



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Dispositivo de captura de movimiento basado  
en sensores inerciales con comunicación  
inalámbrica

Autor/es

Miguel Ángel Aparicio Pérez

Director/es

Roberto Casas Nebra

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2015



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. Miguel Ángel Aparicio Pérez

con nº de DNI 73004582Y en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Máster, (Título del Trabajo)

Dispositivo de captura de movimiento basado en sensores inerciales con comunicación inalámbrica

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 19 de Noviembre de 2015

Fdo: Miguel Ángel Aparicio Pérez

*A mi familia y amigos*



## AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todos aquellos que han colaborado en la realización de este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar me gustaría agradecer a Roberto Casas Nebra, director de este trabajo, su apoyo y dedicación durante este año.

En segundo lugar, agradecer a Ángel Asensio, compañero de departamento de Roberto, el tiempo dedicado en resolver las diferentes dudas que me han ido surgiendo durante la elaboración del Trabajo Fin de Máster.

Deseo agradecer también el apoyo recibido por parte de mi novia, familia y amigos.

Mi agradecimiento a todos los integrantes del laboratorio en la Universidad de Zaragoza por la ayuda recibida y el material prestado.

A todos ellos, gracias.



## RESUMEN

El objetivo de este proyecto es disponer de un prototipo de sistema que permita capturar datos de movimiento y enviarlos de modo inalámbrico a otro dispositivo abordando los siguientes temas: Captura de movimiento, protocolos de comunicación inalámbrica (bajo consumo), programación de sistemas embebidos y desarrollo de prototipos electrónicos.

Este nuevo prototipo puede ser de gran utilidad para el desarrollo de nuevas aplicaciones relacionadas con el análisis del movimiento en varias ramas, como por ejemplo, la medicina, el deporte, la vigilancia inteligente, etc.

El dispositivo recibe los datos del sensor BNO055 de Bosch mediante comunicación I2C. Este sensor integra un acelerómetro, un magnetómetro y un giroscopio e incluye algoritmos de integración capaces de calcular diferentes representaciones de posición como ángulos de Euler.

Los datos obtenidos por el sensor son recibidos en una placa para posteriormente ser procesados y enviados a otro dispositivo mediante comunicación inalámbrica. El protocolo de comunicación inalámbrica utilizado en este trabajo para enviar los datos recibidos por el sensor ha sido Bluetooth 4.0 y para ello, este dispositivo ha sido desarrollado en la placa nRF51-DK de Nordic Semiconductors.

Para llevar a cabo este dispositivo, se ha programado la placa en lenguaje C para recibir los datos del sensor mediante comunicación I2C y enviarlos simultáneamente mediante comunicación Bluetooth. Para ello, se ha creado un perfil Bluetooth con un servicio personalizado que contiene dos características. Mediante la primera característica se envían los datos del acelerómetro, magnetómetro y giroscopio en los tres ejes en una cadena de 18 bytes (2 bytes por sensor y eje) y mediante la segunda, los ángulos de Euler en una cadena de 6 bytes (2 bytes por eje). Adicionalmente, se han integrado cuatro servicios estándar con el fin de enviar el porcentaje de carga de la batería e información sobre el dispositivo y los parámetros de conexión.

Por último, se ha diseñado una PCB integrando dos módulos. Uno de ellos contiene el SoC (System on a Chip) nR51822 (el mismo que integra la placa nRF51-DK) y el otro integra el sensor BNO055.

Para realizar las pruebas se ha utilizado la aplicación Master Control Panel de Nordic, una herramienta que permite escanear y explorar los dispositivos Bluetooth y comunicarse con ellos. Para comunicar la placa con la aplicación en el PC se ha utilizado el dispositivo nRF51 Dongle.



## ÍNDICE

1.	Introducción .....	14
1.1.	Marco del trabajo .....	14
1.2.	Objetivo del proyecto.....	14
1.2.1.	Motivación .....	14
1.2.2.	Objetivos .....	15
1.3.	Contenido de la memoria .....	15
2.	Estado del arte .....	17
2.1.	Tecnología de un nodo sensor .....	17
2.2.	Bluetooth.....	18
2.3.	Sensor inercial.....	19
2.4.	Dispositivos de captura de movimiento más recientes .....	20
2.5.	Aplicaciones y monitorización del movimiento .....	25
3.	Estudio comparativo sobre la tecnología a seleccionar.....	28
3.1.	Estudio comparativo sobre los módulos BLE.....	28
3.2.	Estudio comparativo sobre sensores .....	30
3.3.	Comparación de alternativas y selección del hardware .....	31
3.4.	Ventajas de la solución escogida y estimación del consumo.....	31
4.	Resultados .....	33
4.1.	Hardware seleccionado .....	33
4.1.1.	nRF51822.....	33
4.1.2.	BNO055 .....	33
4.2.	Conexión de los componentes .....	34
4.2.1.	Diagrama de bloques.....	34
4.2.2.	Conexiones .....	35
4.3.	Desarrollo del firmware .....	35
4.3.1.	Librerías utilizadas .....	36
4.3.2.	APIs utilizadas.....	36
4.3.3.	Flujo del firmware .....	40
4.4.	Perfil BLE desarrollado .....	41
4.4.1.	Servicio de Acceso Genérico .....	42
4.4.2.	Servicio de Atributo Genérico.....	43
4.4.3.	Servicio de Lectura de datos del sensor .....	43
4.4.4.	Servicio de Nivel de la batería .....	44
4.4.5.	Servicio de Información del dispositivo.....	44
4.5.	Interpretación de los datos .....	45

4.5.1.	Servicio de Acceso genérico .....	45
4.5.2.	Servicio de Atributo genérico .....	47
4.5.3.	Servicio de Lectura de datos del sensor .....	47
4.5.4.	Servicio de Nivel de la batería .....	51
4.5.5.	Servicio de Información del dispositivo.....	52
4.6.	Diseño de la PCB .....	53
4.7.	Pruebas funcionamiento del hardware .....	54
5.	Conclusiones .....	58
6.	Futuros trabajos .....	59
7.	Bibliografía.....	60
Anexo A: Herramientas utilizadas.....		62
A.1.	Hardware.....	62
A.1.1.	Placa de desarrollo nRF51-DK .....	62
A.1.2.	BNO055 Shuttle Board .....	63
A.1.3.	Whaveshare Mini nRF51822 .....	63
A.1.4.	BNO055 Module .....	63
A.1.5.	nRF51 Dongle .....	64
A.2.	Software .....	65
A.2.1.	Keil uVision 5 .....	65
A.2.2.	Tera Term.....	65
A.2.3.	Master Control Panel 3.8.0.....	65
A.2.4.	Altium Designer .....	66
Anexo B - Bluetooth Low Energy .....		67
B.1.	Perfil de Acceso Genérico (GAP).....	67
B.1.1.	Roles.....	67
B.1.2.	Advertising .....	68
B.1.3.	Escaneado.....	68
B.1.4.	Iniciación.....	68
B.1.5.	Conexión .....	69
B.2.	Perfil de Atributo Genérico (GATT) .....	69
B.2.1.	Roles.....	69
B.2.2.	Jerarquía GATT.....	69
B.2.3.	Servicios y características estándar y personalizados .....	71
B.2.4.	UUIDs .....	71
B.2.5.	Operaciones y propiedades.....	72
B.3.	Bluetooth VS Bluetooth Low Energy .....	73
Anexo C - Planos de la PCB.....		76

C.1. Esquemático.....	76
C.2. Serigrafía TOP Layer.....	77
C.3. TOP Layer.....	78
C.4. Bottom Layer .....	78
C.5. Plano de taladros .....	79
Anexo D - Presupuesto .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Diagrama de bloques de un nodo sensor.....	17
Fig. 2 - Bluetooth 4.0.....	19
Fig. 3 - Diagrama de bloques del dispositivo diseñado en [3] .....	20
Fig. 4 - Cálculo de la longitud de paso mediante los ángulos de Euler.....	23
Fig. 5 - Posicionamiento de los sensores para la medición de los ángulos de las articulaciones .....	25
Fig. 6 - Posicionamiento de los sensores para el cálculo del ángulo de flexión de la rodilla.....	26
Fig. 7 - Posicionamiento de los sensores para el reconocimiento de gestos .....	27
Fig. 8 - Estudio experimental realizado en [28] para la determinación de la duración de la batería en los iBeacon de cada fabricante.....	29
Fig. 9 - Duración de la batería en meses de cada chip BLE .....	29
Fig. 10 - Medidas generadas en el BNO055.....	33
Fig. 11 - Diagrama de bloques interno del BNO055 .....	34
Fig. 12 - Diagrama de bloques del hardware del prototipo fabricado .....	34
Fig. 13 - Conexiones del prototipo fabricado .....	35
Fig. 14 - Diagrama de flujo del firmware .....	41
Fig. 15 - Servicios mostrados en Master Control Panel .....	41
Fig. 16 - Características del servicio de Acceso genérico .....	46
Fig. 17 - Características del servicio de Atributo genérico .....	47
Fig. 18 - Características del servicio de Lectura de datos del sensor .....	51
Fig. 19 - Curva de descarga de la pila CR2032.....	51
Fig. 20 - Aproximación lineal de la curva de descarga de la pila CR2032 .....	52
Fig. 21 - Características del servicio de Nivel de batería .....	52
Fig. 22 - Características del servicio de Información del dispositivo .....	53
Fig. 23 - Diseño final de la placa del prototipo .....	53
Fig. 24 - Código añadido para la conversión de los ángulos de Euler .....	54
Fig. 25 - Representación de los ángulos de Euler en los ejes X/Y/Z .....	54
Fig. 26 - Posicionamiento de la placa a 0° en el eje Yaw.....	55
Fig. 27 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 0° en el eje Yaw .....	55
Fig. 28 - Posicionamiento de la placa a 90° en el eje Yaw .....	55

Fig. 29 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 90° en el eje Yaw .....	55
Fig. 30 - Posicionamiento de la placa a 180° en el eje Yaw .....	56
Fig. 31 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 180° en el eje Yaw ...	56
Fig. 32 - Posicionamiento de la placa a 270° en el eje Yaw .....	56
Fig. 33 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 270° en el eje Yaw ...	56
Fig. 34 - Posicionamiento de la placa a 360° en el eje Yaw .....	57
Fig. 35 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 360° en el eje Yaw ...	57
Fig. 36 - Placa de desarrollo nRF51-DK .....	62
Fig. 37 - BNO055 Shuttle Board .....	63
Fig. 38 - Whaveshare Mini nRF51822 .....	63
Fig. 39 - BNO055 Module.....	64
Fig. 40 - nRF51 Dongle.....	64
Fig. 41 - Capas protocolo BLE.....	67
Fig. 42 - Tabla de atributos BLE .....	70
Fig. 43 - Pila de protocolos BLE .....	73
Fig. 44 - Estados de la capa de enlace Bluetooth y BLE.....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tab. 1 - Características de los dispositivos de captura de movimiento más recientes ...	22
Tab. 2 - Características de los chips BLE más destacados .....	28
Tab. 3 - Características de los sensores más destacados .....	30
Tab. 4 - Servicios y características desarrollados .....	42
Tab. 5 - Características del servicio de Acceso genérico .....	42
Tab. 6 - Características del servicio de Atributo genérico .....	43
Tab. 7 - Características del servicio de Lectura de datos del sensor .....	43
Tab. 8 - Características del servicio de Nivel de batería .....	44
Tab. 9 - Características del servicio de Información del dispositivo.....	44
Tab. 10 - Valores de la característica Parámetros de conexión .....	45
Tab. 11 - Cadena de bytes enviada por la característica Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro.....	47
Tab. 12 - Registros del sensor donde se obtienen los datos de aceleración, velocidad angular y campo magnético.....	48
Tab. 13 - Configuración establecida para cada uno de los sensores que forman el BNO055.....	48
Tab. 14 - Unidades de la aceleración, velocidad angular y campo magnético.....	49
Tab. 15 - Tipo de datos de la aceleración, velocidad angular y campo magnético .....	49
Tab. 16 - Cadena de bytes enviada por la característica Ángulos de Euler.....	50
Tab. 17 - Registros del sensor donde se obtienen los ángulos de Euler .....	50
Tab. 18 - Unidades de los ángulos de Euler .....	50
Tab. 19 - Tipo de datos de los ángulos de Euler.....	50
Tab. 20 - Valores de la característica Nivel de batería.....	51
Tab. 21 - Relación Voltaje/Porcentaje de la aproximación lineal de la curva de descarga de la pila CR2032 .....	52
Tab. 22 - Presupuesto .....	80

## 1. Introducción

### 1.1. Marco del trabajo

Este Trabajo Fin de Máster aborda el diseño de un prototipo de sistema que permita capturar datos de movimiento y enviarlos de modo inalámbrico. Para ello se han abordado temas como la captura del movimiento, protocolos de comunicación inalámbrica de bajo consumo, programación de sistemas embebidos y desarrollo de prototipos electrónicos.

Ha sido realizado bajo la dirección de Roberto Casas, profesor titular del departamento de Electrónica y comunicaciones de la Universidad de Zaragoza y con la colaboración de Ángel Asensio.

El proyecto ha sido desarrollado entre Diciembre de 2014 y Diciembre de 2015.

### 1.2. Objetivo del proyecto

#### 1.2.1. Motivación

Gran parte de los dispositivos actuales que capturan datos de movimiento y los envían mediante comunicación inalámbrica, utilizan baterías recargables. El motivo de uso de las mismas, es que, estos dispositivos disponen de una autonomía reducida. Si el dispositivo es utilizado constantemente, resulta incómodo, de cara al usuario, el hecho de estar continuamente cargando la batería cuando ésta se agota. Además, estos dispositivos no suelen indicar el nivel de carga de la batería. Resultaría de gran utilidad y comodidad, que estos dispositivos dispusieran de más autonomía e indicaran el nivel de carga de la batería, para conocer con la suficiente antelación cuando es necesario un recambio de la misma.

Por otra parte, en este tipo de dispositivos, resulta habitual el hecho de que los ángulos de Euler se calculen en un microprocesador externo al sensor, mediante los algoritmos necesarios a partir de los datos obtenidos por los sensores. Esto puede ocasionar la imprecisión de la medida calculada debido a un ajuste inexacto de la frecuencia de muestreo o de los pesos del algoritmo para el acelerómetro, el giroscopio y el magnetómetro. Para la mayoría de las aplicaciones en las que se utiliza este tipo de dispositivos, se requiere de una gran precisión en la medida de los ángulos de Euler.

La motivación de este proyecto surge de la necesidad de desarrollar un prototipo de sistema en el que se trate de mejorar tanto la autonomía como la precisión de los ángulos de Euler respecto a los dispositivos actuales.

### 1.2.2. Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster es disponer de un prototipo de sistema, que permita capturar datos de movimiento y enviarlos de modo inalámbrico a otro dispositivo como puede ser un ordenador o un teléfono móvil. Dicho dispositivo tendría una aplicación capaz de tratar estos datos recibidos.

Mediante la realización de este proyecto se va a tratar de mejorar la autonomía respecto a los dispositivos actuales. Para ello se va a utilizar como módulo de comunicaciones un protocolo de bajo consumo como lo es Bluetooth Low Energy. Además, se va a tratar de conseguir que el dispositivo pueda informar sobre el porcentaje de carga de la batería mediante la integración de un servicio Bluetooth.

Para ello se propuso cumplir, en orden, los siguientes objetivos parciales:

- Estudio comparativo sobre la tecnología a seleccionar.
- Estimación de consumo de la tecnología seleccionada y comparación con otros dispositivos.
- Realizar un estudio inicial sobre el hardware a utilizar: Búsqueda de información, leer documentación de dispositivos, guías técnicas de los diferentes hardware a utilizar (nRF51-DK, nRF51 Dongle, BNO055).
- Familiarización con Keil uVision 5 (Entorno de desarrollo).
- Familiarización con la placa nRF51-DK.
- Familiarización con el sensor BNO055.
- Integración del sensor con la placa y puesta a punto.
- Diseño de la PCB.
- Elaboración de la documentación.

### 1.3. Contenido de la memoria

En el capítulo de introducción se indica el marco del trabajo y se hace especial hincapié en la motivación y los objetivos.

En el estado del arte se pretende realizar un breve estudio sobre la tecnología que compone un nodo sensor, el protocolo de comunicaciones Bluetooth y los sensores inerciales. Además, se referencian los dispositivos de captura de movimiento más recientes, especificando sus aspectos más importantes como los componentes que lo forman, los consumos y las aplicaciones de los mismos. Por último, se realiza un estado del arte sobre las aplicaciones de estos dispositivos y la monitorización del movimiento.

En el capítulo tres, se realiza un estudio comparativo de los diferentes módulos de comunicaciones y sensores más destacados del mercado y se mencionan las ventajas de los componentes seleccionados para el desarrollo del prototipo.

Posteriormente, en el capítulo cuatro, se indican los resultados de la realización del proyecto, detallándolo tanto a nivel de hardware como de software.



En el capítulo cinco se indican las conclusiones de la realización de este proyecto y los diferentes objetivos logrados.

A continuación, en el capítulo seis, se indican los posibles futuros trabajos a desarrollar sobre el prototipo diseñado y las aplicaciones para las que puede ser utilizado.

En el capítulo siete, se citan todas las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del proyecto.

Por último, se detalla en los cuatro anexos que componen la memoria, la tecnología BLE, las herramientas utilizadas en este proyecto, los planos de la PCB diseñada y el presupuesto.

## 2. Estado del arte

### 2.1. Tecnología de un nodo sensor

Como se ha mencionado anteriormente, un sensor inercial mide aceleración, velocidad angular y campo magnético en todos los ejes y direcciones. El nodo sensor tiene que tener la potencia de cálculo necesaria para procesar todas estas mediciones en tiempo real, filtrar ruidos y calcular otras medidas producidas a partir de la fusión de las medidas de los sensores. Por último, el nodo sensor transmite todos estos resultados de forma inalámbrica a un dispositivo electrónico para su posterior análisis.

El nodo sensor es controlado por el microprocesador, que se ocupa de las interacciones con el sensor de movimiento y envía los resultados a través del módulo de comunicaciones inalámbrico. Durante el encendido del nodo sensor, el microprocesador ejecuta los pasos correspondientes para inicializar el sensor de movimiento y el módulo de comunicaciones, preparándolos para la recolección y transmisión de datos. Una vez que la inicialización se ha completado, el microprocesador entra en un bucle infinito leyendo continuamente datos desde el sensor de movimiento y procesándolos para su posterior envío a través del módulo de comunicaciones.

