**DISPOSITIVO WEARABLE DE MEDIDA DE RENDIMIENTO EN DEPORTES DE RAQUETA CON COMUNICACIÓN CON DISPOSITIVO MÓVIL**

**Diego Pérez Lavarías**

**Tutor: Marina Alonso Díaz**

**Cotutor: Salvador Coll Arnau**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2019-20

Valencia, 19 de mayo de 2020

Resumen

Breve resumen entre 150 y 200 palabras.

Resum

La memoria del TFG comença amb un breu resum d’entre 150 i 200 paraules, escrit en castellà, valencià i anglès. Aquestes pàgines van sense numerar.

Abstract

The memory of the TFG begins with a short abstract from 150 to 200 words, writen in Spanish, Valencian and English. These pages are not numbered.

Índice

[Capítulo 1. Introducción 3](#_Toc40795227)

[1.1 Motivación 3](#_Toc40795228)

[1.1.1 Deportes de raqueta 3](#_Toc40795229)

[1.1.2 Tecnología wearable 4](#_Toc40795230)

[1.2 Objetivos 5](#_Toc40795232)

[1.3 Metodología 6](#_Toc40795233)

[Capítulo 2. Identificación y análisis de posibles soluciones 7](#_Toc40795234)

[2.1 Posibles soluciones hardware 7](#_Toc40795236)

[2.1.1 MIKROE-2026 (Hexiwear) 7](#_Toc40795237)

[2.1.2 SensorTag CC1350STK EU 8](#_Toc40795238)

[2.1.3 SensorTag CC3200STK - WIFIMK 9](#_Toc40795239)

[2.1.4 STEVAL-WESU1 9](#_Toc40795240)

[2.1.5 Tabla comparativa 11](#_Toc40795241)

[2.2 Posibles soluciones software 12](#_Toc40795242)

[2.2.1 Android 12](#_Toc40795243)

[2.2.2 iOS 13](#_Toc40795244)

[2.2.3 Otros sistemas operativos 14](#_Toc40795245)

[2.3 Descripción de la solución adoptada 15](#_Toc40795246)

[2.3.1 Hardware 16](#_Toc40795247)

[2.3.2 Software 20](#_Toc40795248)

[Capítulo 3. Fundamentos teóricos 21](#_Toc40795249)

[Capítulo 4. Bibliografía 23](#_Toc40795250)

¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.

# Introducción

## Motivación

He decidido realizar este proyecto porque reúne varios de mis intereses, el deporte tanto a nivel amateur como más avanzado, y las nuevas tecnologías que incluyen los dispositivos wearables. Además, trabajo con ello poniendo en práctica los conocimientos relacionados con aplicaciones Android y Java y el uso de bases de datos, adquiridos durante los estudios de Grado, profundizando incluso algo más en el análisis de datos.

### Deportes de raqueta

Es un hecho que en los últimos años los deportes de raqueta, en especial el tenis y el pádel se han establecido como una parte muy importante de entre los deportes que ocupan el tiempo de ocio de los habitantes de España. Como podemos observar en la Figura 1.1, el número total de federados entre ambos deportes ronda los 150.000 cada año, a los que hay que sumar todas las personas que lo practican de forma amateur, sin licencia. La mayoría de estos deportistas no tienen a su alcance herramientas con las cuales controlar su técnica ni entrenadores que les ayuden, lo que impacta de forma directa en su rendimiento y puede llegar a provocar muchas lesiones. Este ha sido otro factor importante en mi elección, ya que veo mucho potencial a la existencia de una herramienta de este tipo que sea accesible para ese tipo de gente.

**Figura 1.1. Evolución de licencias de tenis y pádel desde 2012.** [(1)](#_Bibliografía)

### Tecnología wearable

### La tecnología wearable (“vestible”) trata de dispositivos electrónicos inteligentes incorporados a la vestimenta, como pueden ser accesorios, y que interactúan con el usuario y otros dispositivos.

Aunque su uso principal es el de la monitorización de actividades, esta tecnología tiene una variedad de aplicaciones que viene creciendo los últimos años, a la par que el campo de conocimiento que se tiene sobre ellos.

Su popularidad ha aumentado en los últimos tiempos y para mucha gente se han convertido en un dispositivo tan necesario como podría ser un teléfono móvil (algunos relojes realizan funciones incluso de llamadas y mensajería) y que resultan de gran ayuda en especial en el terreno deportivo, facilitando el acceso a sistemas de monitorización de la actividad deportiva y de magnitudes físicas como la frecuencia cardíaca, claves en análisis de rendimiento y estado físico.

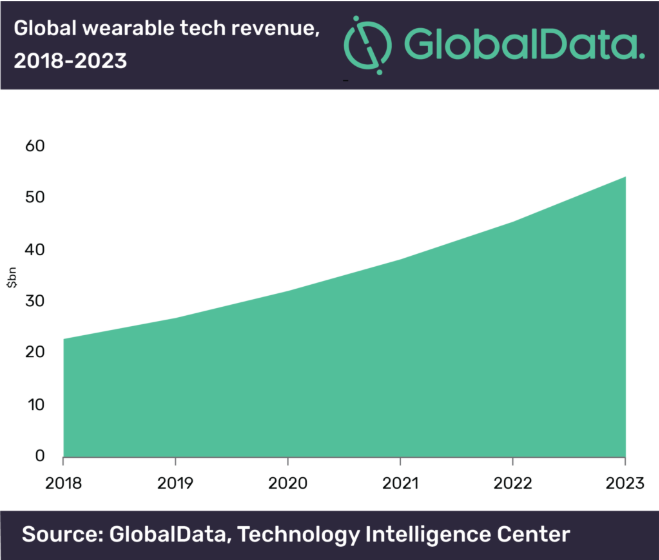
Una captura de pantalla de un celular con letras

Descripción generada automáticamente

**Figura 1.2. Porcentaje de penetración de wearables.** [(2)](#_Bibliografía)

Como podemos observar en la figura 1.2, el porcentaje de penetración de este tipo de dispositivos (porcentaje de gente que ha accedido a ellos, que posee uno al menos) rondaba ya el 30% en varios países en 2019, y con tendencia al alza. Esto hace que sea una tecnología muy interesante pero que está aún por descubrir en su mayor parte. Se puede decir que su papel está limitado, aunque tenga esta presencia emergente no se ha desarrollado del todo.

