
    Serial.print(F(" "));
    Serial.print(Az, 2);
    Serial.print(F(" "));

    // Print Gyro data
    Serial.print(Gx, 2);
    Serial.print(F(" "));
    Serial.print(Gy, 2);
    Serial.print(F(" "));
    Serial.print(Gz, 2);
    Serial.println();

    contTs = 0;
  }
}

void loop()
{
  while (myIMU.dataAvailable() == true)
  {
    //Get IMU data at 1 ms
    Ax = myIMU.getAccelX();
    Ay = myIMU.getAccelY();
    Az = myIMU.getAccelZ();
    Gx = myIMU.getGyroX();
    Gy = myIMU.getGyroY();
    Gz = myIMU.getGyroZ();
  }
}
```

## ESQUEMA DE CONEXIONES ENTRE EL BNO080 Y ARDUINO UNO

Esquema de conexiones del sistema de evaluación del BNO080 donde se emplea el microcontrolador Arduino Uno para evaluar el sensor BNO080

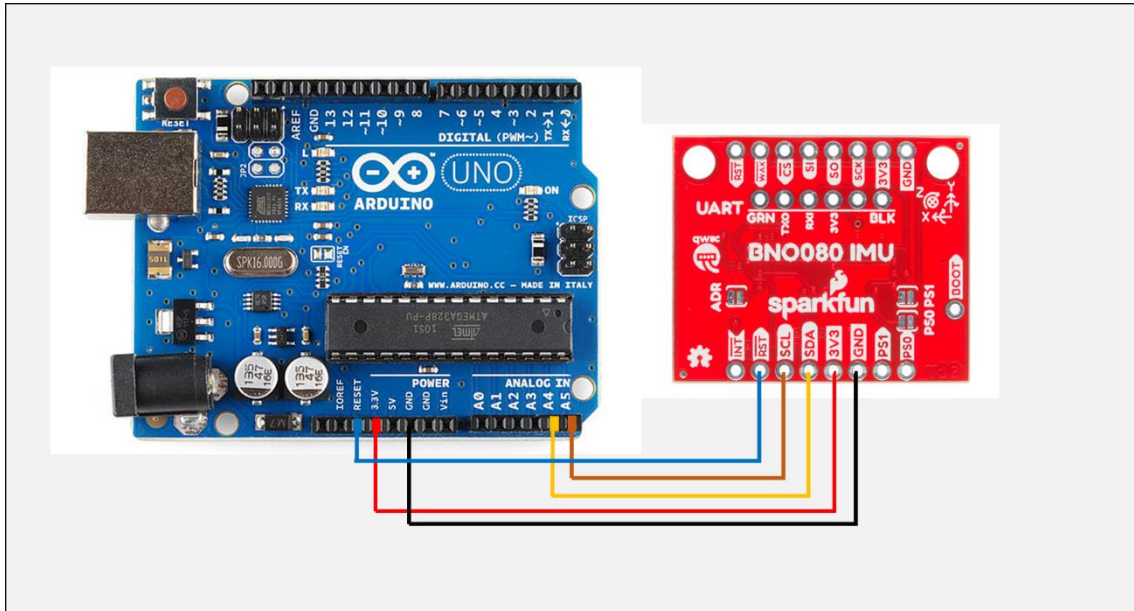


Figura 101: Esquema de conexiones entre Arduino Uno y BNO080

El Arduino uno adquiere los datos del sensor vía I2C a una frecuencia de muestreo fijada, y son enviados desde el microcontrolados al ordenador por puerto serie a una velocidad de 230400 baudios.

## VI. - BIBLIOGRAFÍA

---

1. [Ahmad 2013] N. Ahmad, R. Ariffin Raja Ghazilla, and Nazirah M. Khairi; "Reviews on Various Inertial Measurement Unit Sensor Applications"; International Journal of Signal Processing Systems (2013); Vol1, No. 2; 7 pags.; doi: 10.12720/ijsp.1.2.256- 262.
2. [E. Muñoz 2016] E. Muñoz Díaz; "Inertial Pocket Navigation System for Pedestrians"; PhD Thesis, Universidad de Alcalá, (2016).