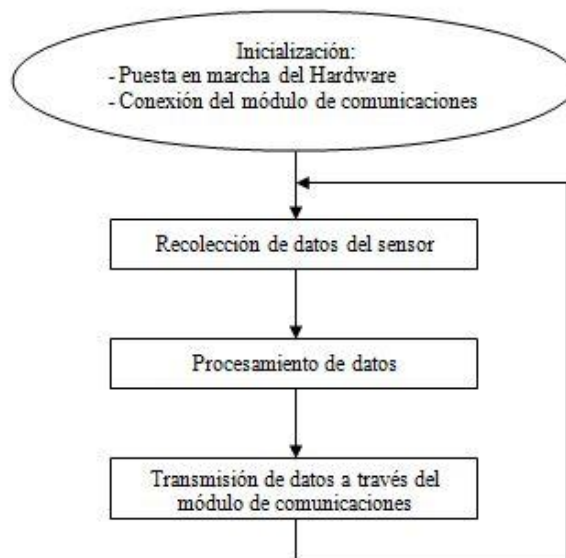


Fig. 1 - Diagrama de bloques de un nodo sensor

Como hemos indicado en los dos párrafos anteriores, el hardware de un nodo sensor suele componerse de los siguientes componentes:

- Microprocesador: La función del microprocesador es obtener los datos de los sensores de movimiento, para su posterior procesamiento y envío a través del módulo de comunicaciones. Es necesario seleccionar un microprocesador con una gran capacidad de procesamiento y cálculo para procesar una gran cantidad de

resultados de los diferentes sensores en tiempo real. Aún más importantes son todos estos requisitos si se van a obtener medidas a partir de la fusión de sensores.

- Sensor de movimiento: El nodo sensor debe componerse de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro en los tres ejes. Estos sensores deben ser lo más precisos posibles ya que su efecto se verá visualizado en las posteriores aplicaciones realizadas con el nodo sensor.
- Módulo de comunicaciones inalámbrico: Las aplicaciones más demandadas para la monitorización del movimiento requieren de un módulo de comunicaciones inalámbrico. De lo contrario, siempre sería necesario disponer de un ordenador portátil u otro dispositivo conectado al nodo sensor mediante cables. Dependiendo de la aplicación a desarrollar con el nodo sensor, el bajo consumo suele ser un aspecto muy importante a la hora de seleccionar el módulo de comunicaciones inalámbrico.

## 2.2. Bluetooth

La tecnología Bluetooth es el estándar inalámbrico que permite una conectividad segura entre diferentes dispositivos. Fue creada en 1994 por Ericsson y se concibió como una alternativa inalámbrica para los cables de datos RS-232. Intercambia datos en distancias cortas utilizando las transmisiones de radio y opera en la banda (ISM) de 2,4 a 2,485 GHz utilizando un amplio espectro y saltos de frecuencia, con posibilidad de transmitir en full-dúplex con un máximo de 1600 saltos por segundo.

La tecnología inalámbrica Bluetooth está integrada en millones de productos, desde automóviles y teléfonos móviles hasta dispositivos y equipos médicos e incluso en tenedores y cepillos de dientes. Permite compartir voz, datos, música, fotos, videos y otra información de forma inalámbrica entre dispositivos vinculados.

En 1994 un grupo de ingenieros de Ericsson, inventó una tecnología de comunicación inalámbrica, más tarde llamada Bluetooth. En 1998, el grupo original de las empresas promotoras Ericsson, Intel, Nokia, Toshiba e IBM, se unieron para formar el Bluetooth Special Interest Group (SIG). Dado que ninguna compañía es la propietaria de la tecnología, las empresas miembros del SIG trabajan juntas para conservar y mejorar aún más la tecnología Bluetooth.

El nombre de "Bluetooth" viene del siglo X del rey danés Harald Blåtand o Harold Bluetooth en Inglés. El rey Blåtand ayudó a unir facciones enfrentadas en algunas partes de lo que hoy son Noruega, Suecia y Dinamarca. Del mismo modo, la tecnología Bluetooth se creó como un estándar abierto para permitir la conectividad y la colaboración entre productos dispares e industrias.

Los teléfonos móviles, la radio FM y la televisión utilizan ondas de radio para enviar información de forma inalámbrica. La tecnología Bluetooth también utiliza ondas de radio, pero las transmite a una distancia más corta. Las radios y televisiones transmiten información durante kilómetros mientras que la tecnología Bluetooth envía información dentro de su red

de área personal o "PAN" (también conocido como su propio espacio personal) a distancias de hasta 100 metros dependiendo del momento de la aplicación del dispositivo.

Bluetooth fue originalmente destinado a ser un sustituto inalámbrico para los cables de los teléfonos, auriculares, teclados y ratones. La tecnología Bluetooth ahora va mucho más allá de eso. Está trayendo dispositivos de uso cotidiano en un mundo digital e interconectado. En el mercado de la salud y el fitness, los casos de uso varían ampliamente, desde los sensores que monitorizan los niveles de actividad en dispositivos médicos y de bienestar, como un glucómetro, un inhalador o un cepillo de dientes. Los smartphones, PCs y tabletas más vendidos, son compatibles con la tecnología Bluetooth.

Bluetooth Smart y Bluetooth Smart Ready son extensiones de la marca original Bluetooth introducidas en 2011. Las denominaciones Smart y Smart Ready indican compatibilidad con los productos que utilizan la función de bajo consumo de la especificación Bluetooth v4.0. Un producto Bluetooth Smart Ready se puede conectar tanto a los productos Bluetooth clásicos como a los productos Bluetooth Smart de bajo consumo. Un producto Bluetooth Smart puede estar recopilando datos y en ejecución durante meses o años con una pequeña batería.

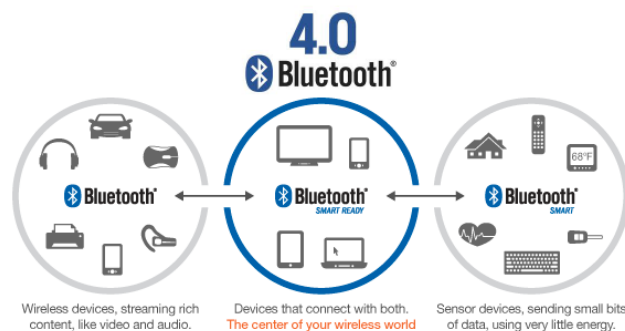


Fig. 2 - Bluetooth 4.0

Las características principales de la tecnología Bluetooth son la ubicuidad, el bajo consumo y el bajo coste. La especificación Bluetooth define una estructura uniforme para una amplia gama de dispositivos que les permite conectarse y comunicarse entre sí.

### 2.3.Sensor inercial

Un sensor inercial es un dispositivo capaz de convertir los efectos de una fuerza en una señal registrable, normalmente, de tipo eléctrico. Los efectos provocados por la fuerza y registrados por los sensores inerciales generalmente son la aceleración, en el caso de los acelerómetros y la velocidad angular, en el caso de los giroscopios, sobre uno o varios ejes. Dichos efectos físicos se transforman en una salida de voltaje linealmente proporcional y se cuida que el proceso de transducción tenga una sensibilidad específica en función de la aplicación en la que son incluidos.

Como IMU (Unidad de Medición Inercial), se conoce al dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros y giróscopos.

Los sensores inerciales pueden ser utilizados en multitud de aplicaciones. Pueden formar parte de redes de sensores corporales (BSN) para diagnosticar eventos críticos de carácter medicinal como infartos o insuficiencias cardíacas o para monitorizar actividades registrando la duración, la calidad y el tipo de movimiento realizado [13]. También pueden ser utilizados en otros ámbitos, como por ejemplo en cámaras de video, para capturar distintas acciones que puedan ocurrir alrededor del sensor [4].

## 2.4. Dispositivos de captura de movimiento más recientes

En este capítulo se realiza una descripción de trabajos anteriores relacionados con el uso de sensores inerciales.

En [5] se diseñó un sensor basado en la técnica de medición de los ángulos en tres dimensiones (3D). Dos sensores de aceleración, velocidad angular y campo magnético se utilizan en esta técnica. Cada sensor contiene un acelerómetro de tres ejes, un giroscopio de tres ejes y un magnetómetro de tres ejes. El acelerómetro de tres ejes se forma a partir de la combinación de dos acelerómetros de dos ejes. Cada acelerómetro es sensible tanto a la aceleración estática inducida de la gravedad, como a la aceleración dinámica inducida del movimiento. El diseño de este sensor cinemático fue realizado en 2007.

Unos años más tarde, en 2011 concretamente, se desarrolló un sistema de medición de ángulos [2]. Para este trabajo se utilizaron dos sensores de nueve grados de libertad (9 DOF Razor IMU) de SparkFun Electronics. A cada sensor se le adjunta una radio Bluetooth que de forma inalámbrica transmite los datos a un PC.

Se utilizó el acelerómetro para encontrar los ángulos de flexión y el giroscopio para eliminar el efecto de vibraciones en el acelerómetro.

El sistema diseñado en [3], desarrollado en 2014, incorpora sensores de polímeros conductores flexibles interconectados a un sensor personalizado en el cuerpo con sensores de acelerómetro y giroscopio integrados.

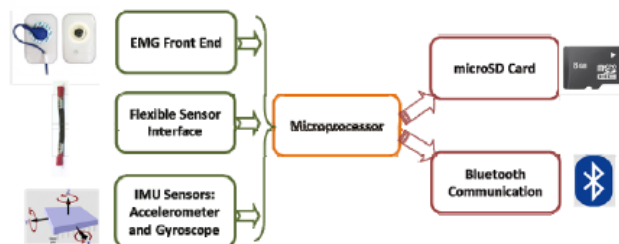


Fig. 3 - Diagrama de bloques del dispositivo diseñado en [3]

El nodo de sensores inalámbricos fue diseñado siguiendo una aproximación modular y consiste en cuatro niveles independientes de PCB que pueden ser combinados de manera selectiva y ensamblados a partir de los requerimientos de medición de una aplicación específica. El nivel principal del diseño dispone de un microprocesador de bajo consumo, de un IMU, así como de una tarjeta de memoria micro SD. El nivel de conectividad está dedicado a un módulo Bluetooth.

El microprocesador recoge datos de todos los sensores (sensores flexibles, acelerómetro y giroscopio) a la frecuencia de muestreo de 122 Hz y almacena los datos en la tarjeta micro SD o transmite los datos al ordenador en tiempo real.

Uno de los dispositivos más recientes, del 2015, consta de tres módulos, un IMU con tres sensores, un módem Bluetooth y una batería de Polímero de Litio (LiPo), para enviar de forma inalámbrica los datos recopilados por el IMU a un teléfono móvil [1]. En este trabajo se han utilizado los módulos propuestos por SparkFun Electronic. Como IMU se utilizó el 9 DOF Razor IMU, que consiste en un acelerómetro de triple eje, un giroscopio de triple eje y un magnetómetro de triple eje para dar nueve grados de medidas inerciales. Como módem Bluetooth se utilizó BlueSMiRF Gold que funciona de forma inalámbrica como un puerto serie (RX/TX). Tanto el IMU como el Bluetooth son alimentados por una batería recargable.

La parametrización del IMU depende de la aplicación. Los parámetros de configuración del hardware son sólo la colocación/montaje del sensor y la frecuencia de muestreo. En los sistemas de navegación inercial (INS) que emplean sensores de bajo coste, el error de posición es proporcional al tiempo de funcionamiento al cubo, lo que significa que la navegación libre inercial es sólo factible durante unos segundos. En los sistemas de navegación que utilizan sensores de alto coste, el error de posición es eliminado mediante métodos como el filtro de Kalman (KF), un algoritmo de fusión de datos capaz de obtener una estimación óptima del estado de un sistema lineal incierto y dinámico [16].

También en 2015, se presentó una red de sensores inerciales conectados a dispositivos electrónicos mediante Bluetooth Smart [4]. Cada nodo de sensores contiene un sensor inercial que mide aceleración, velocidad angular y campo magnético, un microprocesador y un módulo Bluetooth Smart de bajo consumo transmitiendo los datos.

Se diseñó una PCB para el nodo de sensores compuesta por el microprocesador, un módulo Bluetooth de bajo consumo y un sensor inercial de 9 ejes. El microprocesador TM4C123GH6PM de Texas Instruments fue principalmente elegido por su potente capacidad de cálculo.

Los ángulos de Euler, en este dispositivo, son calculados utilizando las medidas del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro recibidas en el microprocesador desde el sensor, mediante el algoritmo de la librería DCM que proporciona Texas Instruments. Los datos son enviados al microprocesador a través del protocolo I2C.

En la siguiente tabla se detalla de manera resumida las partes de las que se componen los dispositivos mencionados anteriormente:

Dispositivo	Características del dispositivo				Información generada
	Procesador	Sensores	Comunicaciones	Batería y consumos	
"Low-Cost Bluetooth Foot-Mounted IMU for Pedestrian Tracking in Industrial Environments" [1]	ATmega328	Sensor de 9 grados de libertad (9 DOF Razor IMU): - Acelerómetro de triple eje (ADXL345) - Giroscopio de triple eje (ITG-3200) - Magnetómetro de triple eje (HMC5883L)	Módulo Bluetooth (BlueSMiRF Gold)	- Batería: LiPo de 850 mAh - Consumos: Acelerómetro: 140µA en modo de medida y 1µA en modo <i>standby</i> Giroscopio: 6,5mA en modo de medida y 5µA en modo <i>standby</i> Magnetómetro: 100µA en modo de medida y 2µA en modo <i>standby</i> Módulo Bluetooth: 65mA en transmisión y 2,5 mA en modo <i>sleep</i>	- Aceleración  - Velocidad angular
"Development of a body joint angle measurement system using IMU Sensors" [2]	ATmega328	Sensor de 9 grados de libertad (9 DOF Razor IMU): - Acelerómetro de triple eje (ADXL345) - Giroscopio de triple eje (ITG-3200) - Magnetómetro de triple eje (HMC5883L)	Módulo Bluetooth (modelo no especificado)	- Batería: 3.6V - Consumos: Acelerómetro: 140µA en modo de medida y 1µA en modo de <i>standby</i> Giroscopio: 6,5mA en modo de medida y 5µA en modo <i>standby</i> Magnetómetro: 100µA en modo de medida y 2µA en modo <i>standby</i> Módulo Bluetooth: No especificado	- Ángulos de Euler
"Development of a wireless multi-functional body sensing platform for smart garment integration" [3]	PIC18LF26K22	IMU (Modelo no especificado): - Acelerómetro de triple eje (ADXL345) - Giroscopio de triple eje (L3G4200D)	Módulo Bluetooth (RN42)	- Batería: 3V - Consumos: Procesador: 20nA en modo <i>Sleep</i> Acelerómetro: 140µA en modo de medida y 1µA en modo de <i>standby</i> Giroscopio: 6,1mA en modo de medida y 1,5mA en modo <i>sleep</i> Módulo Bluetooth: 30mA en transmisión y 26 µA en modo <i>sleep</i>	- Aceleración  - Velocidad angular
"An Open Source Inertial Sensor Network with Bluetooth Smart" [4]	TM4C123GH6PM	Sensor de 9 grados de libertad (MPU9150): - Acelerómetro (ADXL210E) - Giroscopio (ADXRS150) - Magnetómetro (HMC2003)	Módulo Bluetooth Low Energy (BLE113)	- Batería: 3V - Consumos: Acelerómetro: 600µA en modo de medida Giroscopio: 6mA en modo de medida Magnetómetro: 350µA en modo de medida Módulo Bluetooth: 14,3mA a 27mA en transmisión y 500nA en modo <i>sleep</i> .	- Aceleración - Velocidad angular - Campo magnético - Ángulos de Euler - Cuaternios
"An inertial and magnetic sensor based technique for joint angle measurement" [5]	No especificado	Sensor de 9 grados de libertad: - Acelerómetro (ADXL210E) - Giroscopio (ADXRS150) - Magnetómetro (HMC2003)	No especificado	- Batería: No especificado - Consumos: Acelerómetro: 600µA en modo de medida Giroscopio: 6mA en modo de medida Magnetómetro: 350µA en modo de medida Módulo de comunicaciones: No especificado	- Aceleración  - Velocidad angular  - Campo magnético

Tab. 1 - Características de los dispositivos de captura de movimiento más recientes

A lo largo de los últimos años se han diseñado IMUs para diferentes aplicaciones. Se están convirtiendo en la base de muchos sistemas de posicionamiento de usuarios (sistemas de navegación interior para guías turísticas [14], sistemas de localización para equipos de rescate o escuadrones de policía [15], etc.) como componentes de una navegación interior precisa. Sin embargo, las soluciones en las que se implementan IMUs de bajo coste, suelen estar conectadas a un ordenador portátil mediante una conexión por cable que interfiere con los movimientos de los usuarios. Además, estas soluciones no resultan prácticas puesto que no es habitual que la gente lleve un ordenador portátil mientras camina. Por este motivo, los teléfonos móviles resultan plataformas atractivas para el desarrollo de aplicaciones inalámbricas relacionadas con la determinación de la ubicación de los usuarios.

El uso de datos de localización para controlar las funciones habituales está siendo más popular en los últimos años, no sólo para aplicaciones de seguridad, sino también para aplicaciones de gran consumo en el mercado. Las aplicaciones de datos de localización incluyen los servicios basados en localización (LBS) como la navegación peatonal en edificios interiores complejos. La aplicación para la que se utiliza el dispositivo diseñado en [1] consiste en un sistema de localización interior para usuarios basados en sensores inerciales de bajo coste conectados inalámbricamente (mediante Bluetooth) a teléfonos móviles.

Dicho sistema, también puede ser muy útil en entornos industriales para la optimización del flujo de trabajo y para garantizar la seguridad de todos los trabajadores durante la jornada laboral. Las averías afectan de forma significativa a la cadena de suministro. Estas averías pueden derivarse por la falta de visibilidad en la localización de trabajadores, por una asignación ineficiente o por cuestiones de seguridad vinculadas a la falta de visión en la ubicación y el movimiento de los trabajadores. Por lo tanto, dicho sistema puede ayudar a prevenir este tipo de averías.

Un ejemplo de aplicación similar a las citadas en los párrafos anteriores, es como rastreador de movimiento [4]. Para ello es necesario calcular los ángulos de Euler medidos por el nodo de sensores situados en las piernas de una persona para determinar los ángulos de las piernas con respecto al suelo y averiguar la longitud del paso utilizando la trigonometría.

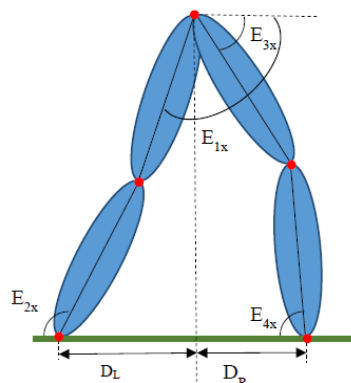


Fig. 4 - Cálculo de la longitud de paso mediante los ángulos de Euler



Otro tipo de aplicación para el que se le da mucho uso a este tipo de dispositivos es para la medición de los ángulos de las articulaciones. Los ángulos de las articulaciones entre segmentos en tres dimensiones es una medida biomecánica importante para una gran variedad de aplicaciones. Dicha medida aplicada en el tobillo podría ser utilizada para la monitorización de la actividad de la parte inferior de la pierna en personas con movilidad reducida que se encuentren en riesgo de permanecer inactivos durante largos periodos de tiempo. También se podría utilizar para medir la flexión dorsal equilibrada en aplicaciones para la corrección del pie caído o para la monitorización de la rotación del pie en ensayos clínicos. Diversas técnicas de sensores cinemáticos han sido desarrolladas para el análisis de la marcha, la monitorización de la cinemática en las extremidades superiores y la monitorización de la movilidad.