Según estos datos de la firma *GlobalData*, esta tecnología aporta hoy en día funcionalidades autónomas poco desarrolladas, pero en los próximos años se estima un crecimiento importante.



**Figura 1.3. Previsión de ingresos por venta de wearables (2018-2023).** [(3)](#_Bibliografía)

Como se aprecia en la figura 1.3, se cerró 2019 con unos ingresos de alrededor de 22.000 millones de dólares por venta de dispositivos wearables. Si bien este estudio es previo a la pandemia de 2020, se cree que se puede mantener el crecimiento de ingresos, que se estimaba podría superar los 50.000 millones de dólares en el año 2023.

En este crecimiento tendrán un papel protagonista los *smartwatches*, que aportarán gran parte de estos ingresos, según indica también este informe.

Esta es la otra razón por la que he elegido este tema para realizar mi trabajo de fin de grado, me gusta estar informado acerca de las nuevas tecnologías y desde hace un tiempo considero los *wearables* como una tecnología que será muy importante en el futuro.

## Objetivos

El principal objetivo de este trabajo de fin de grado es desarrollar una aplicación en Android que nos permita monitorizar la técnica en el deporte de raqueta realizado para conseguir una mejora de rendimiento y prevención de lesiones en la práctica.

Para ello, se empezará por escoger el dispositivo wearable que se adapte mejor a las necesidades del trabajo o que podamos modificar para conseguir dicha adaptación. Este dispositivo tendrá que permitirnos tomar muestras que puedan ser analizadas para medir los golpes que efectúe el usuario. También habrá que familiarizarse con las funcionalidades de los sensores integrados.

Otra parte de ese objetivo será conocer y entender el protocolo por el cual se conectan el dispositivo wearable y el smartphone con el que manejaremos la app.

El siguiente objetivo será la implementación de los algoritmos adecuados para la medida precisa de las magnitudes físicas que nos interesan, que serán las que nos aporten los sensores de medida inercial del dispositivo: acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. El siguiente paso tras medir estas magnitudes físicas será trabajar con ellas para obtener mejores medidas que se puedan relacionar con la calidad de la actividad física realizada, en este caso los golpes que registre el usuario.

Con esto, se llevará a cabo el desarrollo de la aplicación cumpliendo todos estos pasos y añadiendo funcionalidades básicas que permitan su uso sin dificultad, como puede ser un sistema de usuarios y ayudas gráficas. Todas las funcionalidades que se implementen se explicarán con detalle dentro del apartado tal.

## Metodología

# Identificación y análisis de posibles soluciones

## En este capítulo se analizará las distintas soluciones con las que se podría llevar a cabo el proyecto, tanto de hardware como de software. Se explicarán diferentes herramientas existentes que se podrían utilizar, comparando sus ventajas y sus desventajas.

## Posibles soluciones hardware

A continuación se presentarán los *wearables* disponibles para participar en este proyecto. Se estudiarán sus componentes, con especial énfasis en su conectividad y en sus módulos de sensores de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro.

Se realiza una comparación entre estos diferentes dispositivos.

### MIKROE-2026 (Hexiwear)

El dispositivo de MikroElectronika MIKROE-2026 o Hexiwear [(4)](#_Bibliografía) es un smartwatch con formato de kit de desarrollo. Ofrece la posibilidad de crear un dispositivo portátil propio compatible con aplicaciones de móvil. Consta de pantalla OLED de 1.1 pulgadas con 6 botones capacitivos. Conexión Micro USB-B para cargar la batería y para desarrollo del software del dispositivo. Su peso es de 40 gramos.

Contiene sensores de frecuencia cardíaca, temperatura, humedad, presión, luz ambiental y medida de orientación.



**Figura 2.1. Dispositivo Hexiwear MIKROE-2026**

El procesador que integra este dispositivo es un NXP-Kinetis K64 MCU (5), basado en un ARM Cortex-M4:

- Velocidad de reloj de hasta 120 MHz.

- Memoria SRAM de 256 KB.

- Memoria flash de 1 MB.

Para la comunicación, incorpora un procesador NXP-Kinetis KW4x (5), basado en un ARM Cortex-M0+ y que proporciona conectividad BLE (Bluetooth Low Energy).

En cuanto a los sensores que nos interesan para nuestro proyecto, tiene dos apartados: por una parte el FXOS8700CQ, que integra acelerómetro y magnetómetro, y por otra el FXAS21002, que proporciona medidas del giróscopo. Ambos proporcionados por NXP (5).

Como dato interesante, el desarrollo de este dispositivo se llevó a cabo gracias a un proceso de crowdfunding y es un proyecto de código libre.

### SensorTag CC1350STK EU

Se definen como un entorno de desarrollo fácil de usar con un set de herramientas amplio y común para todos los dispositivos, además de una duración de la batería muy buena.

La idea es la de una familia de dispositivos de precio reducido, inalámbricos y con sensores de baja potencia, con los cuales llevar a cabo proyectos de medición de datos, automatización de sistemas del hogar, sistemas de seguridad y alarmas, sistemas de salud inalámbricos, etc.

Estas familias de dispositivos permiten la modificación del software mediante un pack de desarrollo que nos aporta el fabricante.

Sus dimensiones son de 5 x 6.7 x 1.4 cm.