3. [Sensors 2015] Quentin Mourcou, Anthony Fleury, Céline Franco, Frédéric Klopčič, and Nicolas Vuillemer; "Performance Evaluation of Smartphone Inertial Sensors Measurement for Range of Motion"; Sensors (2015); 15; 23168-23187; 20 pags.; doi: 10.3390/s150923168.
4. [M. Sabatini 2006] Angelo M. Sabatini; "Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing"; IEEE Transactions on biomedical engineering (2006); Vol. 53, No. 7; 11 pags.; doi: 10.1109/TBME.2006.875664.
5. [EKF 2013] Luis Sanchez , Joan Ordonez, Saba Infante; "Filtro de Kalman extendido y filtro de partículas Kalman extendido para problemas de estimación No Lineal"; Revista Ingeniería(2013); Vol. 20, No. 1; 10 pags.
6. [S. Perez 2018] Sergio Pérez Bachiller; "Implementación Android de algoritmos de fusión sensorial para navegación de personas en espacios interiores extensos mediante el teléfono móvil"; Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Alcalá, (2018).
7. [R Cervigón 2017] Rubén Cervigón Rey; "Implementación de un EKF sobre plataformas Android para posicionamiento de dispositivos portables en espacios interiores a partir de medidas de sensores inerciales"; Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Alcalá, (2017).
8. [Goodrich 2018] Ryan Goodrich; "Accelerometer vs. Gyroscope: What's the Difference?"; <https://www.livescience.com/40103-accelerometer-vs-gyroscope.html> LiveScience, Mayo 2018.
9. [S. Lowry, 2018] Steve Lowry; "What is a magnetometer sensor?"; <https://www.gearbest.com/blog/how-to/what-is-magnetometer-sensor-2866> ; Agosto 2018.
10. [Representación3D] Elena López Guillen, Rafael Barea Navarro; Material docente de la asignatura "Sistema robotizados".
11. [J. Woodman 2007] Oliver J. Woodman; "An introduction to inertial navigation"; University of Cambridge Computer Laboratory (2007); 37 pags; doi: ISSN 1476-2986.
12. [J.L. Ackerman 2007] James L. Ackerman, William R. Proffit, David M. Sarver, Marc B. Ackerman, and Martin R. Keand; "Pitch, roll, and yaw: Describing the spatial orientation of dentofacial traits"; Am J Orthod Dentofacial Orthop (2007); 6 pags.; doi: 10.1016/j.ajodo.2006.05.032.

13. [BMI260] Hojas de características del BMI260 de Bosch Sensortec:  
[https://ae-bst.resource.bosch.com/media/\\_tech/media/product\\_flyer/BST-BMI260-FL000.pdf](https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/product_flyer/BST-BMI260-FL000.pdf)  
Versión 1.0, Octubre 2018.
14. [LSM9DS0] Hoja de características del LSM9DS0;  
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/LSM9DS0.pdf>  
Agosto 2013.
15. [BNO055] Hoja de características del BNO055; Doc: BNO055, BST-BNO055-DS000-14;  
Versión 1.4, Junio 2016.
16. [BNO055 USB Stick] Hoja de características del BNO055 USB Stick; Doc: BST-BNO055-FL000-00; Versión 0.3, Mayo 2014.
17. [BNO080] Hoja de características del BNO080/5;  
<1000-3927%20-%20BNO080%20Datasheet%20v1.6.pdf>  
Versión 1.6, Abril 2019.
18. [NGIMU] Información sobre el NGIMU;  
<http://x-io.co.uk/downloads/NGIMU-User-Manual-v1.3.pdf>  
Versión 1.3, Noviembre 2017.
19. [BioStampRC] Información sobre el BioStampRC;  
<https://www.mc10inc.com/our-products>
20. [BMI055] Hoja de características del BMI055; Doc: BST-BMI055-FL000-02; Versión 1.2,  
Septiembre 2012.
21. [BMI088] Hoja de características del BMI088 de Bosch Sensortec; Doc: BST-BMI088-DS001-13; Versión 1.3, Mayo 2018.
22. [LSM6DS3] Hoja de características del LSM6DS3;  
<https://www.st.com/en/mems-and-sensors/lsm6ds3.html>  
Septiembre 2017.