El dispositivo desarrollado en [2] se utilizó para este tipo de aplicaciones. Se utilizaron dos sensores montados con unas simples correas en el gemelo y en el muslo de la persona. A cada sensor se le adjunta una radio Bluetooth que de forma inalámbrica transmite los datos a un PC. Los ángulos de Euler son utilizados para definir el ángulo de la rodilla en relación con la primera rotación (flexión).

Este sistema de medición de ángulos de las articulaciones puede resultar muy útil en aplicaciones médicas y de rehabilitación, en las que es necesario controlar continuamente las actividades diarias de los pacientes o la monitorización del movimiento de las articulaciones sin tener que acudir al hospital. Tradicionalmente, la medición de los ángulos que forman las distintas articulaciones se ha realizado mediante la utilización de herramientas estándar como los goniómetros.

En [5], también se diseñó el dispositivo con el fin de medir los ángulos de las articulaciones en tres dimensiones (3D). Uno de los sensores se colocaría en el segmento del pie y el otro unido al segmento inferior de la pierna.

La plataforma multisensor diseñada en [3], fue diseñada para apoyar la monitorización funcional y la rehabilitación de la rodilla mediante su integración en una prenda de vestir.

Esta aplicación se centra en una prenda de vestir inteligente que reduce potencialmente el deterioro funcional al guiar al paciente en el ejercicio de forma adecuada para controlar el deterioro de la función articular. La prenda de vestir debe ser capaz de evaluar las actividades de un paciente en su entorno cotidiano. El sistema de sensores inalámbricos monitorizará la función en remoto y proporcionará la información apropiada para el paciente y el médico contribuyendo así en la elaboración de estrategias personalizadas de rehabilitación.

## 2.5. Aplicaciones y monitorización del movimiento

El análisis del movimiento humano posee una amplia gama de aplicaciones potenciales, como por ejemplo la medicina, el deporte, la vigilancia inteligente, etc.

En [5] se presenta una técnica que utiliza la combinación de señales de un acelerómetro, un giroscopio y un magnetómetro. Esta técnica permite la medición de los ángulos de las articulaciones entre segmentos 3D y podría resultar beneficioso en una variedad de aplicaciones que requieren la monitorización de los ángulos de las articulaciones. Los resultados experimentados muestran que la medición precisa de los ángulos de las articulaciones del tobillo ha sido lograda con esta técnica durante una variedad de ejercicios con las piernas, incluyendo caminar. MATLAB fue utilizado para todo el procesamiento y análisis de datos. Los datos del sensor y los indicadores fueron filtrados por el filtro paso-bajo de segundo orden de Butterworth a 5Hz.

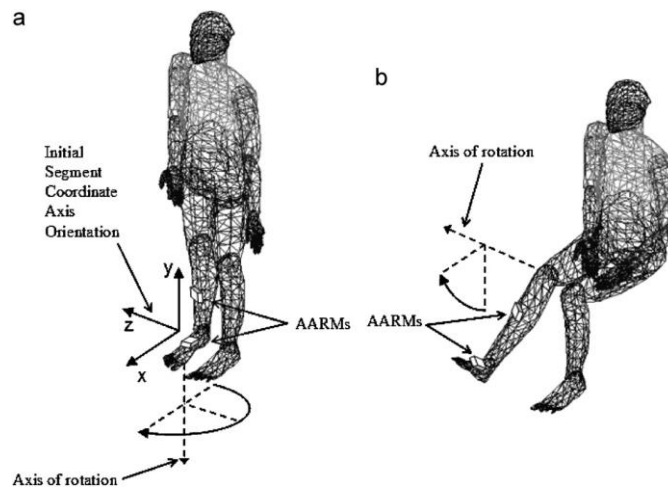


Fig. 5 - Posicionamiento de los sensores para la medición de los ángulos de las articulaciones

En 2014 se describió un nuevo dispositivo para medir el movimiento del ligamento tibioalcalcanal [6]. Se realizó un prototipo utilizando dos IMUs situados en las referencias óseas. Cada IMU consistía en un acelerómetro y un giroscopio 3D. Los dos IMUs estaban conectados a un registrador de datos situado en la parte baja de la espalda. Los ejes de los IMUs fueron alineados manualmente para que sus ejes X apuntaran hacia delante, los ejes Y al centro y los ejes Z verticalmente. Ocho cámaras registraron indicadores retrorreflectantes pasivos a 200Hz. Una placa de aplicación de fuerzas registró la fuerza de reacción de contra el suelo a 800Hz. Un disparador inalámbrico se utilizó para la sincronización del prototipo y la captura de movimiento.

Los datos del acelerómetro y el giroscopio fueron filtrados mediante el filtro paso-bajo de segundo orden de Butterworth a 10Hz y 60Hz respectivamente. Cada sistema de coordenadas del IMU fue girado por una secuencia de cardán intrínseca ( $x, y', z''$ ) para que coincidiera con el sistema general de coordenadas.

Se aplicó un filtro complementario mediante la fusión de los datos del acelerómetro y el giroscopio con una integral proporcional.

En lo referente a la captura de movimiento, los datos basados en los indicadores fueron filtrados por el filtro paso-bajo de segundo orden de Butterwoth A 30Hz.

En [7] se presentó un nuevo método para la detección automática de sensores inerciales en los diferentes tramos del cuerpo humano durante la marcha. Este método permite al usuario colocar sensores inerciales inalámbricos en los tramos corporales arbitrarios. A continuación, el usuario camina durante unos pocos segundos y el tramo al que está unido cada sensor se identifica automáticamente. Los datos de la marcha se registraron a partir de diez sujetos sanos utilizando un sistema Xsens MVN Biomech con la configuración de todo el cuerpo. A los sujetos se les pidió caminar durante unos 6 segundos a una velocidad de paseo normal (5km/h). Después de rotar los datos de los sensores a un sistema de coordenadas global con el eje X en dirección de la marcha, el eje Y apuntando hacia la izquierda y el eje Z vertical, fueron extraídos los componentes y magnitudes de las aceleraciones, velocidades angulares y aceleraciones angulares.

Otro sistema que clasifica automáticamente una amplia gama de entrenamientos es descrito en [8]. Este sistema utiliza la Transformada Wavalet Discreta. El clasificador es capaz de clasificar con éxito diversas actividades con hasta un 98% de precisión. En segundo lugar, un algoritmo de descenso de gradiente computacionalmente eficiente, se utiliza para estimar las orientaciones relativas de los sensores inerciales portátiles montados en el muslo y el gemelo de un sujeto, a partir del cual se calcula el ángulo de flexión/extensión de la rodilla.

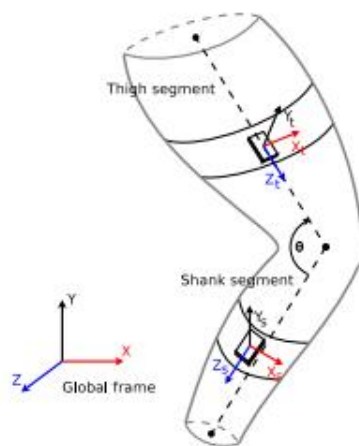


Fig. 6 - Posicionamiento de los sensores para el cálculo del ángulo de flexión de la rodilla

Por último, una técnica de registro de desplazamiento de la curva se aplica tanto para generar datos normativos, como para determinar si la técnica de movimiento de un sujeto se diferenciaba de los datos normativos con el fin de identificar los factores relacionados con la lesión potencial. Se prevé que el marco propuesto podría ser utilizado para la clasificación de la actividad deportiva automática y precisa y una evaluación de la técnica del movimiento fiable en diversos entornos sin restricciones.

Las investigaciones descritas han demostrado que los acelerómetros se pueden utilizar para clasificar la actividad humana para acciones de alta energía, tales como esprintar, trotar y saltar [9]. En los deportes, los acelerómetros han sido utilizados para monitorizar a los atletas de élite en competiciones y entrenamientos. En la natación, los acelerómetros han permitido la comparación de las características de las brazadas en una amplia variedad de entrenamientos de brazadas y por lo tanto, han ayudado a mejorar la técnica de natación [10]. En el tenis, los acelerómetros también han sido utilizados para identificar las diversas fases del movimiento durante el servicio.

En [12] se llevó a cabo un estudio en un usuario en el problema de reconocimiento de gestos con las manos desde acelerómetros y giroscopios pegados al cuerpo. Los gestos con las manos son de uso general en la vida cotidiana (para cocinar por ejemplo) y en las interfaces de videojuegos (juegos de deportes como tenis, golf, etc.).

Los movimientos del brazo fueron rastreados utilizando tres IMUs personalizados colocados en la parte superior de la mano derecha de cada participante, así como en el exterior de la parte inferior y superior derecha del brazo. Los IMUs disponen de un acelerómetro de tres ejes y un giroscopio de dos ejes registrando los datos de movimiento a una velocidad de muestreo de 32Hz. Todos los datos registrados eran enviados a través de Bluetooth a un ordenador portátil en las proximidades de los participantes.

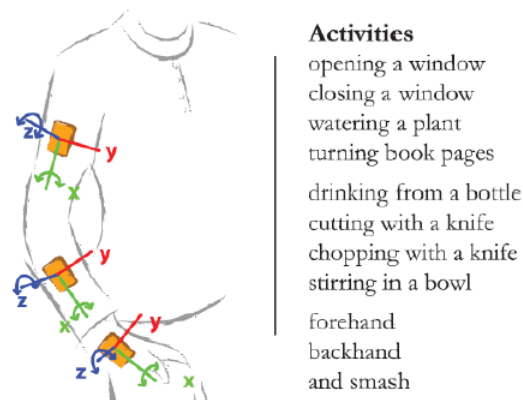


Fig. 7 - Posicionamiento de los sensores para el reconocimiento de gestos

### 3. Estudio comparativo sobre la tecnología a seleccionar

#### 3.1. Estudio comparativo sobre los módulos BLE

En este capítulo se pretende realizar un estudio comparativo sobre los chips Bluetooth Low Energy más destacados del mercado. Los chips más destacados, con un 95% de cuota de mercado, son los siguientes:

- CC2541 de Texas Instruments
- nRF51822 de Nordic Semiconductors
- BLE113 de Bluegiga
- Gimbal proximity de Gimbal

A continuación, se muestra una tabla comparativa de los chips mencionados con los aspectos más relevantes para el diseño del prototipo de este Trabajo Fin de Máster:

Chip	Alimentación	Consumos				Coste
		TX		RX	Sleep	
		0dBm	-20dBm			
Gimbal Proximity	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	4,64€
nRF51822	1,8V - 3,6V	10,5mA	5,5mA	13mA	0,6µA	4,65€
BLE113	2V - 3,6V	18,2mA	N/A	17,9mA	0,5µA	10,55€
CC2541	2V - 3,6V	18,2mA	16,8mA	17,9mA	0,5µA	4,79

Tab. 2 - Características de los chips BLE más destacados

Los datos de consumo son especificados para una alimentación de 3V a una velocidad de transferencia de datos de 1Mbps.

En [28] realizaron un estudio experimental sobre el consumo de batería utilizando estos cuatro chips en modo *iBeacon*. Los chips de Texas Instruments, Nordic Semiconductor y Bluegiga soportan diferentes configuraciones de potencia de transmisión e intervalos de conexión. En cambio, los *beacons* de Gimbal sólo admiten un conjunto limitado de configuraciones y el intervalo de conexión no se puede modificar libremente.

En la siguiente imagen, se muestra la duración de los diferentes modelos de batería en función del *beacon* de cada fabricante y el intervalo de conexión.

		cr2032 small 240mah	cr2450 medium 620mah	cr2477 big 1000 mah
Chipset	Advertisement Interval	Est. Battery cr2032	Est. Battery cr2045	Est. Battery cr2477
Gimbal	100ms	1.0 month	2.5 month	4.0 month
Gimbal	645ms	n/a	n/a	n/a
Gimbal	900ms	n/a	n/a	n/a
Nordic	100ms	1.1 months	2.8 months	4.5 months
Nordic	645ms	5.4 months	13.9 months	22.4 months
Nordic	900ms	11.0 months	28.7 months	46.3 months
Bluegiga	100ms	0.6 months	1.6 months	2.6 months
Bluegiga	645ms	5.8 months	15.1 months	24.3 months
Bluegiga	900ms	13.9 months	35.8 months	57.1 months
TI CC254x	100ms	0.7 months	1.8 months	2.9 months
TI CC254x	645ms	4.3 months	11.2 months	18.0 months
TI CC254x	900ms	5.6 months	14.3 months	23.1 months

Fig. 8 - Estudio experimental realizado en [28] para la determinación de la duración de la batería en los iBeacon de cada fabricante

A continuación, se resume para cada chip, la duración de la batería ajustando cada *beacon* a un intervalo de conexión de 645ms y a una potencia de transmisión de -12dBm (15 metros) utilizando la pila de reloj CR2032. Para el *beacon* de Gimbal, como el intervalo de conexión no es configurable, los datos reportados no son directamente comparables con el resto de chips.

Battery life in months, across the four major chipsets, when using a small 240mAh battery (cr2032). Report by Aislelabs.

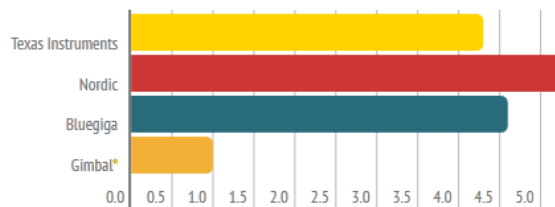


Fig. 9 - Duración de la batería en meses de cada chip BLE

### 3.2. Estudio comparativo sobre sensores

El objetivo de este capítulo es realizar un estudio comparativo de algunos de los sensores inerciales más destacados del mercado. Para ello se van a comparar aspectos importantes para el diseño del prototipo como los consumos, los datos ofrecidos y el coste.

Sensor	Fabricante	Alimentación	Datos de salida				Consumos [*]		Coste
			Aceleración	Velocidad angular	Campo magnético	Ángulos de Euler	Activo	Sleep	
9 DOF - Razor IMU	Sparkfun	3,5V - 16V	X	X	X		7mA	7,5µA	69,62€
MPU9150	InvenSense	2,4V - 3,4V	X	X	X		10mA	6µA	32,46€
BNO055	Bosch	2,4V - 3,6V	X	X	X	X	12,3mA	40µA	13,67€
EM7180SFP	EM Microelectronic	2,4V - 3,3V	X	X	X		7,9mA	230µA	N/A
AH - 6120LR	Epson	2,7 - 3,3V	X	X			6,1mA	N/A	N/A
AP - 6110LR	Epson	2,8 - 3,6V	X	X			6,8mA	N/A	N/A

Tab. 3 - Características de los sensores más destacados

[\*] Los consumos están especificados para una alimentación de 2,4V, excepto en el sensor BNO055, que están especificados para una alimentación de 3V.

### 3.3. Comparación de alternativas y selección del hardware

El nRF51822 de Nordic tiene un consumo de 10,5mA transmitiendo a 0dBm, un consumo bastante inferior al CC2541 de Texas o al BLE113 de Bluegiga. En modo *sleep* todos tienen un consumo muy similar.

En cuanto al coste, todos los módulos de comunicaciones tienen un coste similar excepto el BLE113, que tiene un coste de aproximadamente el doble que el resto de módulos Bluetooth.

Finalmente, el módulo BLE que se ha seleccionado para el desarrollo de este proyecto, ha sido el nrf51822. El principal motivo para su elección ha sido el bajo consumo del mismo.

El sensor BN055 de Bosch, a pleno rendimiento, tiene un consumo de 12,3mA. Es un consumo más elevado que el del resto de sensores. Sin embargo, en modo *sleep*, el sensor con más consumo es el de EM Microelectronic.

Un punto muy favorable de cara a la selección del sensor BNO055, es que es el único sensor que incluye algoritmos de integración capaces de calcular los ángulos de Euler.

En los sensores de EM Microelectronic y Epson, para conocer el precio y adquirirlos, es necesario contactar con el fabricante. El coste en el resto de sensores varía notablemente de uno a otro, siendo el de Bosch el más asequible.

Por su bajo coste y por incluir los algoritmos necesarios para calcular los ángulos de Euler, el sensor seleccionado ha sido el BNO055.

### 3.4. Ventajas de la solución escogida y estimación del consumo

En este capítulo se valoran las ventajas del prototipo a fabricar y se realiza una estimación del consumo del mismo comparándolo con el de otros dispositivos.

En modo de transmisión a 0dBm, el consumo estimado del prototipo, será de aproximadamente unos 23mA. El dispositivo desarrollado en [4] (el dispositivo más reciente y con menor consumo de los detallados en el estado del arte), en modo de transmisión a 0dBm ofrece un consumo de algo más de 28mA.

Una desventaja del prototipo diseñado es que, en modo *sleep*, el dispositivo diseñado en [4] tiene un consumo bastante inferior (7 $\mu$ A) al del prototipo (40 $\mu$ A).

Si se hace un repaso más exhaustivo de los componentes de los dispositivos más recientes mencionados en el estado del arte, se observa lo siguiente:

El acelerómetro que incorpora el sensor de nueve grados de libertad del prototipo fabricado es un sensor de la gama BMA (modelo no especificado) de Bosch. Tiene un consumo



de  $130\mu\text{A}$  a  $139\mu\text{A}$  en modo de medida en función del modelo utilizado. Es un consumo similar al del acelerómetro ADXL345, pero muy inferior al del resto de acelerómetros que componen el resto de sistemas mencionados. El giroscopio que se utiliza en el prototipo es un sensor de la gama BMG (modelo no especificado). Esta gama de sensores tienen un consumo de  $5\text{mA}$  en modo de medida. Es un consumo ligeramente inferior al de los giroscopios que utilizan los componentes anteriormente indicados. El magnetómetro integrado en el sensor utilizado en el prototipo fabricado es un sensor de la gama BMM (modelo no especificado). El sensor tiene un consumo de  $170\mu\text{A}$  en modo de medida. Es un consumo ligeramente superior al del magnetómetro utilizado en [1] y [2] (HMC5883L) e inferior al de los magnetómetros utilizados en el resto de componentes.

En cuanto al módulo de comunicaciones, el utilizado en el prototipo fabricado es el nRF51822 y tiene un consumo de  $10,5\text{mA}$  en modo de transmisión. Es un consumo ligeramente inferior al resto de dispositivos que utilizan un módulo de comunicaciones Bluetooth Low Energy, pero muy notable respecto a los dispositivos que utilizan un módulo de comunicaciones Bluetooth.