**Figura 2.2. Dispositivo SensorTag CC1350.** (6)

El microprocesador que incorporan está basado en un ARM Cortex-M3 de 32 bits:

- Velocidad de reloj de hasta 48 MHz.

- Memoria flash de 128 KB.

- Memoria SRAM de 20 KB.

- 8 KB de caché/RAM.

También contienen hasta diez sensores, con los cuales se puede medir magnitudes como temperatura, humedad y presión, junto con el módulo MPU-9250 (7) que se define como controlador de sensores de ultra baja potencia, que permite el uso autónomo, con 20 KB de SRAM y que soporta actualización OTA (Over-the-Air).

La conectividad de este dispositivo se basa en dos sistemas: por una parte permite Bluetooth Low Energy, y por otra añade funcionalidad Sub-1GHz, que consiste en usar una frecuencia inferior, por lo tanto aporta mayor rango y menor potencia.

### SensorTag CC3200STK - WIFIMK

Es un dispositivo parecido a los de la familia anterior. Contiene los mismos sensores y la MPU-9250 de Invensense. La diferencia se encuentra en el procesador que incorpora, que en este caso está basado en un ARM Cortex-M4 de 32 bits:

- Velocidad de reloj de hasta 80 MHz.

- RAM de 256 KB.

También se encuentra una gran diferencia en la comunicación, realizándose en este caso por Wi-Fi (por estándar 802.11 b/g/n), lo que permite el uso de TCP/IP, TLS/SSL, HTTP y otros protocolos de Internet. Esto es útil porque permite la carga directamente a Internet en el caso de que se utilice un servidor web o en la nube para almacenar los datos.

También es diferente en las dimensiones, ya que es algo más pequeño que el dispositivo anterior: 3.2 x 4.2 x 0.8 cm.



**Figura 2.3. Dispositivo SensorTag CC3200** (6)

### STEVAL-WESU1

El STEVAL-WESU1 de ST MicroElectronics (8) es un dispositivo pensado para wearable, aplicaciones de medición de datos con un set completo de ejemplos firmware. Es sencillo de programar, mediante el ST-LINK. En este caso contiene cuatro sensores: el IMU habitual más el sensor de presión.

Tiene disponibles apps en iOS y Android que miden y muestran por pantalla el comportamiento de los sensores.

Sus dimensiones son de 3x3.5 cm, y viene en formato de cápsula que se introduce en una correa tipo reloj (incluido en el pack de venta). Peso de 15 gramos.



**Figura 2.4. Dispositivo STEVAL-WESU1.**

Incorpora un microprocesador STM32L151VEY6 basado en ARM Cortex-M3 de 32 bits:

- Velocidad de reloj de hasta 32 MHz.

- Memoria RAM de 48 KB.

- Memoria Flash de 512 KB.

La comunicación se realiza mediante BLE, gracias al módulo BLUENRG-MS, de acuerdo con Bluetooth 4.1.

Todos los sistemas son de fabricación propia de ST Microelectronics.

La unidad de sensores de orientación no consiste solamente en un módulo como en alguno de los casos anteriores, sino que trata de varios módulos:

* LSM6DS3, que incluye el acelerómetro y el giroscopio, ambos de 3 ejes.
* LIS3MDL, el magnetómetro de 3 ejes también.
* LPS25HB, sensor de presión.

### Tabla comparativa

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Dispositivo** | **Procesador** | **Vel. Reloj (MHz)** | **Conectividad** | **Dimensiones (cm x cm x cm)** | **Precio (€)** |
| Hexiwear | NXP-Kinetis K64 MCU | 120 | BLE | Sin datos | 44,1 |
| CC1350STK | ARM Cortex-M3 | 48 | BLE, Sub-1GHz | 5 x 6,7 x 1,4 | 69 |
| CC3200STK | ARM Cortex-M4 | 80 | Wi-Fi | 3,2 x 4,2 x 0,8 | 46,79 |
| STEVAL-WESU1 | ARM Cortex-M3 | 32 | BLE | 3 x 3,5 x 1 | 46,75 |

**Tabla 2.1. Comparación de datos de dispositivos**

En la tabla comparativa podemos observar que el Hexiwear MIKROE-2026 se sale de la norma, teniendo un procesador diferente fabricado por NXP mientras el resto tiene procesadores de fabricación propia pero basados todos en ARM Cortex. Esto hace que su procesador tenga mayores prestaciones de velocidad.

En cuanto a la conectividad, lo establecido es el Bluetooth de baja energía o BLE, que se ha mostrado como un sistema muy útil para este segmento, como se puede observar en el mercado, donde las empresas más grandes como puede ser Xiaomi lo utilizan en sus dispositivos wearable, las pulseras y relojes de actividad de la gama Amazfit. Aun así, destaca el uso de Wi-Fi en el caso del CC-3200STK, lo cual hace que sea una gran opción para aplicaciones que utilicen un servicio web, ya que se puede cargar los datos directamente a un servidor de este tipo.

Fijándonos en las dimensiones, realmente todas las alternativas son de tamaño contenido, con utilidad de reloj de pulsera. No se han encontrado los datos exactos del Hexiwear, pero el peso es de 40 gramos y se vende con pulsera para usarlo de esa manera, así que se asume que es así también.

Por último, en cuanto a precio, vemos que todas las alternativas se sitúan en el mismo rango de entre 40 y 50 euros, excepto el CC-1350STK, que sube de precio debido a su baja disponibilidad en detrimento de dispositivos más modernos. Cabe recordar que este dispositivo salió en 2016.

También se puede realizar una comparación de los sensores que incorporan los dispositivos.

***MIKROE-2026***: Incluye una unidad de sensores con dos módulos diferentes, por un lado el acelerómetro y magnetómetro y por otro lado el giróscopo. [(4)](#_Bibliografía)

* Acelerómetro: FXOS8700CQ
  + Rango de ±2g, ±4g, ±8g.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 800 Hz.
* Giróscopo: FXAS21002C
  + Rango de ±250º/s, ±500º/s, ±1000º/s, ±2000º/s.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 800 Hz.
* Magnetómetro: FXOS8700CQ
  + Rango de ±1200 µT.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 800 Hz.