23. [LSM9DS1] Hoja de características del LSM9DS1;  
[https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/3/7/3/LSM9DS1\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/3/7/3/LSM9DS1_Datasheet.pdf)  
Noviembre 2014.
24. [BMI261] Hoja de características del BMI261; Doc: BST-BMI261-FL000-00; Versión 1.0,  
Octubre 2018.
25. [MTi1] Hoja de características del MTi-1 Series;  
[https://xsens.com/download/pdf/documentation/mti-1/MTi-1-series-datasheet.pdf?\\_ga=2.252642505.1366588535.1560423977-63124028.1560423977](https://xsens.com/download/pdf/documentation/mti-1/MTi-1-series-datasheet.pdf?_ga=2.252642505.1366588535.1560423977-63124028.1560423977)  
Mayo 2019.
26. [BMI263] Hoja de características del BMI263; Doc: BST-BMI263-FL000-00; Versión 1.0,  
Octubre 2018.

27. [SHIMMER3] Datos técnicos sobre el SHIMMER3;  
[http://www.shimmersensing.com/images/uploads/docs/ConsensysPRO\\_Spec\\_Sheet\\_v1.1.0.pdf](http://www.shimmersensing.com/images/uploads/docs/ConsensysPRO_Spec_Sheet_v1.1.0.pdf)  
Versión 1.1, 2017.
28. [MetaMotionRboard] MetaMotionR de Mbientlab;  
<https://mbientlab.com/documents/MetaMotionR-PS3.pdf>  
Versión 0.5, Noviembre 2016
29. [Tech IMU] Información sobre el TECH IMU CV.4;  
<https://www.technaid.com/wp-content/uploads/2016/05/EspecificacionesTecnicasTechIMUCV4ES.pdf>
30. [R. Chow 2011] Raymond Chow; “Evaluating inertial measurement units”; Sensors (2011); 4 pags.
31. [L. Salinas 2015] Conrad L. Salinas Jr; “Kalman Matlab Code: AHRS: EulerGyro”;  
<https://github.com/csalinasonline/KalmanMatlabCode/blob/master/13.ARS/EulerGyro.m>





**ANEXO I**

Tabla completa de datos técnicos de IMUs básicas

FABRICANTE	BOSCH				STM (Adafruit)			
	BMI160	BMI163	BMI088	BMI085	LSM6DS3	LSM9DS0	LSM9DS1	
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	Tipo	MEMS	MEMS	MEMS	MEMS	MEMS	SIP para Arduino	SIP para Arduino
	Tamaño (L x W x H)	2,5 x 3,0 x 0,8 mm	2,5 x 3,0 x 0,8 mm	3 x 4,5 x 0,95 mm	3 x 4,5 x 0,95 mm	2,5 x 3 x 0,83 mm	33mm x 20mm x 2mm	33mm x 20mm x 2mm
	Precio	4,05 €	5,97 €	5,97 €	7,14 \$	19,95 \$	24,95 \$	24,95 \$
	Resolución	16 bit; 0,06 mg/LSB	16 bit; 0,06 mg/LSB	16 bit; 0,09 mg/LSB	16 bit; 0,1 mg	16 bit; 0,98 mg	16 bit	17 bit
	Rango de medida	±2 g; ±16 g	±2 g; ±16 g	±2 g; ±6 g; ±12 g; ±24 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g
	Sensibilidad	16384... 2048 LSB/g	16384... 2048 LSB/g	10240... 1365 LSB/g	16384... 2048 LSB/g	1024... 128 LSB/g	0,061... 0,732 mg/LSB	0,061... 0,732 mg/LSB
	Error offset	±20 mg	±20 mg	±20 mg	±20 mg	±70 mg	±60 mg	±60 mg
	Error ganancia	±0,4 %	±0,4 %	x	x	x	x	x
	Densidad ruido	160 ug/√Hz	160 ug/√Hz	180 ug/√Hz	120 ug/√Hz	150 ug/√Hz	90 ug/√Hz	90 ug/√Hz
	CT offset	±0,25 mg/K	±0,25 mg/K	±1 mg/K	±0,2 mg/K	±1 mg/K	±0,5 mg/°C	±0,5 mg/°C
CT sensibilidad	±0,004 %/K	±0,004 %/K	±0,002 %/K	x	±0,002 %/K	±0,5 mg/°C	±1,5 %/°C	
BW (progr.)	5... 684 Hz	5... 684 Hz	25/32... 1600 Hz	5... 684 Hz	8... 1000 Hz	x	x	