Otra gran ventaja del prototipo es el pequeño tamaño ( $3.8\text{mm} \times 5.2\text{mm} \times 1.1\text{mm}$ ) del sensor de nueve grados de libertad puesto que todos los sensores vienen integrados en un único chip. La integración de todos los sensores en un único chip facilita además la obtención de datos de los sensores. A diferencia del resto, este sensor envía directamente los ángulos de Euler al microprocesador sin que sea necesario hacer ningún tipo de cálculo. Además cuenta con sensores de alta precisión: un acelerómetro en los tres ejes con una resolución de 14 bits, un giroscopio en los tres ejes con una resolución de 16 bits y un magnetómetro en los tres ejes con una resolución de 16 bits. El chip incorpora un microprocesador de 32 bits.

Además de todas las ventajas citadas y con el fin de informar sobre agotamiento de la batería, el prototipo desarrollado en este Trabajo Fin de Máster envía mediante Bluetooth el nivel de la batería en cada momento.

También cabe destacar que el prototipo puede ser utilizado en multitud de aplicaciones como las que se han nombrado anteriormente, desde una aplicación para medir los ángulos de las articulaciones hasta cualquier aplicación que tenga como fin mejorar las técnicas de un cierto deporte o cualquier aplicación relacionada con el análisis del movimiento.

## 4. Resultados

### 4.1. Hardware seleccionado

#### 4.1.1. nRF51822

El nRF51822 es un potente SoC (System on a Chip) ideal para el desarrollo de aplicaciones Bluetooth Low Energy. El nRF51822 integra un ARM Cortex M0 CPU de 32 bits. Incorpora una variada selección de periféricos analógicos y digitales que pueden interactuar sin intervención del CPU a través del sistema PPI (Programmable Peripheral Interconnect).

El nRF51822 soporta las pilas de protocolo de Bluetooth Smart, así como las pilas de protocolo de 2,4GHz, incluyendo Gazell (protocolo diseñado para el establecimiento de una conexión inalámbrica sólida entre un sólo host y hasta ocho dispositivos en una topología de red en estrella) y sólo requiere de una única fuente de alimentación.

#### 4.1.2. BNO055

El BNO055 Intelligent 9-Axis Absolute Orientation Sensor es una solución de tipo System in Package (SiP) que integra un microcontrolador ARM Cortex-M0+ de 32 bits, el cual contiene el software de fusión de sensores Bosch Sensortec, además de tres sensores: un acelerómetro triaxial de 14 bits, un giroscopio triaxial de 16 bits y un sensor geomagnético triaxial de 16 bits, todos ellos introducidos en un paquete en miniatura.



Fig. 10 - Medidas generadas en el BNO055

El software integrado de gestión de sensores ayuda a los desarrolladores a reducir costes y tiempo de desarrollo, a la par que, la integración de varios componentes en un sólo paquete lleva a una integración de sistemas más simplificada. Tanto el hardware como el software del BNO055 permiten un alto rendimiento con un bajo consumo energético.

Una parte fundamental del sensor de nueve ejes BNO055 es el software BSX3.0 FusionLib, el cual está orientado a asegurar el rendimiento óptimo del sistema. Entre otras funcionalidades, permite realizar la calibración en segundo plano (background) y de forma rápida de todos los sensores, detección y supresión de distorsiones magnéticas mejorada, compensación de retardo de grupo para el seguimiento en tiempo real del movimiento, cancelación de la deriva del giroscopio, y soporte para múltiples modos de potencia y múltiples

modos de funcionamiento (es decir, para las aplicaciones basadas en 6 ejes, tales como unidades de medida de inercia).

También está equipado con interfaces digitales I2C y UART bidireccionales. La interfaz I2C puede ser programada para ser utilizada con el protocolo HID-I2C, convirtiendo el BNO055 en una solución hub de sensor plug-and-play, perfecta para dispositivos que ejecutan el sistema operativo Windows 8.x.

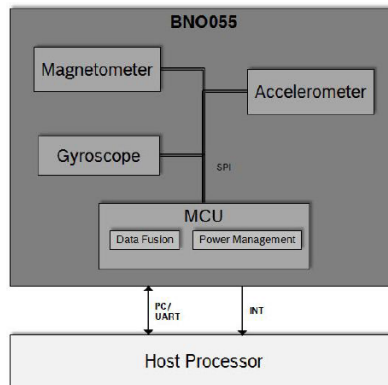


Fig. 11 - Diagrama de bloques interno del BNO055

## 4.2. Conexión de los componentes

### 4.2.1. Diagrama de bloques

A continuación se muestra el diagrama de bloques a nivel de hardware del prototipo diseñado:

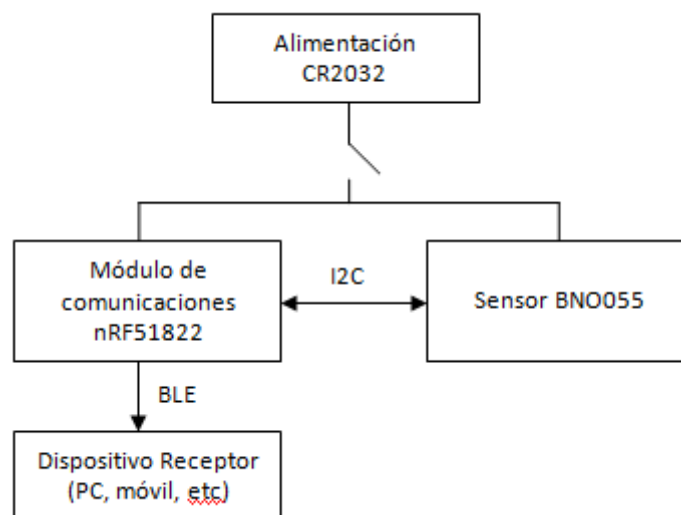


Fig. 12 - Diagrama de bloques del hardware del prototipo fabricado

## 4.2.2. Conexiones

En ese capítulo se detalla la conexión entre el sensor y el módulo de comunicaciones.

Un detalle a tener en cuenta es la frecuencia de reloj fijada en el protocolo I2C y la selección de las resistencias de Pull-Up a utilizar. El Data sheet del BNO055 especifica que la frecuencia de reloj debe ser de 400kHz. Como resistencias de Pull-Up entre la alimentación Vcc y las líneas SDA y SCL, se escogieron resistencias de valor 1kOhm. Las líneas SDA y SCL van de los pines P0.30 y P0.07 del nRF51822 a los pines 20 y 19 respectivamente del sensor BNO055. Los pines PS0 y PS1 (6 y 5 respectivamente) del sensor, que sirven para activar el protocolo I2C, irán conectados al pin de tierra del módulo de comunicaciones. Los pines Vdd y Vddio (3 y 28 respectivamente) del sensor irán conectados a la alimentación del módulo de comunicaciones.

A continuación, se muestran las conexiones a modo de esquemático:

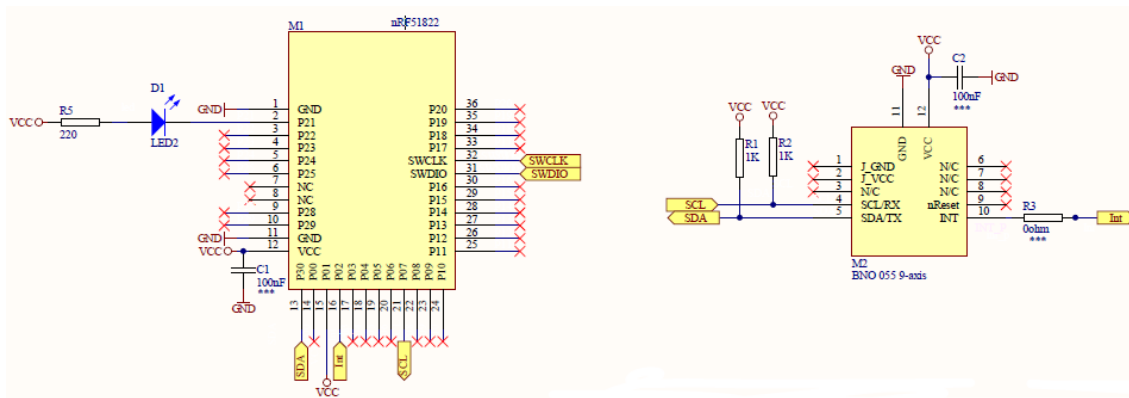


Fig. 13 - Conexiones del prototipo fabricado

## 4.3. Desarrollo del firmware

El firmware incluye dos partes, la aplicación desarrollada en el nRF51822 y los softdevices. Los softdevices son archivos binarios pre-compilados que implementan la tecnología Bluetooth 4.0 (Bluetooth Low Energy).

En este capítulo se detallan las librerías BLE integradas y las APIs utilizadas para el desarrollo del firmware.

### 4.3.1. Librerías utilizadas

Los servicios de Acceso genérico (GAP) y Atributo genérico (GATT) son obligatorios en todos los servicios BLE y, por lo tanto, dichos servicios vienen incluidos en el softdevice. Para los servicios estándar Nivel de la batería e Información del dispositivo, se han integrado las librerías BLE\_BAS (Battery Alert Service) y BLE\_DIS (Device Information Service) respectivamente, proporcionadas por Nordic. Mientras que para el servicio personalizado de lectura de datos del sensor se ha creado la librería BLE\_BNO.

Adicionalmente, se ha implementado en el proyecto la librería BNO055. Esta librería es proporcionada por Bosch para la lectura/escritura de datos en el sensor. Una vez implementada, se ha adaptado a las necesidades del proyecto.

Para el cálculo aproximado del nivel de batería, se ha creado la librería BLM (Battery Level Measurement).

El resto de librerías (proporcionadas por Nordic) que se han utilizado para el desarrollo de la aplicación son las siguientes:

- Lectura/Escritura e inicialización BUS I2C: TWI\_MASTER, TWI\_MASTER\_CONFIG y TWI\_SW\_MASTER.
- Inicialización y configuración ADC: NRF\_ADC.
- Creación e inicialización de los *timers*: APP\_TIMER.
- Inicialización del *stack* BLE: SOFT\_DEVICE\_HANDLER.
- Administrador de dispositivos: DEVICE\_MANAGER\_PERIPHERAL.
- Ajuste de los parámetros GAP: BLE\_GAP.
- *Advertising*: BLE\_ADVERTISING y BLE\_ADVDATA.
- Ajuste de los parámetros de conexión: BLE\_CONN\_PARAMS.

### 4.3.2. APIs utilizadas

A continuación se detallan las APIs utilizadas en la aplicación desarrollada para las comunicaciones I2C y BLE.

#### I2C

##### Inicialización y configuración del BUS I2C:

- SD\_PPI\_CHANNEL\_ASSIGN: Asigna *endpoints* a un canal PPI.
  - Parámetros de entrada:
    - CHANNEL\_NUM: Número del canal PPI a asignar.
    - EVT\_ENDPOINT: Evento *endpoint* del canal PPI.
    - TASK\_ENDPOINT: Tarea del *endpint* del canal PPI.

- SD\_PPI\_CHANNEL\_ENABLE\_CLR: Limpia el registro del canal PPI habilitado.
  - Parámetros de entrada:
    - CHANNEL\_ENABLE\_CLR\_MSK: Máscara que contiene los bits a limpiar en el registro del canal PPI habilitado.

#### Escritura y lectura de datos:

- TWI\_MASTER\_TRANSFER: Función para transferir datos a través de I2C.
  - Parámetros de entrada:
    - ADDRESS: Dirección donde se transfieren los datos.
    - DATA: Puntero de datos.
    - DATA\_LENGTH: Número de bytes a transferir.
    - ISSUE\_STOP\_CONDITION: Finaliza o no, la transferencia de datos según el valor indicado (TWI\_ISSUE\_STOP/TWI\_DONT\_ISSUE\_STOP).

#### **BLE:**

##### Creación *Timers*:

- APP\_TIMER\_CREATE: Función para crear los *Timers*.
  - Parámetros de entrada:
    - P\_TIMER\_ID: ID del nuevo *timer* creado.
    - MODE: Modo del *timer*.
    - TIMEOUT\_HANDLER: Función a ser ejecutada cuando el tiempo finaliza.

##### Inicialización *stack* BLE:

- SD\_BLE\_ENABLE: Función que habilita el *stack* Bluetooth:

##### Inicialización y ajuste parámetros GAP:

- SD\_BLE\_GAP\_DEVICE\_NAME\_SET: Ajusta el nombre del dispositivo
  - Parámetros de entrada:
    - P\_WRITE\_PERM: Permisos para ver el nombre de la característica.
    - P\_DEV\_NAME: Puntero con el del dispositivo.
    - LEN: Longitud del nombre del dispositivo.
- SD\_BLE\_GAP\_APPEARANCE\_SET: Ajusta el valor de la apariencia
  - Parámetros de entrada:
    - APPEARANCE: Apariencia.
- SD\_BLE\_GAP\_PPCP\_SET: Ajusta los parámetros de conexión
  - Parámetros de entrada:

- P\_CONN\_PARAMS: Puntero que indica los parámetros de conexión.

#### Inicialización *advertising*:

- BLE\_ADVERTISING\_INIT: Inicializa el módulo *advertising*.
  - Parámetros de entrada:
    - P\_ADVDATA: Datos del módulo *advertising*, nombre, apariencia, etc.
    - P\_CONFIG: Modos e intervalos del módulo *advertising*.
    - EVT\_HANDLER: Evento llamado una vez que se inicia el módulo *advertising*.

#### Inicialización servicios:

- SD\_BLE\_GATTS\_SERVICE\_ADD: Añade un servicio a la tabla de atributos.
  - Parámetros de entrada:
    - TYPE: Se indica si el servicio es primario o secundario.
    - P\_UUID: Puntero al UUID del servicio.
  - Parámetros de salida
    - P\_HANDLE: Puntero a la estructura donde el *handle* asignado es almacenado.

#### *Advertising*:

- BLE\_ADVERTISING\_START: Inicia el módulo *advertising*.
  - Parámetros de entrada:
    - ADVERTISING\_MODE: Modo de *advertising*.

#### Gestión de eventos:

- DM\_BLE\_EVT\_HANDLER: Función para la gestión de eventos Bluetooth. Esta función es llamada desde el *stack* BLE.
  - Parámetros de entrada:
    - P\_BLE\_EVT: Evento BLE.

#### Añadir características:

- SD\_BLE\_GATTS\_CHARACTERISTIC\_ADD: Función para añadir características a un servicio.
  - Parámetros de entrada:
    - SERVICE\_HANDLE: *Handle* del servicio donde se va a crear la característica.
    - P\_CHAR\_MD: Puntero a la estructura del atributo correspondiente al valor de la característica.

- P\_HANDLE: Puntero a la estructura donde el *handle* asignado es almacenado.

Notificar valor del atributo:

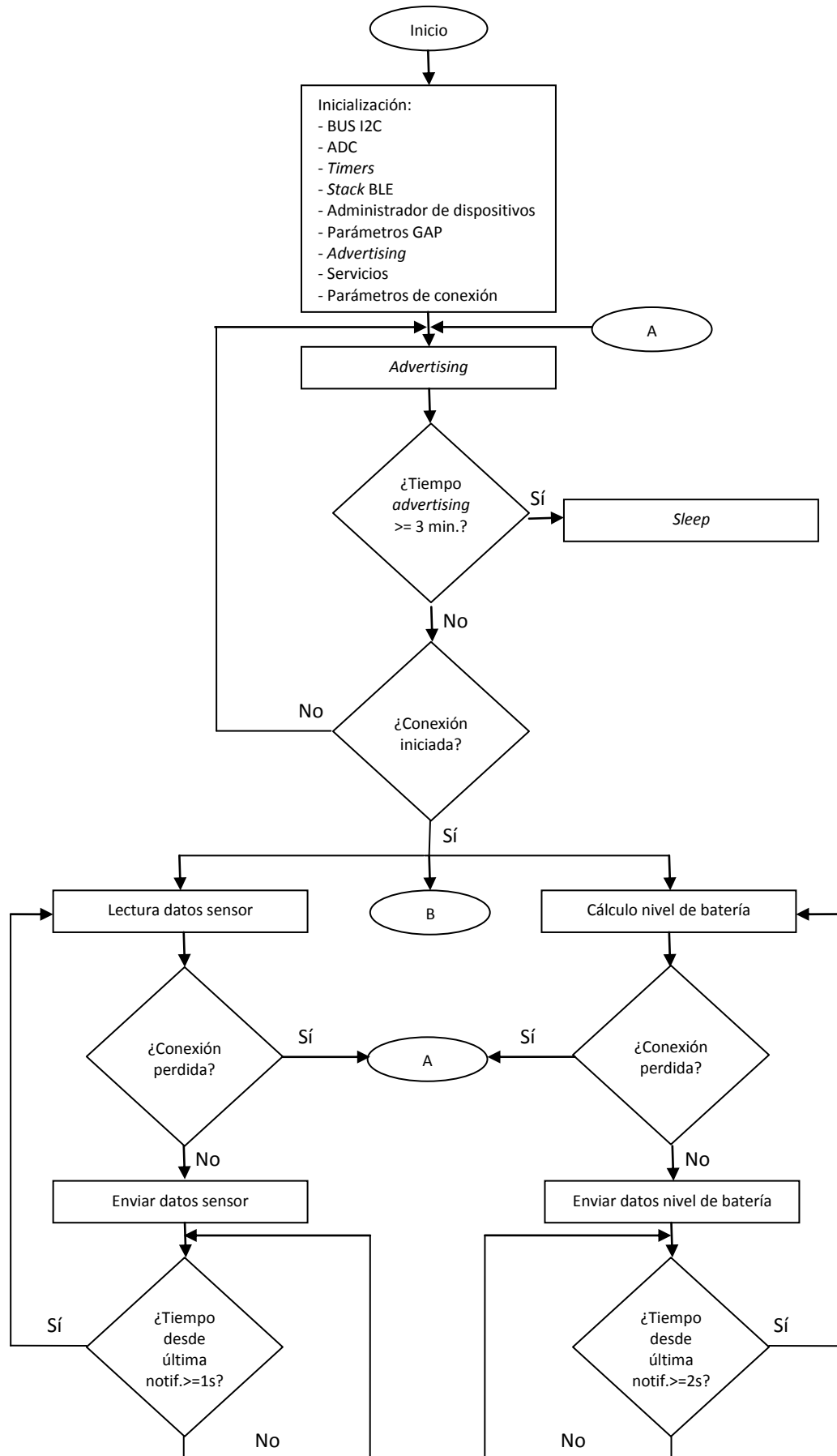
- SD\_BLE\_GATTS\_HVX: Notifica o indica el valor de un atributo.
  - Parámetros de entrada:
    - CONN\_HANDLE: *Handle* de conexión.
    - P\_HVX\_PARAMS: Puntero a la estructura que contiene el tipo de propiedad de la característica, el valor, etc.

Modo *Sleep*:

- SD\_POWER\_SYSTEM\_OFF: Modo *sleep*.