***CC1350STK y CC3200STK***: Incluyen el mismo sistema, la MPU-9250, de InvenSense. [(7)](#_Bibliografía)

* Acelerómetro:
  + Rango de ±2g, ±4g, ±8g, ±16g.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 4 KHz.
* Giróscopo:
  + Rango de ±250º/s, ±500º/s, ±1000º/s, ±2000º/s.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 1 KHz.
* Magnetómetro:
  + Rango de ±4800 µT.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 8 Hz.

***STEVAL-WESU1***: Dividen sus sensores de orientación en dos módulos, en este caso, el acelerómetro y el giróscopo en uno y el magnetómetro en otro. (8)

* Acelerómetro: LSM6DS3
  + Rango de ±2g, ±4g, ±8g, ±16g.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 1.6 KHz.
* Giróscopo: LSM6DS3
  + Rango de ±125º/s, ±245º/s, ±500º/s, ±1000º/s, ±2000º/s.
  + Frecuencia de muestreo de hasta 1.6 KHz.
* Magnetómetro: LIS3MDL
  + Rango de ±400 µT, ±800 µT, 1200 µT, 1600 µT. (9)
  + Frecuencia de muestreo de hasta 1,6 KHz.

Con estos datos, podemos observar que en los tres casos las características son bastante similares, teniendo menos rango y algo menos de frecuencia de muestreo en general el dispositivo MIKROE-2026, y estando las otras dos igualadas. Cabe destacar el acelerómetro de la MPU-9250, ya que en rango y en frecuencia de muestreo es la más alta, y también el magnetómetro del STEVAL-WESU1.

## Posibles soluciones software

En este apartado se describirán los diferentes sistemas operativos móviles que se consideran alternativas para realizar el proyecto.

### Android

Android es el sistema operativo móvil más utilizado en la actualidad (10). Según datos de Google (que lo desarrolla), se utiliza en 2500 millones de dispositivos activos.

Está basado en el Kernel de Linux y su principal característica es la de ser una plataforma de código abierto y de desarrollo libre por parte de cualquier usuario que quiera ser desarrollador.

Su primera versión fue presentada en 2007 y Android 1 (Apple Pie) salió en septiembre de 2008. Se ha ido desarrollando desde entonces, siendo su última versión Android 10, lanzada en septiembre de 2019.



**Figura 2.5. Logotipo de Android.**

Los componentes principales del sistema son:

* Aplicaciones: escritas en Java o Kotlin principalmente. Implementan los servicios desarrollados para el usuario.
* Marco de trabajo para apps: la arquitectura está diseñada para que la reutilización de los componentes sea sencilla, de forma que una aplicación publique sus capacidades y cualquier otra pueda hacer uso de ellos, siempre de manera segura (según reglas del ‘framework’.
* Bibliotecas: Android incluye un conjunto de características llamado bibliotecas, donde los desarrolladores podrán acceder a esas características para añadirlas a sus aplicaciones. Hay multitud como SQLite, 3D, etc.
* Núcleo Linux: gestiona lo servicios básicos como son la seguridad o la gestión de memoria. Completamente de código abierto.

Con esto, las características que definen a Android son:

1. Código libre para el desarrollo de cualquier usuario con programación en Java/Kotlin.
2. Catálogo de aplicaciones muy amplio a través de su tienda Google Play Store (gracias a la libertad de desarrollo que aporta el código abierto).
3. Diseño adaptable a pantallas de resolución, tamaño y formas muy variables.
4. Soporte multimedia y streaming extensos.
5. Navegación web mediante el uso de HTML.
6. Multitarea real de aplicaciones.
7. Conexiones inalámbricas como Wi-Fi, redes celulares y Bluetooth.
8. Asistente virtual (Google Assistant).
9. Amplia base de usuarios potenciales, válido para todo tipo de gente.

### iOS

iOS es el sistema operativo móvil desarrollado por la empesa estadounidense Apple. Fue originalmente pensado para el iPhone, pero más adelante también usado en tabletas y reproductores de música (iPod). Deriva del sistema operativo de Apple para sus dispositivos sobremesa MacOS, y por tanto es un sistema operativo tipo Unix, uno de los primeros S.O. de código libre creado hace décadas en EEUU.



**Figura 2.6. Logotipo de iOS.**

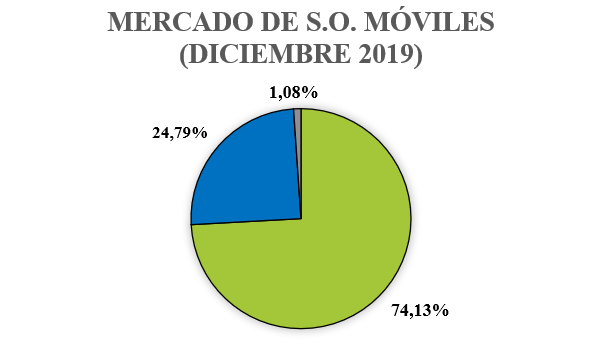
Su lanzamiento inicial data de 2007 (iOS 1) y la última versión salió en septiembre de 2019, siendo actualizado constantemente, por última vez en abril de 2020 (iOS 13.4.1). (11)

Es el segundo sistema operativo en número de usuarios. Apple no da datos en su web como hace Google, pero se estima que, a nivel mundial, el número de usuarios de iOS es en torno a un tercio del de Android. Esto situaría este número en cientos de millones de usuarios.