ODR	12,5 Hz... 1,6 kHz	12,5 Hz... 1,6 kHz	12,5 Hz... 1,6 kHz	12,5 Hz... 2 kHz	12,5 Hz... 2 kHz	3,125 Hz... 1,6 kHz	3,125 Hz... 1,6 kHz	
NL	x	x	0,5 %FS	0,5 %FS	0,5 %FS	x	x	
<b>SENSORES</b>	Resolución	16 bits; 0,004 dps/LSB	16 bits; 0,004 dps/LSB	16 bits; 0,004 dps	16 bits; 0,005 dps	16 bits; 0,004 dps	16 bit	17 bit
	Rango de medida	±125... ±2000 dps	±125... ±2000 dps	±125... ±2000 dps	±125... ±2000 dps	±125... ±2000 dps	±245; ±500; ±2000 dps	±245; ±500; ±2000 dps
	Sensibilidad	262,1... 16,4 LSB/dps	262,1... 16,4 LSB/dps	262,1; 131,1; 65,5; 32,8; 16,4 LSB/dps	262,1; 131,1; 65,5; 32,8; 16,4 LSB/dps	262,1; 131,1; 65,5; 32,8; 16,4 LSB/dps	8,75; 17,50; 70 mdps/digit	8,75; 17,50; 70 mdps/digit
	Error offset	±0,5 dps	±0,5 dps	±3 dps	±1 dps	±1 dps	±10 dps	±10; ±15; ±25 dps
	Error ganancia	±0,4 % (con CRT)	±0,4 % (con CRT)	x	x	x	x	x
	Densidad ruido	0,008 dps/√Hz	0,008 dps/√Hz	0,008 dps/√Hz	0,014 dps/√Hz	0,014 dps/√Hz	0,007 dps/√Hz	0,007 dps/√Hz
	CT offset	±0,02 dps/K	±0,02 dps/K	±0,05 dps/K	±0,015 dps/K	±0,015 dps/K	±0,05 dps/°C	±0,05 dps/°C
	CT sensibilidad	±0,02 %/K	±0,02 %/K	±0,02 %/K	x	x	x	x
	BW	11... 751 Hz	11... 751 Hz	25/32... 1600 Hz	5... 684 Hz	12... 323 Hz	12... 230 Hz	x
	ODR	25 Hz... 6,4 kHz	25 Hz... 6,4 kHz	25 Hz... 3,2 kHz	100 Hz... 2 kHz	100 Hz... 2 kHz	12,5 Hz... 1,6 kHz	x
NL	x	x	0,5 %FS	0,5 %FS	0,5 %FS	x	x	
<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	Temperatura de funcionamiento	-45°C... +85°C	-45°C... +85°C	-45°C... +85°C	-45°C... +85°C	-45°C... +85°C	-40°C... +85°C	-40°C... +85°C
	Alimentación	1,7... 3,6 VDD	1,7... 3,6 VDD	2,4... 3,6 VDD	2,4... 3,6 VDD	2,4... 3,6 VDD	1,7... 3,6 V	3,3... 5 VIN
	Consumos	685 uA (full op.)	~700 uA (full op.)	950 uA (full op.)	5,15 mA (full op.)	5,15 mA (full op.)	1,25 mA (full op.)	6,45 mA (full op.)
	¿Magnetómetro?	no	no	no	no	no	no	no
	Buffer/Filo	x	x	1024 byte	no	no	8 kbyte (max)	x
	Interfaces de comunicación	2xSPI; 2xI2C; AUX I/F; OIS I/F; 2xInterrupciones	1xMIP1 IEC; 2xSPI; 2xI2C; 2xInterrupciones	SPI; I2C; 4xInterrupciones	SPI; I2C; 4xInterrupciones	SPI; I2C; 4xInterrupciones	SPI; I2C; 4xInterrupciones	6xSPI; 2xI2C; 4xInterrupciones
	Compatibilidad	x	Especialmente desarrollado para Android	Android 4.4 o superior	x	x	Arduino	Arduino
		Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores; Entorno MIP1 I3C	Escaneado 3D; mapeado interiores; aplicaciones con air mouse; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Drones; Robots industriales; Usos Domésticos (robots limpiadores)	AR/VR; Navegación; Seguimiento movimiento; HMI; OIS/EIS; Medida de orientación/inclinación	Reconocimiento gesto; detección movimiento; smartphones, tablets; Drones, robots; Dead reckoning; OIS; AR/VR; Navegación; Seguimiento actividad	Aplicaciones de orientación en proyectos con Arduino. Datos obtenidos tanto del SIP para Arduino como del MEMS en el que está basado. Disponible en versión Flora (ver datasheet). Tiene sensor de temperatura.
		Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Reconocimiento gesto; actividad; contexto; OS/EIS; AR/VR; PDR; Navegación interiores	Aplicaciones de orientación en proyectos con Arduino. Datos obtenidos tanto del SIP para Arduino como del MEMS en el que está basado. Disponible en versión Flora (ver datasheet). Tiene sensor de temperatura.

**ANEXO II**

Tabla completa de datos técnicos de IMUs con fusión sensorial

FABRICANTE		XSSENS		INERTIAL LABS		HONEYWELL		BOSCH		HILLCRESTLABS / SparkFun		Invensense	
MODELO	MITI 1-7	IMU-P (Tacti cal)	SIP	MEM	BNO055	BNO080/5	MEM	SIP	MEM	SIP	MPU-9250		
<b>CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>	Tipo	PCB	SIP	MEM	SIP	SIP	MEM	SIP	MEM	SIP	SIP		
	Tamaño (L x W x H)	12.1 x 12.1 x 2.55 mm	39 x 45 x 22 mm	4.70 x 4.39 x 1.41 cm	3.8 x 5.2 x 1.13 mm	3.8 x 5.2 x 1.13 mm	3.8 mm x 5.2 mm x 1.1 mm	3.8 x 5.2 x 1.13 mm	3.8 mm x 5.2 mm x 1.1 mm	3.8 x 5.2 x 1.13 mm	3.8 x 5.2 x 1.13 mm		
	Precio	129 €	x	x	12.07 € (27.97 € USB)	10.85 €	7.50 €	10.85 €	7.50 €	7.50 €	7.50 €		
	Resolución	x	x	x	14 bit	14 bit	16 bit	14 bit	14 bit	16 bit	16 bit		
	Rango de medida	±16 g (max)	±8 g; ±15 g; ±40 g	±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g	±2 g; ±4 g; ±8 g; ±16 g		
	Sensibilidad	x	x	x	1 LSB/mg	1 LSB/mg	2 LSB/mg	1 LSB/mg	1 LSB/mg	2 LSB/mg	2 LSB/mg		
	Error offset	x	x	x	±80 mg	±80 mg	±80 mg	±80 mg	±80 mg	±80 mg	±80 mg		
	Error ganancia	x	x	x	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%		
	Densidad ruido	120 µg/√Hz	0.045 m/sec/√Hz (max)	0.1 m/sec/√Hz (max)	150 µg/√Hz (190 mg/√Hz max)	150 µg/√Hz (190 mg/√Hz max)	300 µg/√Hz	150 µg/√Hz (190 mg/√Hz max)	300 µg/√Hz	300 µg/√Hz	300 µg/√Hz		
	CT offset	x	x	x	±1 mg/K	±1 mg/K	±1 mg/K	±1 mg/K	±1 mg/K	±1 mg/K	±1 mg/K		
<b>ACELERÓMETRO</b>	CT sensibilidad	x	x	x	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K		
	Bandwidth	324 Hz (Z: 263 Hz)	260 Hz	x	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz	8 Hz... 1 kHz		
	ODR	0... 800 Hz	2000 Hz	100 Hz/600 Hz; 300 Hz/1800 Hz	x	x	x	x	x	x	0.24... 500 Hz (low power); 4 Hz... 4 kHz (low noise)		
	NL	0.5 %FS	0.015%FS	x	x	x	x	x	x	x	0.50%		
	Bias stability	±0.03 mg	±0.03 mg (max)	±0.08 mg (max)	x	x	x	x	x	x	x		
	Resolución	x	x	x	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit		
	Rango de medida	±2000 dps (max)	±450 ; ±950 dps	±500 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; 2000 dps		
	Sensibilidad	x	x	x	16.0... 900 LSB/dps	16.0... 900 LSB/dps	16.4... 131 LSB/dps	16.0... 900 LSB/dps	16.4... 131 LSB/dps	16.4... 131 LSB/dps	16.4... 131 LSB/dps		
	Error offset	x	x	x	±1 dps	±1 dps	±1 dps	±1 dps	±1 dps	±1 dps	±1 dps		
	Error ganancia	x	x	x	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%		