### 4.3.3. Flujo del firmware



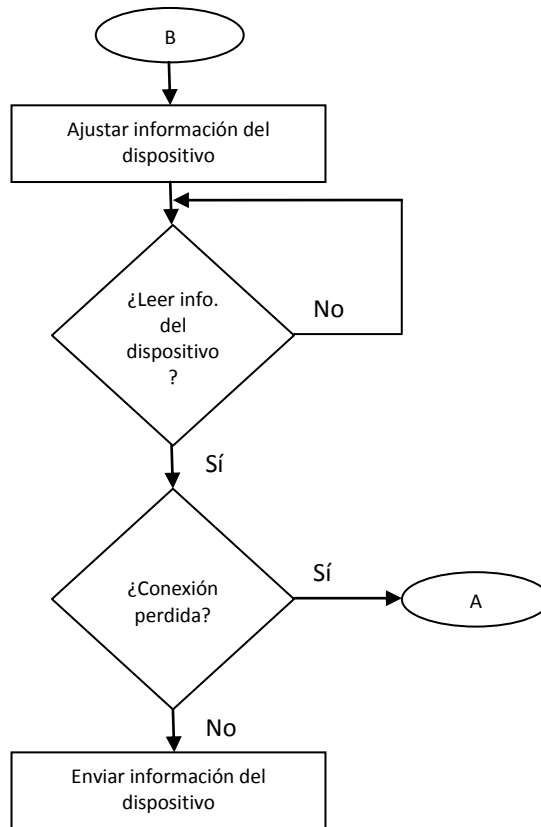


Fig. 14 - Diagrama de flujo del firmware

#### 4.4. Perfil BLE desarrollado

El perfil Bluetooth desarrollado consta de cinco servicios:

Service Discovery	
+	PrimaryService, Value: 00-18, Generic Access (0x1800)
+	PrimaryService, Value: 01-18, Generic Attribute (0x1801)
+	PrimaryService, Value: 23-15, 0x1523
+	PrimaryService, Value: 0F-18, BatteryService (0x180F)
+	PrimaryService, Value: 0A-18, Device Information (0x180A)

Fig. 15 - Servicios mostrados en Master Control Panel

En la siguiente tabla se resumen los cinco servicios utilizados en el prototipo de este Trabajo Fin de Máster y sus características:

Servicio	UUID Servicio	Característica	UUID Característica
Acceso genérico	0x1800	Nombre del Dispositivo	0x2A00
		Apariencia	0x2A01
		Parámetros de conexión del esclavo	0x2A04
Atributo genérico	0x1801	Servicio modificado	0x2A05
Lectura de datos del sensor	0x1523	Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro	0x1524
		Ángulos de Euler	0x1525
Nivel de la batería	0x180F	Nivel de la batería	0x2A19
Información del dispositivo	0x180A	Nombre del fabricante	0x2A29

Tab. 4 - Servicios y características desarrollados

#### 4.4.1. Servicio de Acceso Genérico

El servicio de Acceso genérico contiene información genérica sobre el dispositivo. Todas las características disponibles, deben ser de lectura. Se trata de un servicio estándar que tiene asignado el UUID 0x1800. El servicio contiene las siguientes características:

Característica	UUID	Propiedades				
		Escribir	Escribir sin respuesta	Leer	Notificar	Indicar
Nombre del dispositivo	0x2A00	X		X		
Apariencia	0x2A01			X		
Parámetros de conexión del esclavo	0x2A04			X		

Tab. 5 - Características del servicio de Acceso genérico

#### 4.4.2. Servicio de Atributo Genérico

Así como el perfil de Acceso genérico tiene su propio servicio especificado en el SIG de Bluetooth, obligatorio en todos los dispositivos, el perfil de Atributo genérico también dispone de su propio servicio que debe ser incluido en todos los servidores GATT. El servicio incluye la característica Servicio modificado. Esta característica no puede ser ni leída ni escrita y su valor se comunica al cliente mediante indicaciones a través del valor de la característica. Este servicio tiene asignado el UUID 0x1801.

Característica	UUID	Propiedades				
		Escribir	Escribir sin respuesta	Leer	Notificar	Indicar
Servicio modificado	0x2A5					X

Tab. 6 - Características del servicio de Atributo genérico

Si el servidor sufre un cambio estructural en el diseño de los atributos, enviará de inmediato una indicación con el valor del *handle* al cliente y esperará la correspondiente confirmación. Si los atributos cambian fuera de la duración de una conexión con un dispositivo enlazado, el servidor enviará la indicación inmediatamente después de que la conexión se establezca, por lo que el cliente tiene la posibilidad de redescubrir la zona afectada.

#### 4.4.3. Servicio de Lectura de datos del sensor

Se trata del único servicio personalizado que compone el perfil Bluetooth realizado. Este servicio ha sido desarrollado para recibir notificaciones con la lectura de datos del sensor BNO055. Debido a la necesidad de enviar 24 bytes de datos a través del servicio y teniendo en cuenta que cada paquete de datos transmitido puede contener hasta 20 bytes de datos, ha sido necesario crear dos características dentro del servicio. A este servicio se le ha asignado el UUID 0x1523.

Característica	UUID	Propiedades				
		Escribir	Escribir sin respuesta	Leer	Notificar	Indicar
Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro	0X1524				X	
Ángulos de Euler	0x1525				X	

Tab. 7 - Características del servicio de Lectura de datos del sensor

El valor de la característica Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro tendrá una longitud de 18 bytes, mientras que el valor de la característica Ángulos de Euler tendrá una longitud de 6 bytes. En el punto 4.2 se especifica con más detalle la interpretación de los datos recibidos en estas dos características.

#### 4.4.4. Servicio de Nivel de la batería

Este servicio informa del nivel de la batería del dispositivo. Se trata de un servicio estándar que contiene una única característica y tiene asignado el UUID 0x180F.

Característica	UUID	Propiedades				
		Escribir	Escribir sin respuesta	Leer	Notificar	Indicar
Nivel de la batería	0x2A19			X	X	

Tab. 8 - Características del servicio de Nivel de batería

En el punto 4.5.4 se especifica con más detalles la aproximación realizada para lograr una estimación del nivel de batería de la pila.

#### 4.4.5. Servicio de Información del dispositivo

El servicio de Información de dispositivo es un servicio estándar que contiene una única característica y su UUID es 0x180A.

Característica	UUID	Propiedades				
		Escribir	Escribir sin respuesta	Leer	Notificar	Indicar
Nombre del fabricante	0x2A29			X		

Tab. 9 - Características del servicio de Información del dispositivo

El valor de la única característica que contiene el servicio, indica el nombre del fabricante.

## 4.5. Interpretación de los datos

En este capítulo se describe detalladamente la interpretación de los datos enviados por todas las características de cada uno de los servicios del perfil Bluetooth diseñado.

### 4.5.1. Servicio de Acceso genérico

#### Nombre del dispositivo:

Esta característica indica el nombre del dispositivo. Por defecto se indica el nombre "MA\_Sensor". Este valor por defecto de la característica corresponde en hexadecimal con el valor "4D-41-5F-53-65-6E-73-6F-72". Este valor puede ser modificado escribiendo sobre el valor de la característica.

#### Apariencia:

La característica Apariencia indica mediante un número la apariencia externa del dispositivo. El valor indicado es el "960", que se corresponde con "Human Interface Device" (Dispositivo de Interfaz Humana). En hexadecimal corresponde con el valor 0x03C0.

#### Parámetros de conexión del esclavo:

El valor de esta característica contiene una cadena de bytes que indican los valores de los parámetros de conexión indicados en la siguiente tabla:

Parámetro	Valor enviado		Valor después de conversión
	Hexadecimal	Decimal	
Intervalo mínimo de conexión	0x0140	320	400ms
Intervalo máximo de conexión	0x0208	520	650ms
Latencia del esclavo	0x0000	0	0
Tiempo de espera de supervisión	0x0190	400	400ms

Tab. 10 - Valores de la característica Parámetros de conexión

- Intervalo de conexión: Determina la frecuencia con la que el dispositivo Central pedirá datos al dispositivo Periférico. En este caso el intervalo de conexión está entre 400ms y 650ms.
- Latencia del esclavo: Al establecer una latencia del esclavo distinta de cero, el dispositivo Periférico puede optar por no responder al dispositivo Central cuando éste pide datos, hasta el número de veces indicado en el parámetro. Sin embargo, si el dispositivo Periférico tiene datos listos para enviar, puede optar por enviarlos en cualquier momento. Ésto le permite al dispositivo Periférico quedarse en modo *sleep* más tiempo si no tiene datos para enviar.
- Tiempo de espera de supervisión: Este valor determina el tiempo de espera desde el último intercambio de datos hasta que un enlace se considere perdido. El dispositivo Central no va a tratar de volver a conectarse antes de que este tiempo de espera haya transcurrido.

Para obtener el valor de los intervalos de conexión se debe realizar la siguiente conversión:

$$\text{Valor después de conversión} = \text{Valor enviado} \times 1,25\text{ms}$$

Mientras que para obtener el valor del tiempo de espera de supervisión, se realiza la siguiente conversión:

$$\text{Valor después de conversión} = \text{Valor enviado} \times 1,00\text{ms}$$

En la siguiente imagen se puede observar cómo se visualizan los valores de las características del servicio de Acceso Genérico en el software Master Control Panel:

```
PrimaryService, Value: 00-18, Generic Access (0x1800)
├─ CharacteristicDeclaration, Value: 0A-03-00-00-2A, Properties: Read, Write, Characteristic UUID: 0x2A00
│   └─ DeviceName, Value: 4D-41-5F-53-65-6E-73-6F-72, DeviceName: MA_Sensor
├─ CharacteristicDeclaration, Value: 02-05-00-01-2A, Properties: Read, Characteristic UUID: 0x2A01
│   └─ Appearance, Value: C0-03, Appearance: 0x03C0
├─ CharacteristicDeclaration, Value: 02-07-00-04-2A, Properties: Read, Characteristic UUID: 0x2A04
│   └─ SlavePreferredConnectionParameters, Value: 40-01-08-02-00-00-90-01, MinConnInterval: 0x0140, MaxConnInterval: 0x0208, SlaveLatency: 0x0000, SupervisionTimeoutMultiplier: 0x0190
```

Fig. 16 - Características del servicio de Acceso genérico

### 4.5.2. Servicio de Atributo genérico

#### Servicio modificado:

El valor de la característica Servicio modificado se compone de una cadena de ocho bytes, correspondientes a los valores del inicio y fin del rango del *handle* del atributo afectado (4 bytes para cada valor del rango).

Se puede observar cómo se visualiza la característica Servicio modificado en el software Master Control Panel:

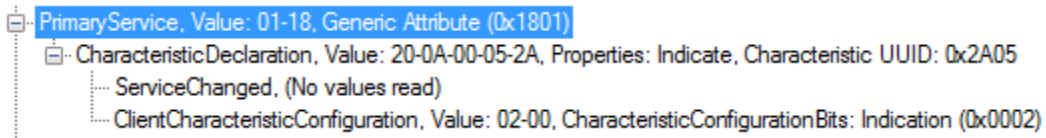


Fig. 17 - Características del servicio de Atributo genérico

### 4.5.3. Servicio de Lectura de datos del sensor

#### Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro:

El valor de esta característica se corresponde con una cadena de 18 bytes de longitud. Los seis primeros bytes corresponden a los datos recibidos por el acelerómetro, los seis siguientes al magnetómetro y los seis últimos al giroscopio. Los dos primeros bytes de cada sensor corresponden al eje X, los dos siguientes al Y y los dos últimos al Z. En la siguiente tabla se especifica detalladamente a que parámetro corresponde cada uno de los 18 bytes.

Acelerómetro						Magnetómetro						Giroscopio					
X		Y		Z		X		Y		Z		X		Y		Z	
LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Tab. 11 - Cadena de bytes enviada por la característica Acelerómetro, Giroscopio y Magnetómetro

Estos valores son actualizados cada segundo.



Los datos obtenidos a través de esta característica, se obtienen de los siguientes registros del sensor:

Datos	Eje (X/Y/Z)	Byte (LSB/MSB)	Nombre del registro	Dirección del registro
Aceleración	X	LSB	ACC_DATA_X_LSB	0x08
		MSB	ACC_DATA_X_MSB	0x09
	Y	LSB	ACC_DATA_Y_LSB	0x0A
		MSB	ACC_DATA_Y_MSB	0x0B
	Z	LSB	ACC_DATA_Z_LSB	0x0C
		MSB	ACC_DATA_Z_MSB	0x0D
Velocidad Angular	X	LSB	GYR_DATA_X_LSB	0x14
		MSB	GYR_DATA_X_MSB	0x15
	Y	LSB	GYR_DATA_Y_LSB	0x16
		MSB	GYR_DATA_Y_MSB	0x17
	Z	LSB	GYR_DATA_Z_LSB	0x18
		MSB	GYR_DATA_Z_MSB	0x19
Campo magnético	X	LSB	MAG_DATA_X_LSB	0x0E
		MSB	MAG_DATA_X_MSB	0x0F
	Y	LSB	MAG_DATA_Y_LSB	0x10
		MSB	MAG_DATA_Y_MSB	0x11
	Z	LSB	MAG_DATA_Z_LSB	0x12
		MSB	MAG_DATA_Z_MSB	0x13

Tab. 12 - Registros del sensor donde se obtienen los datos de aceleración, velocidad angular y campo magnético

La configuración establecida para cada uno de los tres sensores se muestra en la siguiente tabla:

Sensor	Parámetros	Valor
Acelerómetro	Modo de energía	Normal
	Rango	+/- 4g
	Ancho de banda	62,5Hz
	Resolución	14 bits
Giroscopio	Modo de energía	Normal
	Rango	2000º/s
	Ancho de banda	32Hz
	Resolución	16 bits
Magnetómetro	Modo de energía	Forzado
	ODR	20Hz
	Repetición XY	15
	Repetición Z	16
	Resolución X/Y/Z	13/13/15 bits

Tab. 13 - Configuración establecida para cada uno de los sensores que forman el BNO055

En la siguiente tabla se detallan las unidades de medida de cada uno de los tres datos enviados y la conversión a realizar:

Datos	Unidad de medida	Conversión
Aceleración	mG (Mili G)	1mG = 1LSB
Velocidad Angular	Dps (Grados por segundo)	1Dps = 16LSB
Campo Magnético	$\mu$ T (Micro Tesla)	1 $\mu$ T = 16LSB

Tab. 14 - Unidades de la aceleración, velocidad angular y campo magnético

A continuación se muestra el tipo de datos en cada uno de los ejes de los tres datos enviados:

Datos	Eje	Tipo de datos	Bytes
Aceleración	X	Con signo	2
	Y	Con signo	2
	Z	Con signo	2
Velocidad Angular	X	Con signo	2
	Y	Con signo	2
	Z	Con signo	2
Campo Magnético	X	Con signo	2
	Y	Con signo	2
	Z	Con signo	2

Tab. 15 - Tipo de datos de la aceleración, velocidad angular y campo magnético

### Ángulos de Euler:

En esta característica se envían los 6 bytes correspondientes a los ángulos de Euler. Los dos primeros bytes corresponden al eje X, los dos siguientes al Y y los dos últimos al Z. En la siguiente tabla se especifica detalladamente a qué parámetro corresponde cada uno de los 6 bytes enviados.

Ángulos de Euler					
X		Y		Z	
LSB	MSB	LSB	MSB	LSB	MSB
1	2	3	4	5	6

Tab. 16 - Cadena de bytes enviada por la característica Ángulos de Euler

Los ángulos de Euler son actualizados cada segundo.

Los datos obtenidos a través de la característica Ángulos de Euler, se obtienen de los siguientes registros del sensor:

Datos	Eje (X/Y/Z)	Byte (LSB/MSB)	Nombre del registro	Dirección del registro
Ángulos de Euler	X	LSB	EUL_Roll_LSB	0x1C
		MSB	EUL_Roll_MSB	0x1D
	Y	LSB	EUL_Pitch_LSB	0x0E
		MSB	EUL_Pitch_MSB	0x0F
	Z	LSB	EUL_Heading_LSB	0x1A
		MSB	EUL_Heading_MSB	0x1B

Tab. 17 - Registros del sensor donde se obtienen los ángulos de Euler

En la siguiente tabla se detallan las unidades de medida de de los ángulos de Euler y la conversión a realizar:

Datos	Unidad de medida	Conversión
Ángulos de Euler	Grados	1 Grado = 16LSB

Tab. 18 - Unidades de los ángulos de Euler

A continuación se muestra el tipo de datos en cada uno de los ejes de los ángulos de Euler:

Datos	Eje	Tipo de datos	Bytes
Ángulos de Euler	X	Con signo	2
	Y	Con signo	2
	Z	Con signo	2

Tab. 19 - Tipo de datos de los ángulos de Euler

En la siguiente imagen se puede observar cómo se visualizan los valores de las características del servicio de Lectura de datos del sensor en el software Master Control Panel:

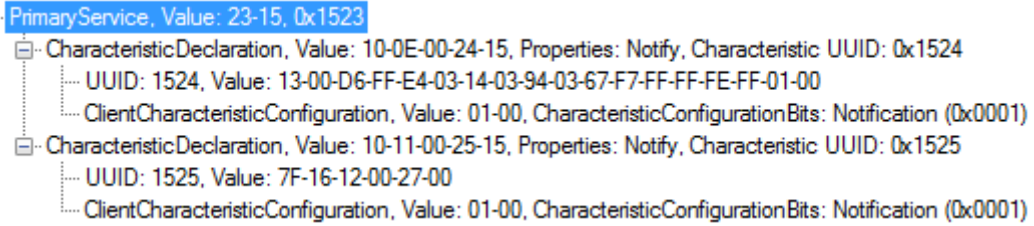


Fig. 18 - Características del servicio de Lectura de datos del sensor

#### 4.5.4. Servicio de Nivel de la batería

##### Nivel de la batería:

En esta característica se envía un único byte correspondiente al porcentaje del nivel de la batería.

En la siguiente tabla se especifica el rango de valores que puede tomar la característica y la conversión a realizar:

Parámetro		Valor enviado		Valor después de conversión
		Hexadecimal	Decimal	
Nivel de la batería	Valor mínimo	0x00	0	0%
	Valor máximo	0x64	100	100%

Tab. 20 - Valores de la característica Nivel de batería

Para obtener el valor del porcentaje del nivel de la batería es necesario realizar la siguiente conversión:

$$\text{Valor después de conversión} = \text{Valor enviado} \times 1,00\%$$

El nivel de la batería es actualizado cada dos segundos.