Las características de iOS son similares a las de Android, con la mayor diferencia de la adaptabilidad del sistema y la libertad del código. En este caso, el sistema no se adapta a diferentes dispositivos porque no es libre, solamente lo utiliza Apple para sus terminales. En el resto, funciona de manera similar, con aplicaciones implementadas por desarrolladores mediante Swift, el lenguaje creado por la misma empresa para este medio, y puestas en el mercado mediante la tienda App Store.

También tiene soporte multimedia y streaming, navegación web mediante HTML y un asistente virtual, Siri.

### Otros sistemas operativos



Otros

iOS

Android

**Figura 2.7. Mercado de S.O. móviles.** (12)

En este gráfico se presentan los datos de cuota de mercado de los sistemas operativos de móvil, a fecha de diciembre de 2019. Como se ha mencionado anteriormente, Android es el sistema más usado de forma amplia, con un 74% del mercado, seguido de iOS con casi un 25%.

En este apartado se presentarán algunos de ellos.

***Kai OS***

Es un sistema operativo basado en Linux cuyo objetivo es el de acercar lo mejor de los teléfonos móviles inteligentes a dispositivos asequibles. Esto es, se trata de un sistema diseñado para terminales tecnológicamente accesibles, como los que utiliza la gente mayor. Es una plataforma de código libre surgida de la comunidad de Firefox.

Sus principales caracteristicas son similares a las de los sistemas dominantes del mercado, pero orientados a teléfonos no táctiles, con una interfaz totalmente optimizada y necesidades bajas de energía y memoria. Es capaz de funcionar en dispositivos con solamente 256 MB de memoria y con duración de la batería de semanas.

Acerca las aplicaciones y el uso de redes celulares para la conexión a Internet a dispositivos como los que se utilizaban en la pasada década.

Se estima que su cuota de mercado es de un 0,35%. (12)



**Figura 2.8. Logotipo de Kai OS.** (13)

***Otros***

El resto de sistemas operativos que se utilizan en la actualidad son sistemas instalados en terminales antiguos que se siguen usando, por comodidad o por no querer cambiar. Por ejemplo, el sistema Windows Phone que fue descontinuado en 2015 tras fracasar en ventas, teniendo máximos de un 3-4% a principios de la década de los 2010.

Otros sistemas aún existentes pero minoritarios son Blackberry OS, Symbian y Nokia OS.

En el futuro se piensa que es posible la irrupción de Huawei con su propio sistema debido a los problemas que hubo en 2019 entre esta empresa y los Estados Unidos, que provocaron que no pudieran acceder al sistema Android como venían haciendo los últimos años (14). De todas maneras, en la fecha en que se realizó esta memoria, el problema seguía en pie y Huawei no había desarrollado todavía su sistema, que teniendo en cuenta que Huawei tiene una cuota de mercado de alrededor del 15% de dispositivos del mundo (15) sería uno de los grandes sistemas del panorama.

## Descripción de la solución adoptada

En este apartado se presentará la solución adoptada para la realización del proyecto y se expondrán las razones que han llevado a esta elección, tanto del hardware como del software.

### Hardware

Se ha decidido elegir el dispositivo STEVAL-WESU1 de ST Microelectronics.

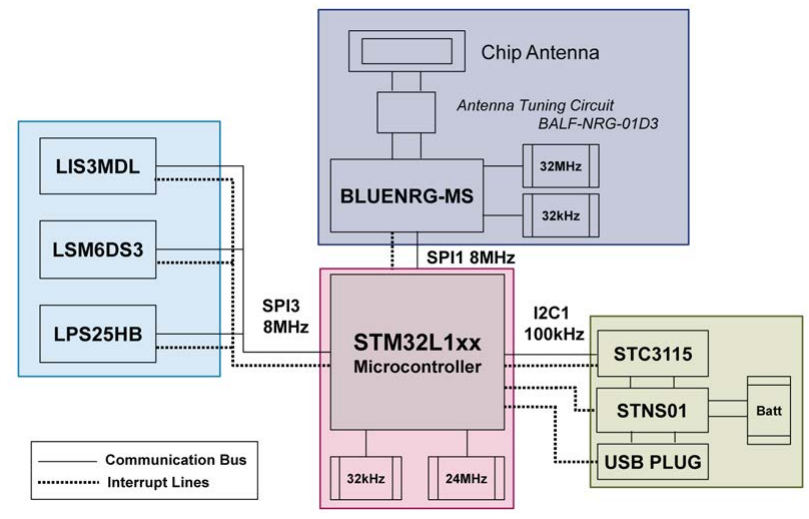
En primer lugar, se ha elegido debido al protocolo de comunicación que incorpora. Se considera que, en vista de que la mayoría de dispositivos wearables del mercado (como los smartwatch de Xiaomi) utilizan BLE para la comunicación con el smartphone que lo acompaña, es coherente utilizar un dispositivo con este tipo de conexión para nuestro proyecto. Con este protocolo, podremos realizar una conexión de bajo rango de distancia (móvil – wearable) y con un consumo de energía mínimo.

Otro motivo por el cual se ha elegido este dispositivo es su tamaño. Se trata de la alternativa con menores dimensiones de entre las que se han considerado para realizar el proyecto. La idea es la de colocar el dispositivo en la muñeca con la que se utiliza la raqueta para poder medir las magnitudes físicas en el golpeo, y un tamaño pequeño y un peso mínimo es algo básico para poder realizar el deporte sin ninguna molestia o intromisión por parte del dispositivo de medición, ya que alterar la técnica de golpeo podría inutilizar la herramienta de análisis y hacer que no sirva de ayuda.

El tercer motivo que se ha tenido en cuenta ha sido los sensores que incorpora. Junto con la IMU de los dispositivos de Texas Instruments, tienen mayor rango que los sensores del Hexiwear, pero hay una gran diferencia en la frecuencia de muestreo de los de TI: su magnetómetro solamente llega hasta los 8 Hz de manera nativa. Los dispositivos de TI nos añaden ese problema, que habría que solucionar mediante la modificación del firmware, mientras que con el STEVAL-WESU1 nos ahorramos este paso y podemos centrarnos desde el inicio en la implementación de nuestro proyecto.