<b>GIROSCOPIO</b>	Densidad ruido	0.007 dps/√Hz	0.02; 0.08 dps/√Hz	0.5 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz	0.014 dps/√Hz			
	CT offset	x	x	x	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K	±0.015 dps/K			
	CT sensibilidad	x	x	x	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K	±0.03%/K			
	Bandwidth	255 Hz	260 Hz	100 Hz/600 Hz; 300 Hz/1800 Hz	12... 523 Hz	12... 523 Hz	12... 523 Hz	12... 523 Hz	12... 523 Hz	12... 523 Hz			
	ODR	0... 800 Hz	2000 Hz	100 Hz/600 Hz; 300 Hz/1800 Hz	x	x	x	x	x	x			
	NL	0.1 %FS	100; 200 ppm	x	0.05 %FS	0.05 %FS	0.05 %FS	0.05 %FS	0.05 %FS	0.05 %FS			
	Bias stability	±10 d/hr	1; 2 d/hr	±48 d/hr (max)	x	x	x	x	x	x			
	Resolución	0.5 mgauss	x	x	±0.3 µT	±0.3 µT	±0.3 µT	±0.3 µT	±0.3 µT	±0.3 µT			
	Rango de medida	8 gauss	x	x	±16 gauss	±16 gauss	±16 gauss	±16 gauss	±16 gauss	±16 gauss			
	Nº de pines	28	x	x	28	28	28	28	28	28			
<b>MAGNETÓMETRO</b>	Temperatura de funcionamiento	-45°C...+85°C	-45°C...+85°C	45°C...+85°C	-40°C...+85°C	-40°C...+85°C	-40°C...+85°C	-40°C...+85°C	-40°C...+85°C	-40°C...+85°C			
	Alimentación	2.19... 3.6 V	5... 30 V	3... 5.5 V	2.4... 3.6 VDD / 1.7... 3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD / 1.7... 3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD / 1.2... 3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD / 1.2... 3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD / 1.2... 3.6 VDDIO	2.4... 3.6 VDD / 1.2... 3.6 VDDIO			
	Consumos	44 mW a 3V	0.8 W a 5V	<0.4 W	x	x	x	x	x	x			
	Sensores adicionales	x	Inclinómetro (rango: ±90 / ±180d)	x	x	x	x	x	x	x			
	Fusión sensorial	Cuaterniones	Ángulos de Euler	Delta Velocity/Angle direct yaw, pitch, and roll integration.	Quaterniones, Ángulos Euler, vector gravedad	Quaterniones, Ángulos Euler, vector gravedad	Quaterniones, contador de pasos, clasificación de actividad, detector de vibraciones	Quaterniones, contador de pasos, clasificación de actividad, detector de vibraciones	Quaterniones, contador de pasos, clasificación de actividad, detector de vibraciones	Quaterniones, contador de pasos, clasificación de actividad, detector de vibraciones			
	Microcontrolador	Clock; MCU (Xsens)	x	x	32-bit cortex M0+	32-bit cortex M0+	32-bit ARM Cortex	32-bit ARM Cortex	32-bit ARM Cortex	32-bit ARM Cortex			
	Interfaces de comunicación	SPI; I2C; UART (seleccionable)	RS-422/RS-232	CAN2A / CAN2B, SPI	I2C; UART	I2C; UART	I2C; SPI; UART-RVC	I2C; SPI; UART-RVC	I2C; SPI; UART-RVC	I2C; SPI; UART-RVC			
	Compatibilidad OS	x	x	x	Windows 8 y superior	Windows 8 y superior	Android, Arduino	Android, Arduino	Android, Arduino	Android, Arduino			