Para estimar el porcentaje del nivel de batería, se ha tenido en cuenta la curva de descarga de la pila CR2032:

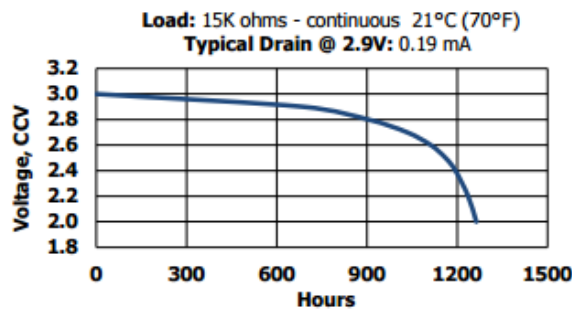


Fig. 19 - Curva de descarga de la pila CR2032

Se ha realizado la siguiente aproximación teniendo en cuenta la curva de descarga de la pila CR2032:

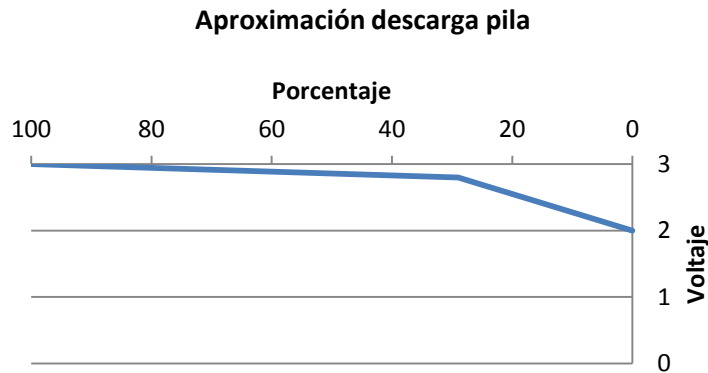


Fig. 20 - Aproximación lineal de la curva de descarga de la pila CR2032

Se ha realizado la aproximación siguiendo la siguiente tabla de relación de valores Voltaje/Porcentaje:

Voltaje	Porcentaje
3	100
2,8	29
2	0

Tab. 21 - Relación Voltaje/Porcentaje de la aproximación lineal de la curva de descarga de la pila CR2032

En la siguiente imagen se puede observar cómo se visualizan los valores de la característica Nivel de la batería en el software Master Control Panel:

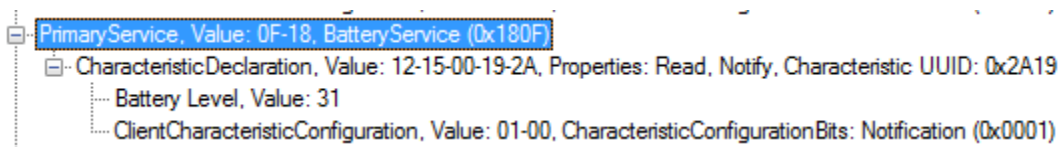


Fig. 21 - Características del servicio de Nivel de batería

#### 4.5.5. Servicio de Información del dispositivo

##### Nombre del fabricante:

En esta característica se envían 19 bytes indicando, como el propio nombre de la característica indica, el nombre del fabricante. El valor enviado en hexadecimal es "4E-6F-72-64-69-63-53-65-6D-69-63-6F-6E-64-75-63-74-6F-72". Esta cadena de bytes se corresponde a la cadena de caracteres "NordicSemiconductor".

En la siguiente imagen se puede observar cómo se visualizan los valores de la característica Nombre del fabricante en el software Master Control Panel:

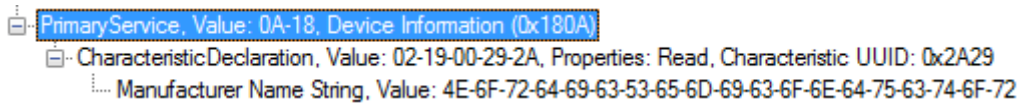


Fig. 22 - Características del servicio de Información del dispositivo

## 4.6. Diseño de la PCB

Para el diseño de la PCB, se decidió utilizar el módulo BNO-055 9 axis motion sensor with hardware fusion. Se trata de un módulo que integra el sensor BNO055. Como módulo de comunicaciones se escogió el Waveshare Mini nRF51822 2.4GHz Wireless Bluetooth V4.0 Development Board - Blue. El Waveshare Mini nRF51822 es un módulo que integra el SoC (System on a chip) nRF51822. Ambos módulos están compuestos tanto por el sensor, como por el módulo de comunicaciones con los que había estado trabajando anteriormente.

Altium Designer fue el software utilizado para realizar el diseño de la PCB.

En la siguiente imagen se puede ver el resultado final de la PCB desarrollada en el proyecto.

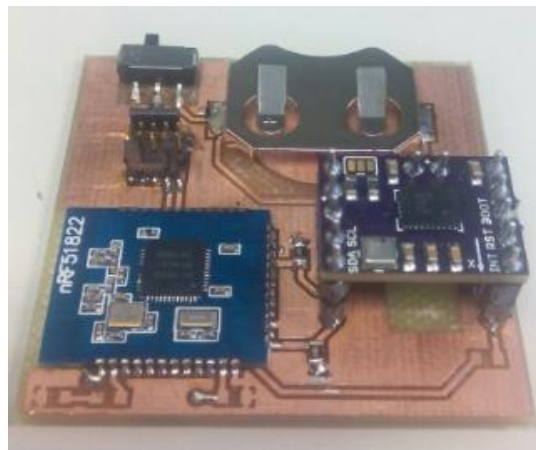


Fig. 23 - Diseño final de la placa del prototipo

## 4.7. Pruebas funcionamiento del hardware

Para verificar que los datos enviados por el prototipo eran los correctos, se modificó ligeramente el código para realizar la correspondiente conversión de los ángulos de Euler y enviarlos al PC por el puerto serie.

```

// Read Euler Angles
dataW[0] = 0x1A;
twi_master_transfer(0x52,dataW,1,0);
nrf_delay_ms(10);
twi_master_transfer(addrR,dataR,6,1);
nrf_delay_ms(10);

int16_t destination[3];

destination[0] = ((int16_t)dataR[1] << 8) | dataR[0];
destination[1] = ((int16_t)dataR[3] << 8) | dataR[2];
destination[2] = ((int16_t)dataR[5] << 8) | dataR[4];

float Pitch, Yaw, Roll;

Yaw = (float)destination[0]/16;
Roll = (float)destination[1]/16;
Pitch = (float)destination[2]/16;

printf("\n\rYaw: %f\n\r",Yaw);
printf("\n\rRoll: %f\n\r",Roll);
printf("\n\rPitch: %f\n\r",Pitch);

```

Fig. 24 - Código añadido para la conversión de los ángulos de Euler

Para la recepción de estos datos en el PC por el puerto serie, se utilizó el software Tera Term.

Los ángulos de Euler fueron obtenidos rotando el dispositivo en torno al eje *Yaw*.

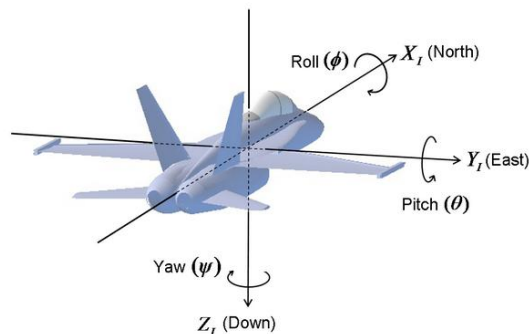


Fig. 25 - Representación de los ángulos de Euler en los ejes X/Y/Z

- Ángulo Yaw: 0°
  - Posicionamiento de la placa:

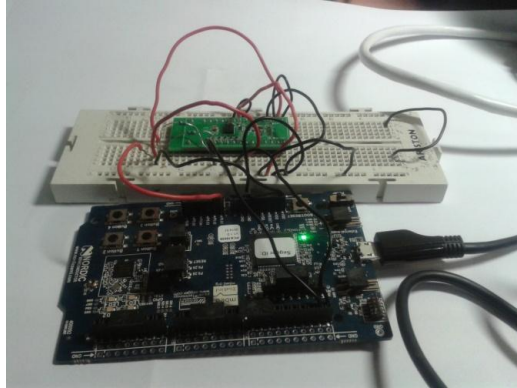


Fig. 26 - Posicionamiento de la placa a 0° en el eje Yaw

- Datos obtenidos: 0,94° aproximadamente:

```
Yaw: 0.937500  
Roll: 1.500000  
Pitch: 2.062500
```

Fig. 27 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 0° en el eje Yaw

- Ángulo Yaw: 90°
  - Posicionamiento de la placa:

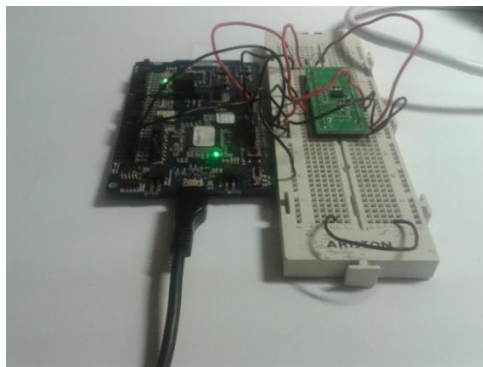


Fig. 28 - Posicionamiento de la placa a 90° en el eje Yaw

- Datos obtenidos: 94,31° aproximadamente:

```
Yaw: 94.312500  
Roll: 2.000000  
Pitch: 2.375000
```

Fig. 29 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 90° en el eje Yaw



- Ángulo Yaw: 180°
  - Posicionamiento de la placa:

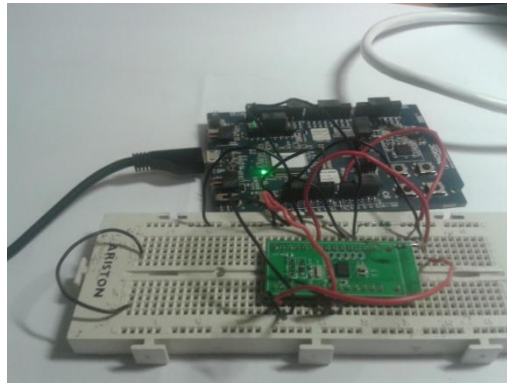


Fig. 30 - Posicionamiento de la placa a 180° en el eje Yaw

- Datos obtenidos: 183,06° aproximadamente:

```
Yaw: 183.062500  
Roll: 2.000000  
Pitch: 2.687500
```

Fig. 31 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 180° en el eje Yaw

- Ángulo Yaw: 270°
  - Posicionamiento de la placa:

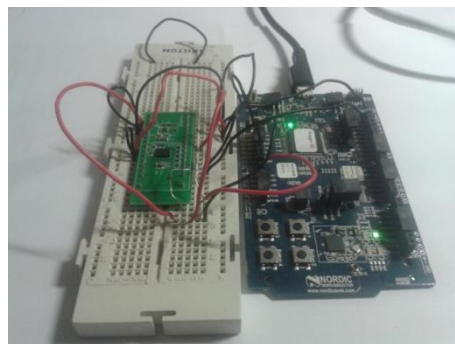


Fig. 32 - Posicionamiento de la placa a 270° en el eje Yaw

- Datos obtenidos: 274,18° aproximadamente:

```
Yaw: 274.187500  
Roll: 1.937500  
Pitch: 2.562500
```

Fig. 33 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 270° en el eje Yaw

- Ángulo Yaw: 360°
  - Posicionamiento de la placa:

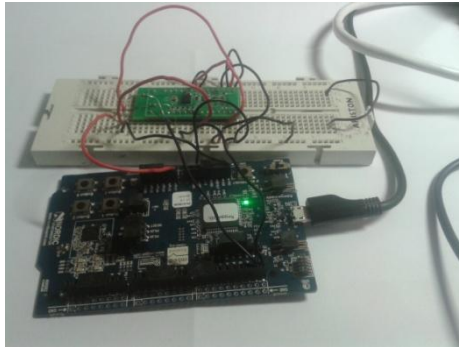


Fig. 34 - Posicionamiento de la placa a 360° en el eje Yaw

- Datos obtenidos: 355,50° aproximadamente:

```
Yaw: 355.500000  
Roll: 3.062500  
Pitch: 0.937500
```

Fig. 35 - Ángulos de Euler obtenidos con la placa posicionada a 360° en el eje Yaw

## 5. Conclusiones

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Máster era disponer de un prototipo de sistema que permitiera capturar datos de movimiento y enviarlos de modo inalámbrico a otro dispositivo como puede ser un ordenador o un teléfono móvil. Para el desarrollo del prototipo se han abordado diferentes aspectos.

El primer objetivo a cumplir fue seleccionar el protocolo de comunicaciones inalámbrica a utilizar y la adquisición de los conocimientos teóricos necesarios para desarrollar aplicaciones con el protocolo seleccionado (Bluetooth Low Energy).

El segundo objetivo cumplido fue la captura del movimiento. Primero se seleccionó el sensor a utilizar, teniendo en cuenta para ello, que pudiera capturar datos de aceleración, velocidad angular y campo magnético. Además, el sensor escogido (BNO055) permitía obtener directamente los ángulos de Euler mediante el modo de fusión de sensores, sin la necesidad de añadir ningún algoritmo extra. Una vez escogido el sensor, se integraron en el proyecto las librerías que proporciona BOSCH para la lectura de datos del sensor adaptándolas a las necesidades del proyecto.

El tercer objetivo a lograr era el desarrollo de servicios Bluetooth mediante los que se iban a enviar los datos obtenidos del sensor y el nivel de la batería. En primer lugar, se programó una librería propia en la que se desarrolló un servicio personalizado con dos características para el envío de los datos obtenidos del sensor. En segundo lugar, se programó una segunda librería propia en la que se determina la aproximación del nivel de la batería. Posteriormente se desarrolló un servicio estándar con una característica para el envío del nivel de la batería y al igual que para el resto de servicios desarrollados, se integraron en el proyecto las librerías que proporciona Nordic para dichos servicios estándar.

Como objetivos personales, se han mejorado los conocimientos de programación en lenguaje de programación C y se han adquirido nuevos conocimientos sobre uno de los protocolos de comunicación inalámbrica de bajo consumo más utilizados, como es Bluetooth Low Energy.

Se puede decir, que se han cumplido todos objetivos planteados inicialmente.

## 6. Futuros trabajos

El presente prototipo podría ser mejorado en algunos aspectos en función de la aplicación para la que vaya a ser utilizado. Uno de los aspectos a mejorar en el caso de que el consumo sea un requisito excesivamente importante, podría ser el ajuste de una latencia del esclavo con el fin de que el dispositivo pudiera estar más tiempo en modo *sleep*. Por el mismo motivo, también es posible establecer en el sensor el modo de bajo consumo. También en función de la aplicación para la que vaya a ser utilizado, se pueden ajustar los parámetros de conexión.

También es posible realizar una calibración del sensor ajustando un offset determinado en cada uno de los bytes de los tres sensores. Para ello basta con escribir el offset en el correspondiente registro del sensor.

Aunque el presente prototipo tiene un tamaño pequeño (41mm x 45mm), se podría reducir diseñando una PCB que se compusiera directamente de los integrados que componen el sensor y el transceptor BLE, en lugar de incluirlos en módulos.

Tal y como se menciona en el capítulo del estado del arte, el prototipo diseñado en este TFM puede resultar interesante para el desarrollo de multitud de aplicaciones relacionadas con la monitorización del movimiento, como pueden ser aplicaciones para la medición de los ángulos de las articulaciones, para la monitorización de los movimientos de los ligamentos, para clasificar determinadas actividades que realiza el ser humano, para mejorar las técnicas de movimiento durante la realización de un determinado deporte, etc.

Adicionalmente, el módulo sensor añadido en la PCB, además de integrar el sensor de nueve grados de libertad, también integra un sensor barométrico. Como futuro trabajo, se podría reprogramar el dispositivo para darle utilidad a dicho sensor. A este sensor, se le podría dar utilidad en aplicaciones para medir presiones de agua o aire en tuberías, fuerza en celdas de carga, tensión de los materiales, peso en básculas, etc.

## 7. Bibliografía

- [1] Alfonso Bahillo, Ignacio Angulo, Enrique Onieva, Asier Perallos, Patricia Fernández "Low-Cost Bluetooth Foot-Mounted IMU for Pedestrian Tracking in Industrial Environments", 2015.
- [2] Saba Bakhshi, Mohammad H. Mahoor, Bradley S. Davidson "Development of a body joint angle measurement system using IMU sensors", 2011.
- [3] Spulber, I. Papi, E. Chen, Y.M. Anastasova-Ivanova, S. Bergmann, J. Georgiou, P. McGregor, A.H. "Development of a wireless multi-functional body sensing platform for smart garment integration", 2014.
- [4] Hao Yan and David A. Johns, Fellow "An Open Source Inertial Sensor Network with Bluetooth Smart", 2015.
- [5] Karol J. O'Donovana, Roman Kamnikb, Derek T. O'Keeffe, Gerard M. Lyons, "An inertial and magnetic sensor based technique for joint angle measurement", 2007.
- [6] Nicolai L. Mifsud; Nils H. Kristensen; Morten Villumsen; John Hansen, Uwe G. Kersting, "Portable inertial motion unit for continuous assessment of in-shoe foot movement", 2014.
- [7] Dirk Weenk, Bert-Jan F van Beijnum, Chris TMBaten, Hermie J Hermens and Peter H Veltink,, "Automatic identification of inertial sensor placement on human body segments during walking", 2014.
- [8] Amin Ahmadi, Edmond Mitchell, Francois Destelle, Marc Gowing, Noel E. O'Connor, Chris Richter, Kieran Moran, "Automatic Activity Classification and Movement Assessment During a Sports Training Session Using Wearable Inertial Sensors", 2014.
- [9] X. Long, B. Yin, and R. M. Aarts, "Single-accelerometer-based daily physical activity classification", 2009.
- [10] Y. Ohgi, H. Ichikawa, and C. Miyaji, "Microcomputer-based acceleration sensor device for swimming stroke monitoring.", 2002.
- [11] A. Ahmadi, D. D. Rowlands, and D. A. James, "Investigating the translational and rotational motion of the swing using accelerometers for athlete skill assessment,", 2006.
- [12] Andreas Bulling, Ulf Blanke, Bernt Schiele, "A Tutorial on Human Activity Recognition Using Body-Worn Inertial Sensors", 2014.
- [13] Hassan Ghasemzadeh, Eric Guenterberg, Roozbeh Jafari, "Energy-Efficient Information-Driven Coverage for Physical Movement Monitoring in Body Sensor Networks", 2009.
- [14] Georg GARTNER, Andrew FRANK, Günther RETSCHER, "Pedestrian Navigation System in Mixed Indoor/Outdoor Environment", 2004.
- [15] Jussi Collin, Oleg Mezentsev, Gérard Lachapelle "INDOOR POSITIONING SYSTEM USING ACCELEROMETRY AND HIGH ACCURACY HEADING SENSORS", 2003.