En último lugar, elegimos este dispositivo porque se encuentra disponible en la UPV para su uso inmediato, sin tener que realizar la compra. El precio no se ha considerado demasiado, ya que todos los dispositivos que se han tomado como alternativas presentan un precio semejante, pero la disponibilidad es algo muy apreciado, puesto que poder trabajar desde el principio con el dispositivo facilita esa familiaridad con él de cara a implementar la aplicación.

***Detalles técnicos***



IMU

**Figura 2.9. Diagrama de bloques funcional del dispositivo**.

Como observamos en la figura 2.9, este dispositivo tiene 4 bloques funcionales: el Microcontrolador, el sistema de gestión de energía, el módulo de conexión BLE y los sensores. Todos los diagramas e imágenes de este apartado han sido obtenidos del manual (8).

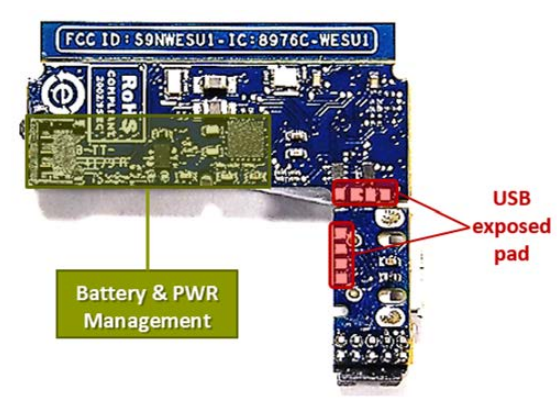
· **Microcontrolador**



**Figura 2.10. Microcontrolador STM32L151VEY6.**

Microcontrolador de ultra-baja potencia basado en el ARM Cortex-M3, un estándar en la industria con núcleo de 32 bits, diseñado para aplicaciones de baja potencia. El bajo consumo es clave para aplicaciones de wearables que necesitan iniciarse periódicamente para ejecutar tareas de software.

**· Gestión de energía**



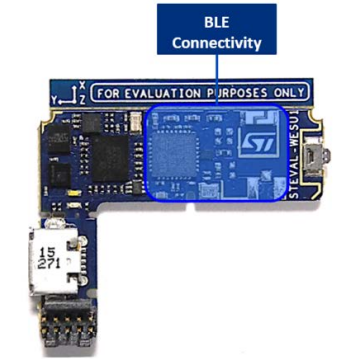
**Figura 2.11. Subsistema de gestión de energía y batería.**

Se compone de varios módulos: la batería de ion-litio de 100 mAh, el sistema STNS01 que la carga y el módulo STC3115 que implementa la monitorización del nivel de batería, que se encuentran en el reverso de la placa. En el lado principal encontramos también el conector Micro-USB con el que se carga la batería.

El sistema cargador STNS01 es un cargador lineal para baterías de ion-litio de una celda. En este dispositivo, está configurado como cargador de batería y como switch entre la fuente de energía de la batería y del conector USB. Incluye un LED que nos indica si carga correctamente (color rojo fijo) o si hay problemas (parpadeo).

El módulo STC3115 incluye las funciones hardware de monitorización de SOC (state-of-charge, nivel de batería). Se mide por corriente y voltaje.

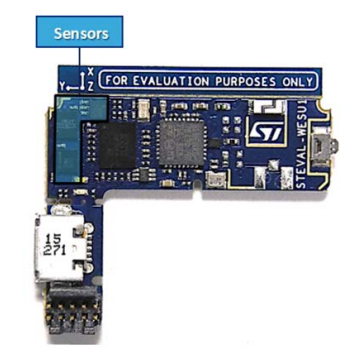
**· Conexión BLE**



**Figura 2.12. Módulo BLE.**

Se trata de un microprocesador BLE de baja energía, el BLUENRG-MS, implementado de acuerdo con la especificación de Bluetooth v4.1. Puede actuar tanto de maestro como de esclavo en la conexión BLE. Contiene una memoria Flash no volátil.

**· Sensores**



**Figura 2.13. Módulo de sensores.**

Integra sensores cuyo funcionamiento es ideal para algoritmos de medición de movimientos en wearables, con capacidades de baja energía y alto rendimiento en cuanto a precisión. Contiene 3 sistemas, de los cuales nos centraremos en dos, los que incluyen los sistemas que nos interesan, dejando aparte el LPS25HB que mide presión.

El LSM6DS3 incluye los sensores de acelerómetro y giróscopo. Son ambos digitales y de 3 ejes o 3D, con un consumo de corriente de 1,25 mA. Los rangos, ya expuestos anteriormente, son:

* Acelerómetro: ±2g, ±4g, ±8g, ±16g.
* Giróscopo: ±125º/s, ±245º/s, ±500º/s, ±1000º/s, ±2000º/s.

La frecuencia de muestreo de ambos es de hasta 1,6 kHz.

El otro sistema sensor es el LIS3MDL, que incluye el magnetómetro, también 3D y digital. Puede ser configurado para generar señales al detectar campo magnético. El rango del magnetómetro es de ±4, ±8, ±12, ±16 gauss, que es igual a ±400 µT, ±800 µT, 1200 µT, 1600 µT (9)

Todos estos módulos van encapsulados en una pequeña caja de plástico que hace la función de corona del reloj. Sumado a esto, en la caja viene una pulsera de goma donde introducir la cápsula y colocarlo en la parte del cuerpo donde se quiera realizar la medición, la muñeca o el tobillo.



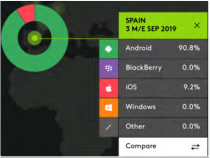
**Figura 2.14. Cápsula y correa del reloj.**

### Software

Se ha elegido el sistema operativo Android para el desarrollo de la apliación que implemente nuestro proyecto.