	<b>APLICACIONES</b>	Drones de logística, grabación, UAVs; Maquinaria; Navegación; VR/AR; HDMIs; PDR	Sistemas de estabilización de antenas, MRU, MGS, INS, AHRS; Navegación en coches, barcos, trenes, UAVs	Entornos industriales	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks	Navegación, Robotica, Deportes, VR/AR, Tablets y Ultrabooks			
		Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento	Salud, monitorización, posicionamiento			

**ANEXO III**

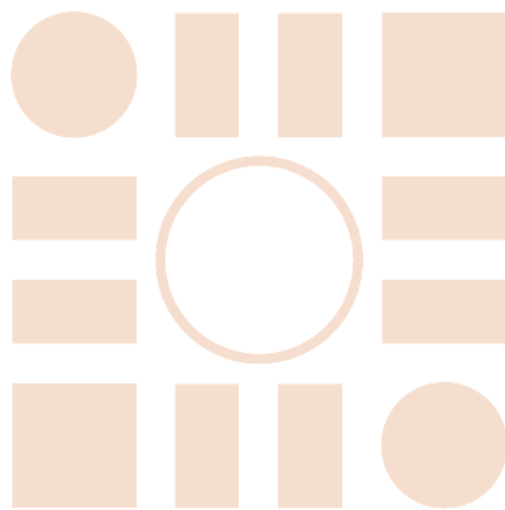
Tabla con todas las IMUs analizadas en el Trabajo de Fin de grado clasificadas como IMUs avanzadas.

FABRICANTE	MODELO	MetaTracker (MTR)	MetaMotion R board	MCIO	TECH IMU V.4	TECH IMU CV.4	SHIMMER	IO TECHNOLOGIES	XSENS
CARACTERÍSTICAS GENERALES	Tipo	52mm x 35mm x 15mm	29 x 18 x 6 mm	IMU Adherible	IMU Comercial/Integrada	TECH IMU CV.4	IMU Comercial / Integrada	NGIMU	IMU Comercial / Integrada
	Tamaño (L x W x H)	60,99 \$ (Tracker Eval Kit)	75,99 \$	6,6 x 3,4 x 0,3 cm	36 x 26 x 11 mm	36x 26x 8 mm	51 x 34 x 14 mm	56 x 39 x 18 mm	47 x 30 x 13 mm
	Precio	16-bit	16-bit	< 1500 \$ (9000,5 max)	x	x	359 €	310 €	400 €
	Resolución	±2.6; ±4g; ±8g; ±16 g	±2.6; ±4g; ±8g; ±16 g	5 mg	0.122 mg	0.122 mg	14-bit	490 µg	x
	Rango de medida	16384; 8192; 4096; 2048 LSB/g	16384; 8192; 4096; 2048 LSB/g	±16 g	±4.6; ±8g; ±16 g	±4.6; ±8g; ±16 g	±2.6; ±4g; ±8g; ±16 g	±16 g	±16 g
	Sensibilidad	±40 mg	x	x	x	x	1571 LSB/g ± 42 g	x	x
	Error offset	180 µg/VHz	x	x	x	x	125 µg/VHz (low noise accelerometer)	x	x
	Densidad ruido	±1.0 mg/K	x	x	x	x	x	x	x
	CT offset	±0.03 %/K	x	x	x	x	x	x	x
	CT sensibilidad	25/32... 1600 Hz	x	x	15.625; 31.25; 62.5; 125; 250Hz ±3%	x	400 Hz (frec. muestreo)	x	x
SENSORES	Bandwidth	12.5 Hz... 1.6 kHz	x	x	x	x	x	x	1000 Hz
	ODR	0.5 %FS	x	x	x	x	x	x	x
	NL	16-bit	16-bit	x	x	x	16-bit	x	x
	Resolución	±125; ±250; ±500; ±1000; ±2000 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; ±2000 dps	±2000 dps	±2000 dps	0.06 dps	0.06 dps	±125; ±250; ±500; ±1000; ±2000 dps	±2000 dps
	Rango de medida	262.4; 131.2; 65.6; 32.8; 16.4 dps	16.0... 900 LSB/dps	x	x	x	x	131LSB/dps at ±250dps	x
	Sensibilidad	±3 dps	±1 dps	x	x	x	x	x	x
	Error offset	0.008 dps/VHz	x	x	x	x	0.1 dps	x	x
	Densidad ruido	±0.015 dps/K	x	x	x	x	1 d RMS max	x	x
	CT offset	±0.02 %/K	x	x	x	x	x	x	x
	CT sensibilidad	25/32... 1600 Hz	x	x	15.625; 31.25; 62.5; 125; 250 Hz 45%	500 Hz max	500 Hz max	51.2 Hz (frec. Muestreo)	400 Hz
MAGNETÓMETRO	Bandwidth	25 Hz... 3.2 kHz	x	x	x	x	x	x	x
	ODR	0.1 %FS	x	x	x	x	x	x	x
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	Resolución	x	0.3µT	x	0.092 µT	0.092 µT	16-bit	-0.3µT	x
	Rango de medida	x	±1300µT (x,y, axis)	x	±810 µT	±810 µT	±99.332 µT	±1310 µT	±1.9 Gauss
	Temperatura de funcionamiento	-45°C...+85°C	-45°C...+85°C	0°C...+85°C	x	x	-45°C...+85°C	-45°C...+85°C	0°C...+50°C