- [16] Mattias Eliasson, "A Kalman filter approach to reduce position error for pedestrian applications in areas of bad GPS reception", 2014.
- [17] Elke Mackensen, Matthias Lai, Thomas M. Wendt, "Performance Analysis of an Bluetooth Low Energy Sensor System", 2012.
- [18] Elke Mackensen, Matthias Lai, Thomas M. Wendt, "Bluetooth Low Energy (BLE) based wireless sensors", 2012.
- [19] <https://developer.bluetooth.org>
- [20] <https://www.safaribooksonline.com/library/view/Getting+Started+with+Bluetooth+Low+Energy>
- [21] <http://www.bluetooth.com/>
- [22] Nordic Semiconductor, "Creating Bluetooth Low Energy Applications Using nRF51822", 2014.
- [23] Nordic Semiconductor, "nRF51 Development Kit, Developing with the MDK-ARM Microcontroller Development Kit", 2014.
- [24] Nordic Semiconductor, "nRF51 Dongle, Developing with the MDK-ARM Microcontroller Development Kit", 2014.
- [25] Nordic Semiconductor, "nRF51422, Product Specification v1.2", 2013.
- [24] Bosch Sensortec "BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor - Data sheet", 2014.
- [26] Bosch Sensortec "BNO055 Shuttle Board", 2014.
- [27] Bosch Sensortec "BNO055 Quick start guide", 2015.
- [28] <http://www.aislelabs.com/reports/beacon-guide/#chipsets>

## Anexo A: Herramientas utilizadas

En este apartado se describen las herramientas utilizadas y la configuración general requerida.

### A.1. Hardware

Además de la placa nRF51-DK y el sensor BNO055, ya comentados en el apartado anterior, se ha utilizado hardware adicional.

#### A.1.1. Placa de desarrollo nRF51-DK

El nRF51-DK es una placa de bajo coste que contiene un kit de desarrollo para aplicaciones Bluetooth Smart y ANT. El kit es un hardware compatible con el estándar de Arduino Uno Revisión 3.

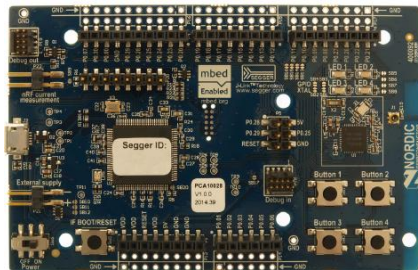


Fig. 36 - Placa de desarrollo nRF51-DK

Esta placa soporta las siguientes herramientas de desarrollo de software: Keil, IAR, GCC y ARM mbed. El kit de desarrollo se puede utilizar como un útil y eficaz analizador de paquetes Bluetooth Smart utilizando el software Nordic nRF Sniffer permitiendo que todos los datos detallados relacionados con la comunicación Bluetooth Smart sean capturados y analizados.

Los *stacks* de Nordic Semiconductors son conocidos como Softdevices. Los Softdevices son archivos binarios pre-compilados que pueden ser programados en el nRF51 y se pueden descargar desde la página web de Nordic. El nRF51-DK soporta todos los Softdevices de Nordic y proporciona un amplio soporte de software y ejemplos completos tanto para Bluetooth Smart como para ANT.

Esta placa de desarrollo ha sido utilizada en el proyecto como módulo de comunicaciones BLE para el envío de los datos obtenidos de la placa del sensor BNO055 Shuttle Board.

### A.1.2. BNO055 Shuttle Board

El BNO055 Shuttle Board es una PCB que contiene el sensor BNO055 y permite un fácil acceso a los pines del sensor.

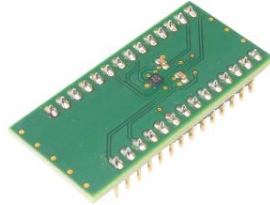


Fig. 37 - BNO055 Shuttle Board

En este trabajo se ha utilizado el Bosch Sensortec BNO055 Shuttle Board para facilitar la conexión del sensor con la placa de desarrollo nRF51-DK.

### A.1.3. Whaveshare Mini nRF51822

El Whaveshare Mini nRF51822 es un módulo que integra el nRF51822. Este módulo forma parte del prototipo desarrollado y ha sido integrado en la PCB final como el módulo de comunicaciones inalámbrica.



Fig. 38 - Whaveshare Mini nRF51822

### A.1.4. BNO055 Module

El módulo del BNO055 integra el sensor BNO055 y forma parte del diseño final del prototipo. Además del sensor BNO055, este módulo también integra un sensor barométrico, concretamente el BMP280 de Bosch.



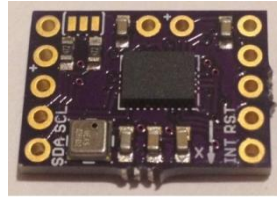


Fig. 39 - BNO055 Module

### A.1.5. nRF51 Dongle

El nRF51 Dongle es un USB de bajo coste para desarrollos Bluetooth Smart y ANT. Tiene un led, un botón y 6 PADS para conexiones GPIO programables.

Este *dongle* soporta las siguientes herramientas de desarrollo de software: Keil, IAR, GCC y ARM mbed. El kit de desarrollo se puede utilizar como un útil y eficaz analizador de paquetes Bluetooth Smart utilizando el software Nordic nRF Sniffer permitiendo que todos los datos detallados relacionados a la comunicación Bluetooth Smart sean capturados y analizados.



Fig. 40 - nRF51 Dongle

Los *stacks* de Nordic Semiconductors son conocidos como Softdevices. Los Softdevices son archivos binarios pre-compilados que pueden ser programados en el nRF51y se pueden descargar desde la página web de Nordic. El nRF51 Dongle soporta todos los Softdevices de Nordic y proporciona un amplio soporte de Software y ejemplos completos tanto para Bluetooth Smart como para ANT.

El nRF51 Dongle es utilizado en este proyecto como cliente para probar la aplicación desarrollada en la placa nRF51-DK. Desde la aplicación Master Control Panel es posible descargar un programa en el nRF51 Dongle para que la propia aplicación pueda interactuar con el *dongle*.

## A.2. Software

### A.2.1. Keil uVision 5

Keil uVision es un entorno de desarrollo diseñado para desarrolladores profesionales de software. Sin embargo, desarrolladores de todos los niveles pueden utilizarlo para obtener el máximo rendimiento de las arquitecturas de microprocesadores embebidos que son compatibles. El entorno de desarrollo Keil uVision admite tres principales arquitecturas de microprocesadores y sostiene el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones.

Keil uVision ha sido el software más utilizado en el proyecto. Se ha utilizado para desarrollar el 100% de la aplicación del proyecto en el lenguaje de programación C.

### A.2.2. Tera Term

Tera Term es un programa de código abierto, gratuito y emulador de terminal. Emula diferentes tipos de terminales. Soporta Telnet, SSH 1 y 2 y las conexiones de puerto serie. También tiene incorporado un lenguaje de Script y algunos plugins útiles.

En este proyecto ha sido utilizado para el testeo del envío correcto de datos del sensor a la placa de desarrollo.

### A.2.3. Master Control Panel 3.8.0

nRF Master Control Panel es una herramienta genérica de gran alcance que permite escanear y explorar los diferentes dispositivos Bluetooth Smart y conectarse con ellos. Master Control Panel soporta una serie de perfiles adoptados en Bluetooth SIG, así como el perfil Device Firmware Update (DFU) de Nordic Semiconductor.

Características del software:

- Escanea dispositivos Bluetooth Smart
- Procesa datos publicitarios
- Muestra el gráfico de RSSI
- Conecta con cualquier dispositivo BLE
- Descubre y procesa los servicios y características
- Permite la lectura y escritura de características
- Permite activar y desactivar las notificaciones e indicaciones

Además, Master Control Panel dispone de una versión para PC y de otra versión para versiones 4.3 o superiores de sistemas operativos Android.

Para la utilización de esta aplicación en el PC, ha sido necesario el uso del nRF51 Dongle. Master Control Panel ha sido una herramienta muy útil para este proyecto. Ha sido utilizado desde el principio hasta el final del proyecto, tanto para el testeo de aplicaciones

estándar, como para pruebas de servicios y características que se iban creando y modificando a lo largo del proyecto.

#### **A.2.4. Altium Designer**

Altium Designer es un paquete de software de automatización de diseño electrónico para placas de circuito impreso, FPGA y diseño de software embebido. Este software es desarrollado y comercializado por Altium Limited de Australia.

Altium Designer ha sido utilizado en este proyecto para la realización del diseño de la PCB final.

## Anexo B - Bluetooth Low Energy

Este capítulo describe las diferentes capas del protocolo BLE, los componentes dentro de estas capas, y sus conceptos.

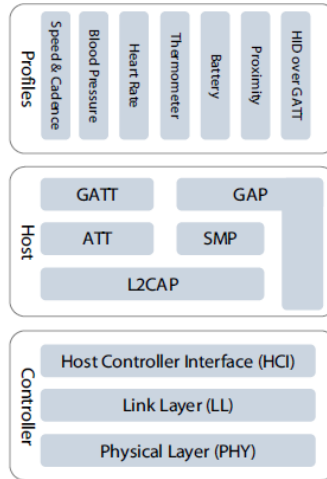


Fig. 41 - Capas protocolo BLE

### B.1. Perfil de Acceso Genérico (GAP)

El Perfil de Acceso Genérico es la capa más baja del *stack* de Bluetooth. Incluye los parámetros que especifican el evento *advertising* y la conexión entre otras cosas.

#### B.1.1. Roles

En la creación y el mantenimiento de un enlace BLE, ciertos roles están involucrados. Un dispositivo BLE tiene asignado el rol de dispositivo Central o el de dispositivo Periférico, dependiendo del iniciador del enlace. El dispositivo Central es siempre el dispositivo que inicia la conexión, mientras que el dispositivo Periférico es el dispositivo al que está conectado. Los términos "maestro" y "esclavo" hacen referencia a los roles de la capa de enlace equivalentes a Central y Periférico.

Además de los roles Central y Periférico, la especificación Bluetooth Core define los roles Observador y Emisor. Los Observadores reciben la información, mientras que los emisores envían pero no reciben información. Tanto el rol de Observador como el de Emisor sólo se utilizan en el evento *advertising* y nunca establecen una conexión. El dispositivo que se encuentra en el otro extremo del enlace suele llamarse dispositivo de pares, incluso si el dispositivo en cuestión es un dispositivo Central o Periférico.

### B.1.2. Advertising

Para que un dispositivo Central se pueda conectar a un dispositivo Periférico, el dispositivo Periférico debe estar anunciando. Se envían paquetes publicitarios con un intervalo de tiempo. Este intervalo de tiempo es conocido como el intervalo de *advertising* y oscila entre los 10ms y los 10,24s. El intervalo de *advertising* afecta al tiempo que se necesita para iniciar una conexión.

El dispositivo Central debe recibir un paquete publicitario antes de que pueda enviar una petición para iniciar una conexión. El dispositivo Periférico sólo recibe las peticiones de conexión para un intervalo corto de tiempo después del envío de un paquete publicitario.

Un paquete publicitario puede contener hasta 31 bytes de datos. Por lo general, suele contener un nombre significativo del usuario, la información sobre el dispositivo que envía los paquetes, algunos flags para saber si el dispositivo es visible o no, etc.

Cuando un dispositivo Central recibe un paquete publicitario, puede enviar una petición para obtener más datos sobre el evento *advertising* (petición de escaneo) si está configurado como un escáner activo.

El evento *advertising* (peticiones de escaneo y las respuestas incluidas) se produce en tres frecuencias distribuidas en la banda de 2,4GHz para evitar interferencias WLAN.

### B.1.3. Escaneado

El dispositivo Central utiliza el escaneado para recibir paquetes publicitarios y enviar peticiones de escaneo. Hay dos parámetros temporales que se necesitan para conocer este contexto: la ventana de escaneado y el intervalo de escaneado.

Para cada intervalo de escaneado, el dispositivo Central escanea en busca de un tiempo igual al de la ventana de escaneado. Esto significa que si la ventana de escaneado es igual al intervalo de escaneado, el dispositivo Central hará un escaneado continuo. La ventana de escaneado dividida por el intervalo de escaneado se conoce como el ciclo de trabajo del escaneado.

### B.1.4. Iniciación

Cuando el dispositivo Central quiere entrar en una conexión, se utilizará el mismo procedimiento que cuando se escanea para recibir los paquetes publicitarios. El dispositivo Central enviará una petición de conexión al dispositivo Periférico cuando reciba un paquete publicitario.

### **B.1.5. Conexión**

Por definición, el dispositivo Central y el Periférico están en una conexión desde el primer intercambio de datos. Cuando estén en una conexión, el dispositivo Central solicitará datos del dispositivo Periférico a intervalos definidos. Este intervalo es llamado intervalo de conexión. Se aplica al enlace por el dispositivo Central, pero un dispositivo Periférico puede enviar peticiones de actualización del parámetro de conexión al dispositivo Central. El intervalo de conexión debe estar comprendido entre los 7,5ms y los 4s de acuerdo con la especificación Bluetooth Core.

Si el dispositivo Periférico no responde a los paquetes del dispositivo Central dentro del marco de tiempo (tiempo de espera de la conexión), el enlace se considera perdido.

Es posible lograr un mayor procesamiento de datos mediante la transmisión de múltiples paquetes en cada intervalo de conexión. Cada paquete transferido puede contener hasta 20 bytes de datos. Sin embargo, si el consumo actual es importante y un dispositivo Periférico no tiene datos para enviar, se puede optar por ignorar un cierto número de intervalos. El número de intervalos ignorados se conoce como la latencia del esclavo.

## **B.2. Perfil de Atributo Genérico (GATT)**

El perfil de Atributo Genérico es la capa donde los valores de los datos se transfieren.

### **B.2.1. Roles**

Además de los roles definidos en el Perfil de Acceso Genérico, BLE también define dos roles en el Perfil de Atributo Genérico: Servidor GATT y Cliente GATT. Los roles del Perfil de Atributo Genérico son completamente independientes de los roles del Perfil de Acceso Genérico. El dispositivo de almacenamiento de datos es el Servidor GATT, mientras que el dispositivo que accede a los datos es el Cliente GATT. Es posible que un dispositivo ejerza tanto de Servidor GATT como de Cliente GATT simultáneamente.

### **B.2.2. Jerarquía GATT**

Un Servidor GATT organiza los datos en lo que se denomina tabla de atributos.

	Handle	UUID	Permissions	Value
Service	0x0001	SERVICE	READ	HRS
Characteristic	0x0002	CHAR	READ	HRM
	0x0003	HRM	READ/NOTIF	80 bpm
Descriptor	0x0004	DESC	READ	NOTIFY

Fig. 42 - Tabla de atributos BLE

### Atributo:

Un atributo tiene un *handle*, un UUID y un valor. Un *handle* es el índice de la tabla GATT para el atributo y es único para cada atributo en un dispositivo. El UUID contiene información sobre el tipo de datos dentro del atributo y es una información clave para la comprensión de los bytes que están contenidos en el valor del atributo. Puede haber muchos atributos en un tabla GATT con un mismo UUID.

### Característica:

Una característica consiste en al menos dos atributos: uno para la declaración de la característica y el otro para el valor de la característica.

Todos los datos que se transfieren a través de un Servicio GATT deben asignarse a un conjunto de características.

### Descriptores:

Cualquier atributo dentro de la definición de característica que no es el valor de la característica, es definido como descriptor. Un descriptor es un atributo adicional que proporciona más información sobre la característica, como por ejemplo, una descripción legible de la característica.

Sin embargo, hay un descriptor especial. Este descriptor es el descriptor de la configuración de la característica del Cliente (CCCD). El descriptor CCCD se añade para cualquier característica que sea compatible con las propiedades notificación o indicación. Escribir un "1" en el CCCD supone habilitar las notificaciones, un "2" las indicaciones y un "0" deshabilita tanto las notificaciones como las indicaciones.

### Servicio:

Un servicio consta de una o más características y es un conjunto de características relacionadas. Los servicios GATT, normalmente, incluyen partes de funcionalidad relacionada, como por ejemplo, la lectura y ajustes de un sensor en particular.

## Perfil:

Un perfil incluye uno o más servicios. Un documento de perfil incluye información sobre los servicios (obligatorios u opcionales) para el perfil en particular, así como de los pares que interactuarán entre ellos. Incluye información tanto de los roles del Perfil de Atributo Genérico como de los roles del Perfil de Acceso Genérico de los dispositivos que estarán intercambiando datos. Por lo tanto, este documento contendrá a menudo información sobre los intervalos del evento *advertising* y conexión, si se requiere seguridad, etc. Cabe señalar, que un perfil no tiene atributos en la tabla de atributos.

### B.2.3. Servicios y características estándar y personalizados

El Bluetooth SIG ha definido un número de perfiles, servicios, características y atributos basados en la capa GATT de la pila. Sin embargo, con Bluetooth Low Energy, todas las implementaciones de servicios son parte de la aplicación y no de la pila, lo que significa que es posible para una aplicación soportar cualquier perfil o servicio que se quiera, siempre y cuando la pila soporte el GATT.

### B.2.4. UUIDs

Como se ha mencionado anteriormente, todos los atributos tienen un UUID. Un UUID es un número de 128 bits que es único en el mundo y se utiliza para identificar un tipo de atributo.

La especificación Bluetooth Core hace una distinción entre un UUID base y un UUID de 16 bits. El UUID de 16 bits completa el UUID base. Todos los UUID definidos por Bluetooth SIG, utilizan un UUID base común, concretamente el siguiente:

0x0000xxxx-0000-1000-8000-00805F9B34FB

Para definir con más precisión este UUID base, cada atributo definido por Bluetooth SIG tiene un único UUID de 16 bits que sustituye las "x" en el UUID base común mencionado. La característica de la medida de la frecuencia cardiaca, por ejemplo, 0x2A37 como UUID de 16 bits y por lo tanto, el UUID completo de 128 bits para la característica de la medida de la frecuencia cardiaca es:

0x00002A37-0000-1000-8000-00805F9B34FB

Dado que todos los UUIDs definidos por Bluetooth SIG utilizan el mismo UUID base, el UUID de 16 bits es suficiente para identificar de forma exclusiva un atributo definido por el Bluetooth SIG.



## B.2.5. Operaciones y propiedades

La mayoría de las operaciones se producen utilizando el *handle*, puesto que identifica de manera única a cada atributo. El uso de la característica depende de sus propiedades:

- Escribir
- Escribir sin respuesta
- Leer
- Notificar
- Indicar

Se definen más propiedades en la especificación Bluetooth, pero éstas son las más importantes y utilizadas.

### **Escribir y Escribir sin respuesta:**

Las operaciones Escribir y Escribir sin respuesta permiten al Cliente GATT escribir un valor en una característica en un Servidor GATT. La diferencia entre ambos es que Escribir sin respuesta sucede sin ninguna confirmación o respuesta a nivel de aplicación.

### **Leer:**

La propiedad Leer hace que sea posible para el Cliente GATT leer el valor de una característica en un Servidor GATT.

### **Notificar e Indicar**

Notificar e Indicar permite a un Servidor GATT hacer que el Cliente GATT reciba todos los cambios de una característica. La diferencia entre Notificar e Indicar es que Indicar tiene confirmación a nivel de aplicación, mientras que Notificar no.

### B.3. Bluetooth VS Bluetooth Low Energy

BLE y Bluetooth tienen muchas similitudes. El sistema BLE opera en la banda ISM de los 2.4 GHz, de los 2400 MHz a los 2483.5 MHz. La potencia de transmisión de un transmisor BLE varía entre los 0,01mW (-20dBm) y los 10mW (10dBm). Además, usa 40 canales RF separados por 2MHz. Se utilizan tres canales como canales publicitarios y 37 como canales de datos.

#### Pila de protocolos de BLE:

El tamaño de la pila de protocolos es una importante diferencia entre Bluetooth y BLE. El tamaño de la pila de protocolos de BLE es bastante pequeño en comparación con la de Bluetooth. La complejidad fue reducida para obtener una pila ligera para aplicaciones de nodos de sensores. Además se estableció una separación entre las capas del controlador y del host. La pila puede ser implementada en un único microprocesador debido a su simple configuración. Por este motivo, muchos fabricantes de transceptores apoyan a los desarrolladores e investigadores diseñando pilas de software gratuitas.

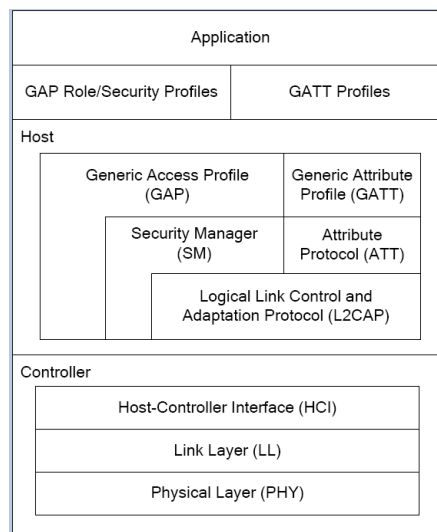


Fig. 43 - Pila de protocolos BLE

#### Estados de la capa de enlace de BLE:

Otra diferencia entre BLE y Bluetooth es la posible máquina de estados. La siguiente figura muestra el diagrama de estados de la capa de enlace lógica de un transceptor Bluetooth y de otro transceptor BLE. Se puede observar que la máquina de estados de un dispositivo BLE es muy simple.

En el "Estado Publicitario", los dispositivos BLE pueden transmitir datos sin conexión como emisor de dispositivos de escaneo. Además, los dispositivos BLE publicitarios pueden

señalizar los dispositivos de escaneo e iniciación que estén listos para entrar en una conexión fija. Sólo tres de los 40 canales son utilizados para la comunicación publicitaria.

Un dispositivo, en el "Estado de Escaneo" y en el "Estado de Iniciación", escuchará paquetes desde un dispositivo publicitario específico. Este dispositivo responderá a estos paquetes para iniciar una nueva conexión. Un dispositivo en el "Estado de Conexión" es aquel que está en una conexión. Hay dos funciones diferentes dentro del "Estado de Conexión", *Master* y Esclavo. Cuando se cambia del "Estado de Iniciación" al "Estado de Conexión", el dispositivo hace la función de *Master*. Mientras que cuando se entra en el "Estado de Conexión" desde el "Estado Publicitario", el dispositivo hace la función de Esclavo. Es importante saber que el *Master* define todos los tiempos de conexión.

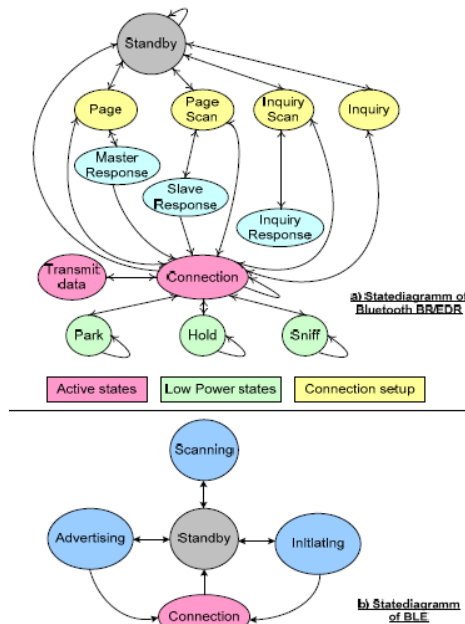


Fig. 44 - Estados de la capa de enlace Bluetooth y BLE

### Estructura de la red en el estado de conexión:

Una importante desventaja de Bluetooth relacionada con las redes de sensores es el número de participantes en una piconet, que está limitado a ocho. Es posible construir redes más grandes (redes dispersas), de ahí que la estructura de red sea más compleja. Es posible obtener una mezcla de roles dentro de un dispositivo (por ejemplo: *master* y esclavo, esclavo en dos piconet, etc.). Además, es posible cambiar el rol de *master* a esclavo en el "Estado de conexión". Por lo tanto, el consumo de energía de los dispositivos Bluetooth podría estar aumentando en función del rol que ejerce en la red.

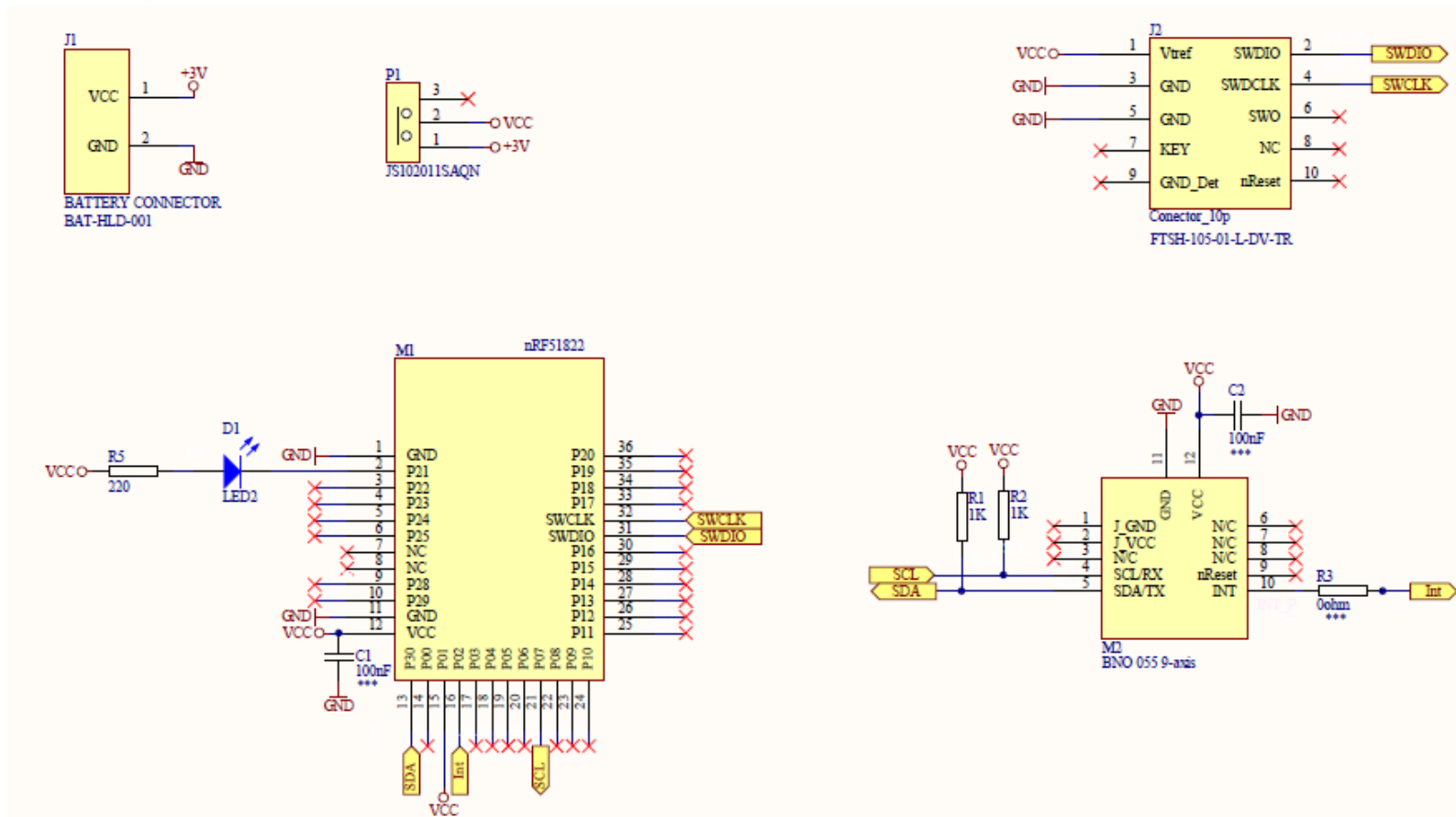
En una conexión entre dispositivos BLE, los roles se fijan a *master* o esclavo. No es posible ser un *master* y un esclavo, ni intercambiar los roles. BLE permite conexiones simples punto a punto o redes en estrella con un sólo *master* al mismo tiempo. Las investigaciones y la experiencia práctica han demostrado que una topología de redes en estrella es suficiente para casi todas las aplicaciones de sensores inalámbricos. El número máximo de participantes en una topología de red en estrella en BLE está limitado a  $2^{32}$ .

#### **Estructura de los paquetes de datos:**

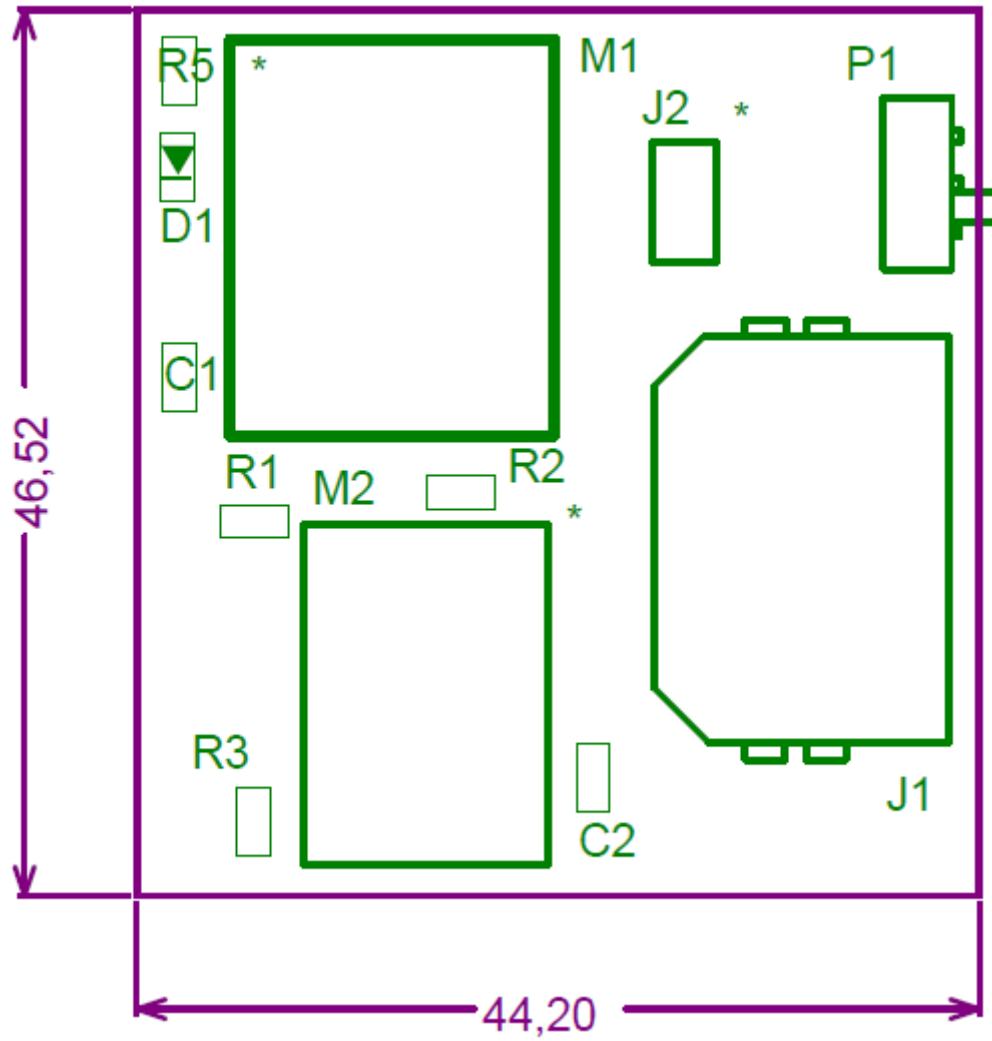
El paquete de datos de una estructura BLE es sencillo. Sea cual sea el paquete de datos, se transmitirá la longitud del paquete. Ésta longitud está limitada a 47 bytes. Una desventaja fundamental de Bluetooth es la cantidad de los diferentes paquetes de datos posibles que pueden transmitirse. Los paquetes de datos Bluetooth pueden alcanzar una longitud de hasta 359 bytes. Ésto puede llevar en muchos casos a retrasos durante la transmisión. Algunos retrasos pueden ocurrir debido al mayor potencial de interferencia de los paquetes más grandes.

## Anexo C - Planos de la PCB

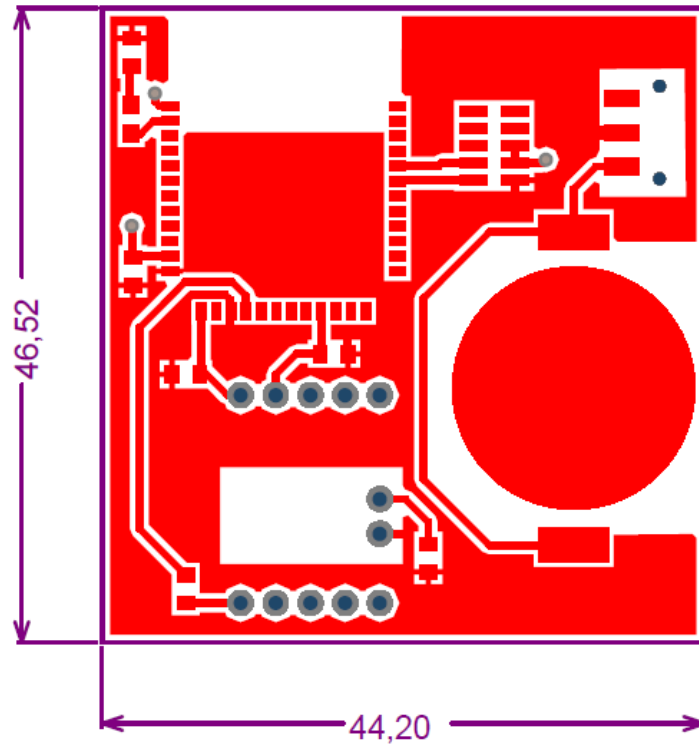
### C.1. Esquemático



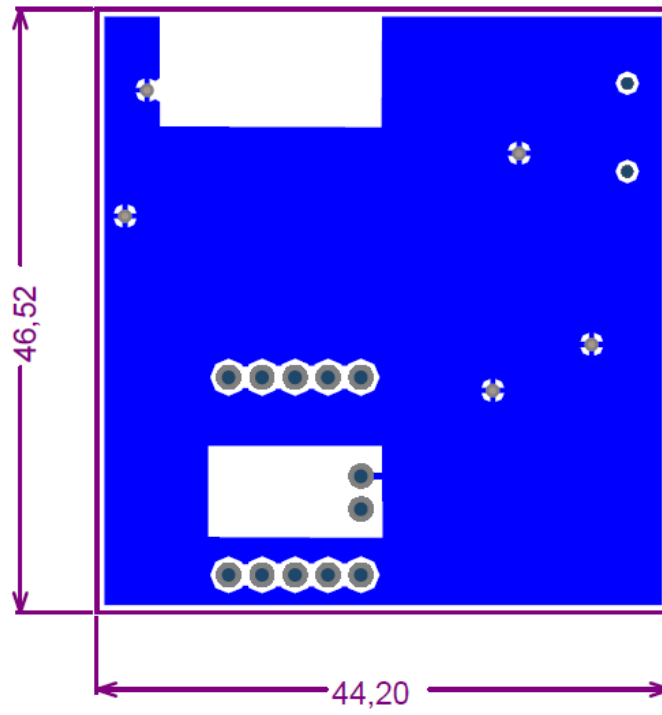
## C.2.Serigrafía TOP Layer



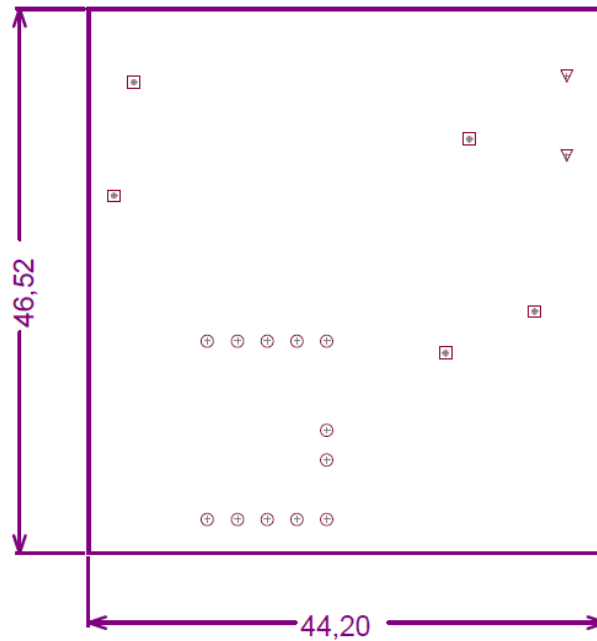
### C.3.TOP Layer



### C.4.Bottom Layer



### C.5.Plano de taladros



Symbol	Hit Count	Tool Size	Plated	Hole Type
□	5	0.5mm (19.685mil)	PTH	Round
▽	2	0.9mm (35.433mil)	PTH	Round
○	12	1mm (39.37mil)	PTH	Round
	19 Total			



## Anexo D - Presupuesto

Descripción	PART-NUMBER	Precio unidad	Cantidad	Total
Conector de batería	BAT-HLD-001	0.25 €	1	0.25 €
Interruptor	JS102011SAQN	0.28 €	1	0.28 €
Conector 10p.	FTSH-105-01-L-DV-TR	0.95 €	1	0.95 €
Módulo sensor	BNO-055 9-axis	33.48 €	1	33.48 €
Módulo de comunicaciones	nRF51822	8.5 €	1	8.5 €
Condensador 100nF 0805	-	0.02 €	2	0.04 €
Resistencia 1k 0805	-	0.02 €	2	0.04 €
Resistencia 0ohm 0805	-	0.02 €	1	0.02 €
Resistencia 220ohm 0805	-	0.02 €	1	0.02 €
LED 0805	-	0.10 €	1	0.10 €
PCB	-	4 €	1	4 €
Cable de programación	FFSD-05-D-06.00-01-N	8.05 €	1	8.05 €
			<b>TOTAL</b>	<b>55.73 €</b>

Tab. 22 - Presupuesto