Se ha elegido por varios motivos. El principal ha sido la característica de este S.O. de ser código libre. Esto hace que la comunidad de desarrolladores sea muy amplia, con mucha documentación accesible en Internet y con un entorno de desarrollo oficial que la misma empresa otorga para cualquiera que quiera introducirse en el desarrollo de apps y con posibilidades para cualquier nivel de usuario, desde el principiante hasta el experto. Personalmente, este es un entorno de desarrollo con el que he trabajado durante el grado, lo que se ha tenido en cuenta ya que estaba familiarizado con él. Eso, sumado al hecho de que se utilice Java (también conocido y usado en el grado) ha provocado esta decisión en mayor medida.

Otro motivo ha sido la cuota de mercado de Android. Como se ha visto en la Figura 2.8, este sistema ocupa tres cuartas partes del mercado de los dispositivos móviles del mundo. Si nos centramos en el panorama nacional, esta predilección de los usuarios por este sistema es aún mayor. Según un informe del Centro Criptológico Nacional (Figura 2.10), en España este sistema alcanza más del 90% del mercado. Esta gran popularidad ha sido importante en la elección de este sistema para nuestro proyecto, ya que tanto a la hora de usarlo como de probarlo, la disponibilidad de un terminal con este S.O. instalado es mucho mayor que uno con iOS.



**Figura 2.10. Cuota de mercado de S.O. móviles, España.** (16)

Por tanto, se utilizará el entorno de desarrollo Android Studio. La aplicación y sus características se implementarán de forma íntegra en este IDE, que permite tanto la programación (en Java o Kotlin, se usará Java) como el uso de bases de datos SQLite.

Para el uso de Android Studio se utilizará un PC con Windows 10, sistema compatible con este entorno de desarrollo, y un teléfono con Android 9 para realizar las pruebas y testear el uso de la app.

# Fundamentos teóricos

En este capítulo se tratarán los fundamentos teóricos sobre los cuales se realizará el proyecto. En primer lugar se explica la medida de la orientación de un cuerpo, después se desarrolla la representación de dicha orientación, y finalmente se verá el protocolo de comunicación mediante el cual se envían dichos datos al dispositivo móvil en el cual se implementa la aplicación.

## Medida de la orientación

A la hora de determinar la orientación de un cuerpo es necesario el uso de unos sensores para obtener ciertos datos que, al combinarlos, orienten este cuerpo en un espacio.

Para nuestro proyecto, destacaremos dos sistemas:

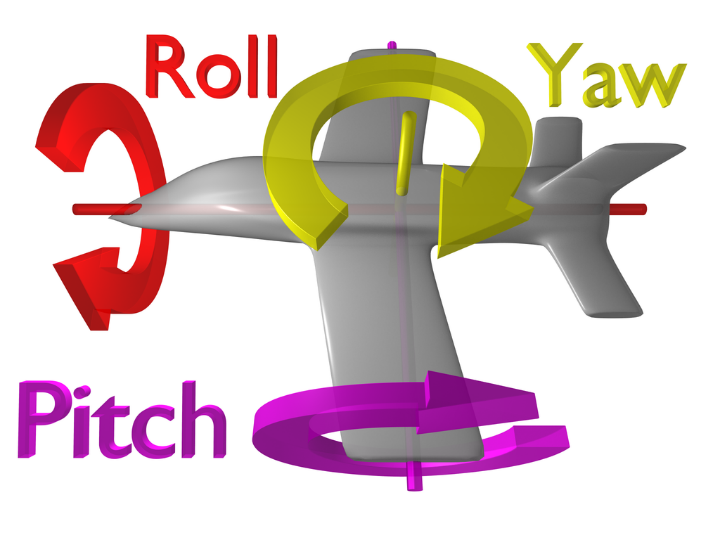
* Unidad de Medición Inercial (IMU)
* Sistemas de Referencia de Actitud y Rumbo (AHRS)

### IMU

Una unidad de medición inercial es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando para ello una combinación de acelerómetros y giroscopios.

Normalmente son utilizados en dispositivos como móviles, para los sistemas de navegación donde se requiera este tipo de mediciones y no haya posibilidad de uso de referenncias externas. También se utilizan en sistemas de aviones y naves espaciales para sus maniobras.

Su uso se basa en la detección de la aceleración que mide el sensor, y a su vez los cambios rotacionales detectados por el giróscopo, como el cabeceo (pitch), alabeo (roll) y guiñada (yaw).



**Figura 3.1. Cambios rotacionales en un avión.**

El problema de este tipo de sistemas es que suelen estar afectados por un error acumulativo. Esto es, como el sistema va agregando los cambios detectados a las posiciones que se han detectado previamente, cualquier error en la medición se va acumulando. Por tanto, con el paso del tiempo y acumulando estos pequeños errores, se encuentra una diferencia cada vez mayor entre la posición real y la que el sistema determina.

### AHRS

Los Sistemas de Referencia de Actitud y Rumbo son otro tipo de sistemas capaces de proporcionar los mismos datos de orientación de la figura 3.1, pero con un cambio respecto de las IMU. En este caso, al uso de acelerómetro y giróscopo se le suma la utilización del magnetómetro. Gracias a este sensor se puede evitar el error acumulativo de las IMU.

El posible problema que puede surgir de usar tantos sensores (3 sensores de 3 ejes cada uno, mínimo) es que se obtienen diversas fuentes y por tanto hay que elegir. Para esto es normal que se utilice un Filtro de Kalman.

### Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es un algoritmo (desarrollado por R. E. Kalman en 1960) cuya utilidad es la de identificar el estado oculto de un sistema a partir de datos previamente medidos. Con esto, se puede realizar la tarea de filtrar y la de predecir sistemas lineales.

# Bibliografía

[1] Datos obtenidos de las páginas web de la RFET (Real Federación Española de Tenis) y de la Federación de Pádel.

<http://www.rfet.es/es_licencias_introduccion.html>

<https://www.padelfederacion.es/Datos_Federacion.asp?Id=0>

[2] Estudio Live Panel de Wavemaker.

[https://www.marketingnews.es/investigacion/noticia/1156101031605/wearables-crece- numero-de-espanoles-tienen-uno.1.html](https://www.marketingnews.es/investigacion/noticia/1156101031605/wearables-crece-%09numero-de-espanoles-tienen-uno.1.html)

[3] Estudio de mercado wearable, GlobalData, 12 de febrero de 2020.

[https://www.globaldata.com/wearable-tech-is-maturing-but-is-still-out-of-the- mainstream-says-globaldata/](https://www.globaldata.com/wearable-tech-is-maturing-but-is-still-out-of-the-%09mainstream-says-globaldata/)

[4] Hexiwear, MikroElektronica, Serbia. Todos los datos extraídos del apartado ‘Hardware’

<https://www.mikroe.com/hexiwear>

Acelerómetro y Magnetómetro: [https://www.nxp.com/docs/en/data- sheet/FXOS8700CQ.pdf](https://www.nxp.com/docs/en/data-%09sheet/FXOS8700CQ.pdf)

Giróscopo: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/FXOS8700CQ.pdf>

[5] NXP Semiconductors, Países Bajos.

Microprocesador:

[https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm- microcontrollers/general-purpose-mcus/k-series-cortex-m4/k6x-ethernet/kinetis-k64- 120-mhz-256-kb-sram-microcontrollers-mcus-based-on-arm-cortex-m4-core:K64\_120](https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-%09microcontrollers/general-purpose-mcus/k-series-cortex-m4/k6x-ethernet/kinetis-k64-%09120-mhz-256-kb-sram-microcontrollers-mcus-based-on-arm-cortex-m4-core:K64_120)

Procesador BLE:

[https://www.nxp.com/products/wireless/bluetooth-low-energy/kinetis-kw40z-2-4-ghz- dual-mode-bluetooth-low-energy-and-802-15-4-wireless-radio-microcontroller-mcu- based-on-arm-cortex-m0-plus-core:KW40Z](https://www.nxp.com/products/wireless/bluetooth-low-energy/kinetis-kw40z-2-4-ghz-%09dual-mode-bluetooth-low-energy-and-802-15-4-wireless-radio-microcontroller-mcu-%09based-on-arm-cortex-m0-plus-core:KW40Z)

Sensores:

[https://www.nxp.com/products/sensors/motion-sensors/6-axis/digital-motion-sensor-3d- accelerometer-2g-4g-8g-plus-3d-magnetometer:FXOS8700CQ](https://www.nxp.com/products/sensors/motion-sensors/6-axis/digital-motion-sensor-3d-%09accelerometer-2g-4g-8g-plus-3d-magnetometer:FXOS8700CQ)

[https://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/3-axis-digital- gyroscope:FXAS21002C](https://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/3-axis-digital-%09gyroscope:FXAS21002C)

[6] SensorTag CC13xx – CC3200, Texas Instruments, EEUU.

<http://www.ti.com/product/CC1350>

Datasheet: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1350.pdf>

<http://www.ti.com/product/CC3200>

Datasheet: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3200.pdf>

[7] MPU-9250. Invensense, EEUU.

<https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/9-axis/mpu-9250/>

Datasheet: [https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01- v1.1.pdf](https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-%09v1.1.pdf)

[8] STEVAL-WESU1. ST Microelectronics, Suiza.

<https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-wesu1.html>

Datasheet: <https://www.st.com/resource/en/data_brief/steval-wesu1.pdf>

Manual de usuario: [https://www.st.com/resource/en/user\_manual/dm00279614-how-to- use-the-stevalwesu1-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00279614-how-to-%09use-the-stevalwesu1-stmicroelectronics.pdf)

Acelerómetro y Giróscopo: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lsm6ds3.pdf>

Magnetómetro: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis3mdl.pdf>

[9] Los datos vienen en Gauss en el datasheet. Se ha utilizado la conversión 1 Gs = 10-4 T para presentar todos los datos en las mismas unidades.

[10] ¿Qué es Android? <https://www.android.com/intl/es_es/what-is-android/> Google Inc, EEUU.

[11] Datos y características de iOS. <https://www.apple.com/es/ios/ios-13/> Apple Inc, EEUU.

[12] Gráfico propio, datos de StatCounter. Diciembre de 2019.

<https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>

[13] Kai OS. <https://www.kaiostech.com> KaiOS Technologies Inc, EEUU.

[14] Problemas entre Huawei y EEUU. [https://rpp.pe/tecnologia/moviles/huawei-esto-es-lo- que-debes-saber-del-caso-huawei-con-google-android-y-estados-unidos-noticia- 1198645](https://rpp.pe/tecnologia/moviles/huawei-esto-es-lo-que-debes-saber-del-caso-huawei-con-google-android-y-estados-unidos-noticia-1198645)

[15] Cuota de mercado de *smartphones* por marca, 2019. <https://www.counterpointresearch.com/global-smartphone-share/>

[16] Informe Anual 2019. Dispositivos y comunicaciones móviles, CCN-CERT

[https://www.ccn-cert.cni.es/informes/informes-ccn-cert-publicos/4625-ccn-cert-ia-03- 20-informe-anual-2019-dispositivos-y-comunicaciones-moviles-1/file.html](https://www.ccn-cert.cni.es/informes/informes-ccn-cert-publicos/4625-ccn-cert-ia-03-20-informe-anual-2019-dispositivos-y-comunicaciones-moviles-1/file.html)

[17] Android Studio. <https://developer.android.com/studio/>