	Batería	Streaming mode-8h-24h, recording mode: 2h-48h	100 mAh	Batería recargable 15 mAh; Recarga inalámbrica (13.56 MHz); 36 horas	Alimentado a 3.3 - 4 V	x	450mAh	1000 mAh	6 horas de autonomía
	Almacenamiento	4MB NOR Flash memory	4MB NOR Flash memory	256Mbit (32MB) Memory Capacity	x	x	Tarjeta microSD de 8GB	Tarjeta microSD	x
	Sensores adicionales	Temperatura (0.01 °C de resol., 0.001 - 50 Hz), Presión (300 - 1100 hPa), Humedad, Luz ambiente	Presión, Humedad Temperatura, Luz ambiente	Waterproof(1m) Electrodes (1CH)	Temperatura (calibración)	Temperatura (calibración)	Acelerómetro Low noise, sensor de T/ presión	Presión, Humedad Temperatura (para calibración)	Presión, Humedad Temperatura (para calibración)
	Fusión sensorial	Calibración de sensores	Ángulos de Euler Cuaterniones Aceleración lineal	x	Datos físicos en 3D, Cuaterniones, Matriz de Cosenos Directores (DCM), Incluye EKF	Datos físicos en 3D, Cuaterniones, Matriz de Cosenos Directores (DCM), Incluye EKF	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación Aceleración lineal	Cuaterniones Ángulos de Euler Matrices de rotación
	Interfaces de comunicación	Bluetooth Low Energy Smart I2C + SPI + 2GPIOS	Bluetooth LE 4.2 - 2.4 GHz	Bluetooth Smart (BLE), IP-7	Comunicación CAN, USB	Comunicación CAN, USB, Tech-MCS	UART, Bluetooth	Wi-Fi, Puerto serie, USB	USB
	Prestaciones adicionales	Software del fabricante disponible y aplicación para smartphones	Software del fabricante disponible y aplicación para smartphones	Diseño flexible y puntero en tecnología. Incluye un avanzado sistema de análisis	Precisión en datos en condiciones ambientales variables y bajo otras perturbaciones. Diseñado para captura de movimiento Tech-MCS	Precisión en datos en condiciones ambientales variables e incluso bajo agua	Software del fabricante avanzado, análisis ECG	Software del fabricante disponible y diseño compacto	Software del fabricante disponible. Recibe datos a través de una estación receptora
	APLICACIONES	Monitorización del movimiento en tiempo real y registro	AR/VR, smartwatches, fitness bands, audio headsets Smartphones, tablets Ultrabooks, robotics	Especializado en medicina y salud	Entornos acuáticos, biomecánica, Análisis de la marcha, Deportes, Ergonomía, Captura de Movimiento, VR/AR, Robots de navegación autónoma	Entornos acuáticos, biomecánica, Análisis de la marcha, Deportes, Ergonomía, Captura de Movimiento, VR/AR, Robots de navegación autónoma	Monitorización de la actividad, deportes, aplicaciones de construcción inteligente	Monitorización de actividad	Ergonomía, salud, deportes, biomecánica, VR, Robótica





Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá