



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA

**SISTEMA DE AYUDA A LA
REHABILITACIÓN MÉDICA BASADO EN
SENSORES DE MOVIMIENTO
INALÁMBRICOS**

Autor: Álvaro Sánchez Martín

Director: David Contreras Bárcena

Madrid

Junio 2017

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. ÁLVARO SÁNCHEZ MARTÍN

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “SISTEMA DE AYUDA A LA REHABILITACIÓN MÉDICA BASADO EN SENSORES DE MOVIMIENTO INALÁMBRICOS”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

- El autor se compromete a:
 - a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
 - b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
 - c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ..09..... dejunio..... de2017

ACEPTA

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA TELEMÁTICA

**SISTEMA DE AYUDA A LA
REHABILITACIÓN MÉDICA BASADO EN
SENSORES DE MOVIMIENTO
INALÁMBRICOS**

Autor: Álvaro Sánchez Martín

Director: David Contreras Bárcena

Madrid

Junio 2017

Agradecimientos

A mis padres y hermano, por haber estado siempre ahí, en las buenas y en las malas. Sin vosotros nunca podría haber llegado hasta aquí. Gracias de corazón por todo.

A mi director de proyecto, David, por brindarme la oportunidad de trabajar en torno a esta idea y poder llevarla a cabo, después de muchos meses de trabajo y dedicación.

A todas aquellas personas que de una manera u otra han formado parte del camino hasta llegar aquí. Gracias.

SISTEMA DE AYUDA A LA REHABILITACIÓN MÉDICA BASADO EN SENSORES DE MOVIMIENTO INALÁMBRICOS

Autor: Sánchez Martín, Álvaro.

Director: Contreras Bárcena, David.

RESUMEN DEL PROYECTO

A lo largo de este proyecto se ha desarrollado una aplicación móvil, orientada a dispositivos móviles tanto Android como iOS, con el objetivo principal de proporcionar, a cada paciente que esté involucrado en un proceso de rehabilitación física de una extremidad, la posibilidad de recibir retroalimentación en directo a través de la pantalla de su smartphone para así poder saber si se está realizando correctamente cada ejercicio, evitando lesiones colaterales producto de una mala ejecución de cada uno de los movimientos propuestos dentro del tratamiento pautado y, por lo tanto, aumentando la eficacia de la rehabilitación.

Palabras clave: IoT, bluetooth, sensor, paciente, especialista, rehabilitación, aplicación móvil.

1. Introducción

A lo largo de las últimas décadas la población mundial ha sufrido cambios demográficos notables, los cuales han tenido una consecuencia clara: las pirámides de población han cambiado, teniendo lugar un aumento considerable del número de personas de mediana edad y también mayores. Este aumento está directamente relacionado además con el aumento de personas con algún tipo de discapacidad, ya que la edad es un factor determinante en la aparición de enfermedades degenerativas y, por consiguiente, la aparición de problemas físicos.

El origen de este proyecto está en la necesidad de implementar una solución para pacientes en procesos de rehabilitación más sencilla que las que existen actualmente, y enmarcada dentro del mundo de los smartphones que permita emplearse conjuntamente con las herramientas que ya existen en el mercado. Actualmente no existen plataformas que permitan al usuario, de una manera sencilla e intuitiva, poder recibir en su smartphone retroalimentación relativa al movimiento que está llevando a cabo para así saber si el proceso de rehabilitación se está realizando correctamente, haciendo de esta solución una opción al alcance de cualquier usuario.

2. Definición del proyecto

Con este proyecto lo que se busca es ayudar a mejorar la calidad de vida de aquellos pacientes que se encuentran con la necesidad de llevar a cabo la rehabilitación física de una extremidad, mejorando al mismo tiempo el canal de comunicación paciente-especialista, permitiendo a este último llevar a cabo un mejor seguimiento de todos y cada uno de sus pacientes, teniendo un mayor control sobre los ejercicios establecidos.

3. Descripción del sistema desarrollado

El proyecto desarrollado cuenta con dos elementos principales, los cuales forman el sistema. Por un lado, se encuentra el dispositivo móvil en el cual se ejecuta la aplicación desarrollada, la cual permite procesar toda la información recibida desde el sensor por medio de una conexión bluetooth. Por otro lado, está el sensor, el cual envía toda la información del movimiento que se está produciendo al dispositivo móvil. Dicha información es captada gracias al sensor a través del acelerómetro y del giroscopio que incorpora.

A continuación, se muestra un esquema del mencionado sistema:



Figura 1 – Esquema del sistema desarrollado

Es necesario distinguir dos fases en el uso de la aplicación a la hora de crear un ejercicio. Esta distinción se debe a que, como el movimiento del sensor es completamente libre, es necesario ubicarlo en el espacio para poder procesar correctamente la información de los sensores. Esto permite saber en qué posición está el sensor y cuál es el movimiento en concreto que va a llevarse a cabo por parte del paciente.

Por medio de la aplicación móvil se muestra al usuario información en directo relativa al movimiento que se está realizando, como la velocidad a la que se está moviendo la extremidad, indicadores para saber si se está realizando correctamente o es necesario llevar a cabo algún tipo de corrección en dicho movimiento, o incluso el número de repeticiones realizadas hasta ese preciso instante. El usuario puede visualizar tanto el objetivo de cada sesión de su programa de rehabilitación, es decir, qué ejercicios debe hacer el paciente para una correcta rehabilitación de la extremidad tratada, así como el objetivo fijado para cada movimiento en concreto, esto es, el número de repeticiones objetivo y el número de series a realizar de cada uno de los ejercicios.

En todo momento el especialista tiene la posibilidad de agregar o eliminar ejercicios dentro del programa de rehabilitación establecido, y al mismo tiempo el paciente cuenta con la opción de visualizar, en un vídeo explicativo, cómo se debe hacer cada uno de los movimientos del mencionado programa.

Al finalizar cada ejercicio, el paciente visualiza una ventana de resultados y estadísticas, en la que se muestran una serie de parámetros acerca del ejercicio realizado, como son la duración en tiempo que le ha llevado al paciente completarlo, el número de repeticiones que se han hecho correctamente y la eficacia en forma de porcentaje tras la realización de ese ejercicio. Esto significa que cuanto menos se haya fallado a lo largo de todo el movimiento ese porcentaje de eficacia será mayor, debiéndose buscar siempre una eficacia del 100% al terminar cada ejercicio.

4. Análisis de Resultados

A continuación, se muestran las capturas de pantalla de la aplicación en las cuales se pueden visualizar todos los elementos que permiten cubrir la funcionalidad descrita en el apartado anterior.



Figura 2 -Ventana de inicio

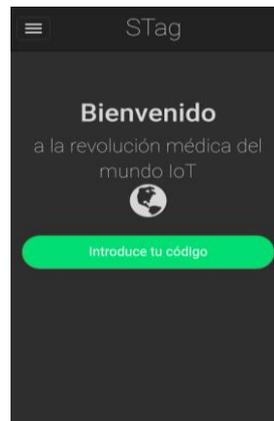


Figura 3 -Ventana de validación 1

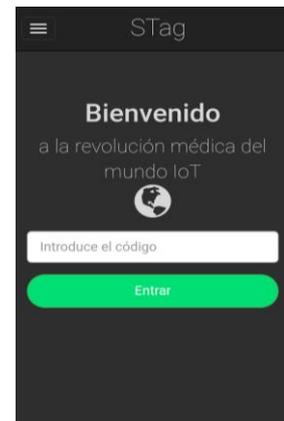


Figura 4 -Ventana de validación2



Figura 5 -Ventana principal



Figura 6 -Ventana de calibración 1



Figura 7 -Ventana de calibración2



Figura 8 -Ventana de calibración

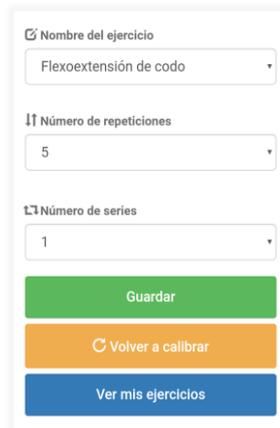


Figura 9 -Ventana de guardado

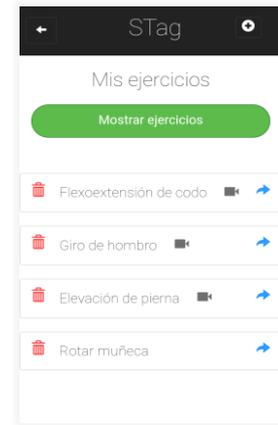


Figura 10 -Ventana de ejercicios

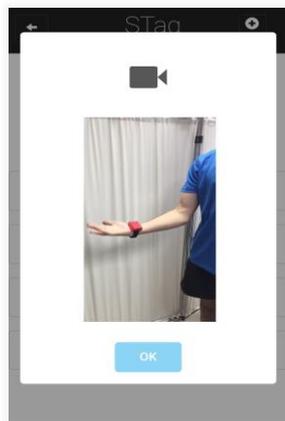


Figura 11 -Visualización de vídeo

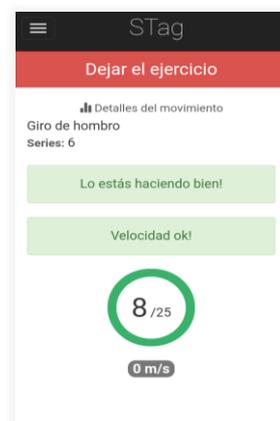


Figura 12 -Ventana de realización



Figura 13 -Estadísticas

Tras haber realizado numerosas pruebas de test de la aplicación con el principal objetivo de comprobar que todas las funcionalidades que se han desarrollado están implementadas correctamente, surgió la oportunidad de presentar la aplicación en funcionamiento en el Hospital Universitario Puerta de Hierro localizado en Majadahonda, Madrid.

Además de ser ésta una oportunidad muy positiva de cara a la fase final del proyecto, tiene el valor añadido de que este Hospital ha abierto sus puertas de cara a futuras pruebas de esta nueva aplicación con pacientes reales.

En dicha reunión se llevó a cabo una demostración del potencial y las funcionalidades con las que cuenta esta nueva tecnología y, se puede decir que la reunión fue todo un éxito. La doctora Mercedes Ramos Solchaga, jefa del Servicio de Rehabilitación, comentó lo beneficiosa que puede ser esta tecnología para la denominada “rehabilitación domiciliaria”. Esto es, básicamente, pacientes con algún tipo de dolencia que se encuentren en fases avanzadas de sus procesos de rehabilitación puedan llevar a cabo sus sesiones de rehabilitación en sus domicilios, sin tener que desplazarse a su centro médico de referencia, con los inconvenientes que esto conlleva. Ha comentado que, a día de hoy,

el Hospital Puerta de Hierro se encuentra desarrollando un programa ‘expres’ de rehabilitación de pacientes operados de rodilla. Son pacientes a los que se ha implantado una prótesis, y esta aplicación supondría un gran avance en este ámbito.

En resumen, la doctora Mercedes ha visto en la reunión dos ventajas principales muy claras. Por un lado, esta aplicación permite realizar un seguimiento real de la adherencia de cada paciente a su programa de rehabilitación y, por otro lado, va a permitir conocer la calidad de realización de cada ejercicio para cada uno de los pacientes tratados.

De cara al futuro más próximo de este proyecto, una de las claves principales que supondría el siguiente gran paso y avance de esta tecnología sería la conexión de la aplicación a una plataforma cloud. Esta conexión, permitiría aumentar la funcionalidad del servicio, haciendo posible almacenar mucha más información relativa a cada paciente y a su proceso de rehabilitación física en bases de datos remotas. De esta manera, se podrían implementar una serie de dashboards en los que, tanto el paciente como el especialista, podrían visualizar distintas estadísticas y parámetros relativos al proceso que se está siguiendo. El acceso a dichos dashboards se llevaría a cabo a través de la aplicación móvil, previo inicio de sesión por parte del usuario. El paciente accedería a aquella información que se considerase relevante y el especialista podría obtener una visión global del progreso de cada uno de sus pacientes.

También se ha pensado en un sistema que permita al médico realizar modificaciones o comunicarse a través de la aplicación con sus pacientes, habilitando así un canal de comunicación más directo con sus pacientes, evitando desplazamientos innecesarios de los pacientes a sus centros de rehabilitación u hospitales.

Además, se abre una línea de investigación y desarrollo de este proyecto con el estudio de la posibilidad de integrar esta tecnología con pulseras inteligentes presentes ya en el mercado, de las cuales sería muy bueno averiguar si es posible obtener toda la información que obtenemos de nuestro sensor a través de ellas, para poder ofrecer este mismo servicio en el caso de que el paciente cuente ya con una de ellas, sin la necesidad de adquirir el sensor que se ha empleado en este proyecto.

5. Conclusiones

El objetivo perseguido con el desarrollo de este proyecto se ha completado con éxito, el cual ha sido en todo momento implementar una plataforma que permita mejorar el proceso de rehabilitación de pacientes que sufren algún tipo de proceso incapacitante, aumentando la interacción entre cada paciente y su médico traumatólogo, rehabilitador o fisioterapeuta, según cada caso.

Con la tecnología que se ha desarrollado, los especialistas tienen la capacidad de realizar un seguimiento más detallado de cada uno de sus pacientes, y al mismo tiempo los pacientes podrán aumentar el control sobre su programa de rehabilitación al completo y a la hora de realizar cada ejercicio, recibiendo constante retroalimentación acerca de sus movimientos, acompañada de estadísticas finales donde pueden ver la eficacia de su rehabilitación además de otros parámetros ya mencionados, muy útiles de cara a la ejecución de cada uno de esos movimientos por parte de cada paciente.

SYSTEM FOCUSED ON IMPROVING EFFICIENCY IN MEDICAL REHABILITATION USING WIRELESS MOTION SENSORS

Author: Sánchez Martín, Álvaro

Supervisor: Contreras Bárcena, David.

ABSTRACT

A multiplatform mobile application has been developed throughout this project. It can be used in both Android and iOS devices and its main goal is to provide patients who need to go through a rehabilitation process with a key platform which will help them receive instantaneous feedback regarding the efficiency of their movements. This project will help them avoid collateral injuries related to malpractice in doing the suggested exercises within the scheduled treatment.

Keywords: IoT, bluetooth, sensor, patient, specialist, rehabilitation, mobile application.

6. Introduction

Over the past years, the world's population has suffered important demographic changes. These changes have had a clear consequence: population pyramids all around the world have changed, the number of middle age people and elderly people has significantly increased. This constant rise is directly linked to the increase in the amount of people who have any type of physical disability since age is a driving factor behind the onset of degenerative diseases and therefore the onset of physical issues.

This project focusses on implementing a simple solution for patients who are involved in physical rehabilitation processes. At present, there are no applications in the market that allow patients receive instant feedback about their rehabilitation processes, that shows in an easy way all the information needed on their smartphone screens. This project will allow improve these patients' quality of life. The aim of this project is that the application is accessible for all within the reach of all patients.

7. Architecture description

The developed project has two main parts. On one hand, we have the patient's smartphone which is where the application is executed. It processes all the information received from the sensor. On the other and we have the sensor. It detects every detail in the patient's movement via its accelerometer and gyroscope module.

The following figure shows an architecture's diagram:



Figure 1 – Developed system diagram

It is necessary to distinguish two different stages while the patient, helped by its specialist, creates a new exercise in the application. It is important to make this distinction because, as the sensor has free movement in the available space, we need to locate it around the patient and know in which axis the patient is moving its treated limb.

The patient receives, via the smartphone’s screen, instant information relative to the movement that he has done. For example, the speed at which the patient is moving the treated limb, different indicators that let the user know if the movement is being done correctly or if it is necessary to make any type of correction. Besides, the patient can see the number of repetitions that have been done throughout the entire exercise. The application shows the aimed number of repetitions and series.

The specialist can manually add or delete exercises from the patient’s rehabilitation program at any time. At the same time, the patient can reproduce a video from each of the exercises in case he does not know how to do it.

After doing an exercise, the patient is prompted in a window with some statistics from the performed movement such as the time duration, the number of repetitions done or the percentage of efficiency while doing the exercise.

8. Results

The following screen captures show in detail how the application has been implemented:



Figure 2-Home screen

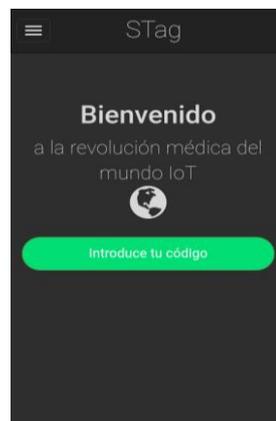


Figure 3-Validation window 1

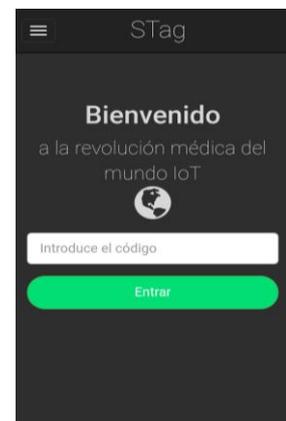


Figure 4-Validation window 2



Figure 5-Main window

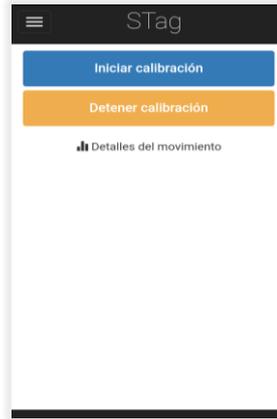


Figure 6 -Calibration window 1

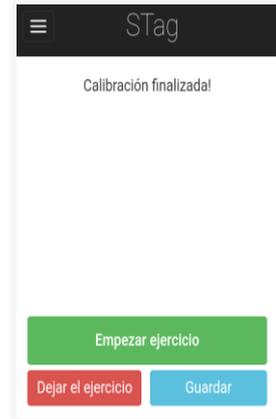


Figure 7 -Calibration window 2



Figure 8 -Calibration window



Figure 9 -New exercise window

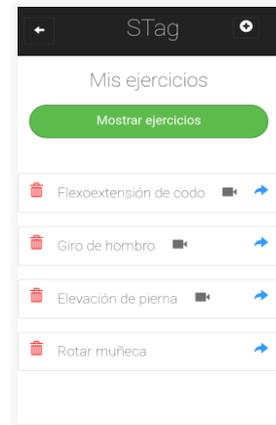


Figure 10 - List of exercises window

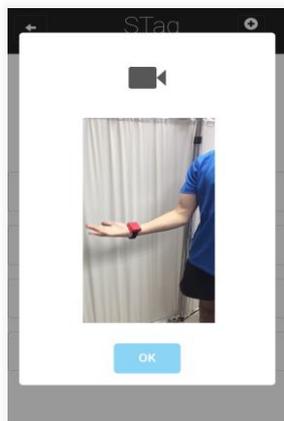


Figure 11 -Video visualization

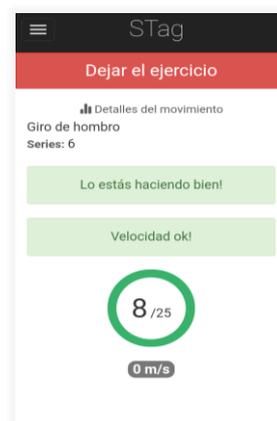


Figure 12 -Exercise execution window



Figure 13-Statistics

After having passed different tests to prove that everything in the application works correctly, we had the opportunity of presenting the project at Hospital Puerta de Hierro in Madrid. We will be able to have some more testing experiences with real patients at this institution.

We are working in a new version of the application to add some functionalities. It will be connected to a cloud database and a cloud portal. It will let us implement different dashboards where both the patient and its specialist will have access to. After logging in, they will find more statistics and it is conceived as a new channel of communication between the two of them. At the same time, the specialist will be able to change the patient's sessions so that the patient will not have to go and visit the specialist every day or every week.

Finally, we can confirm that a new line of research is now open because it would be a great improvement for this project if we could connect the smartphone to a commercial wristband such as the one from Fitbit or the one from Garmin. In this case, we could get all the necessary parameters of the movement from it so the patient would not need to buy the sensor itself.

9. Conclusions

The main goal of this project has been successfully completed. A new platform has been implemented which will help lots of patients with their rehabilitation processes. It allows an increase in the interaction between specialists and their patients.

With this new technology specialists will have the capability of doing a close and detailed monitoring of each of their patients, and at the same time every patient will be able to increase the control over each of the exercises that he does. This, together with the carefully designed windows, which allows an easy and intuitive use of the application, make this app a great solution for every patient who needs to go through a rehabilitation process.

Índice de la memoria

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1. Introducción | 6 |
| 1.1 Motivación del proyecto..... | 7 |
| Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías..... | 13 |
| 2.1 Sensor Bluetooth | 13 |
| 2.2 Bluetooth Low Energy | 16 |
| 2.3 Evothings Studio | 17 |
| 2.4 Apache Cordova..... | 20 |
| 2.5 JSON..... | 22 |
| Capítulo 3. Estado de la Cuestión | 25 |
| 3.2 Tecnologías para rehabilitación física..... | 26 |
| 3.2.1 biomechSOLUTIONS | 26 |
| 3.2.2 tyromotion | 28 |
| 3.3 Dispositivos wearables..... | 29 |
| 3.3.1 Beast..... | 30 |
| 3.3.2 Atlas Wristband..... | 31 |
| Capítulo 4. Definición del Trabajo | 33 |
| 4.1 Justificación..... | 33 |
| 4.2 Objetivos | 34 |
| 4.2.1 Aumento de la autonomía del paciente..... | 34 |
| 4.2.2 Mayor control por parte del especialista | 35 |
| 4.2.3 Mejora de la eficacia de la rehabilitación | 35 |
| 4.3 Metodología y Planificación | 36 |
| 4.4 Estimación Económica | 41 |
| 4.4.1 Costes en Hardware | 41 |
| 4.4.2 Costes en Software - Desarrollo..... | 42 |
| Capítulo 5. Sistema Desarrollado | 45 |
| 5.1 Análisis del Sistema | 45 |
| 5.1.1 Casos de Uso..... | 46 |
| 5.1.2 Diagrama de Flujo..... | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.3 Fases..... | 48 |
| 5.1.4 Acelerómetro y Giroscopio..... | 53 |
| 5.1.5 Otras funcionalidades | 58 |
| 5.2 Diseño e Implementación | 62 |
| 5.2.1 Ventana de inicio..... | 63 |
| 5.2.2 Ventana de validación | 64 |
| 5.2.3 Ventana principal..... | 66 |
| 5.2.4 Ventana de calibración y guardado de un ejercicio..... | 69 |
| 5.2.5 Ventana de ejercicios guardados | 73 |
| 5.2.6 Ventana de realización de un ejercicio seleccionado..... | 75 |
| Capítulo 6. Análisis de Resultados..... | 79 |
| Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros..... | 83 |
| Capítulo 8. Bibliografía..... | 87 |
| ANEXO A 89 | |
| 8.1 Diagrama de bloques funcional (CC26XX) | 89 |
| 8.2 Diagrama de pines | 90 |
| 8.3 Diseño del circuito..... | 91 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Ilustración 1 – Comparativa pirámides de población España 1950 - 2005 | 8 |
| Ilustración 2 - Proporción de personas con discapacidad por edades. Fuente: INE..... | 9 |
| Ilustración 3 – SensorTag 2650STK | 14 |
| Ilustración 4 – Tecnología Bluetooth Low Energy | 16 |
| Ilustración 5 – Logotipo de Evothings | 18 |
| Ilustración 6 – Método de conexión mediante token..... | 19 |
| Ilustración 7 – Logo de Apache Cordova..... | 20 |
| Ilustración 8 – JSON | 23 |
| Ilustración 9 – Logo de biomechSOLUTIONS..... | 27 |
| Ilustración 10 – Logo de tyromotion | 28 |
| Ilustración 11 – Logo de Beast..... | 30 |
| Ilustración 12 – Logo de Atlas Wearables..... | 31 |
| Ilustración 13 – Cronograma al comienzo del proyecto..... | 40 |
| Ilustración 14 – Esquema del sistema desarrollado..... | 45 |
| Ilustración 15 – Caso de uso de un usuario | 46 |
| Ilustración 16 – Caso de uso de la aplicación móvil | 47 |
| Ilustración 17 – Diagrama de flujo del sistema desarrollado | 48 |
| Ilustración 18 – Fases a lo largo del uso de la aplicación..... | 49 |
| Ilustración 19 – Conversión en directo de los valores del acelerómetro..... | 52 |
| Ilustración 20 – Valores del acelerómetro en función de su posición..... | 54 |
| Ilustración 21 – Representación de la velocidad angular | 55 |
| Ilustración 22 - Código de calibración del acelerómetro..... | 56 |
| Ilustración 23 - Código de calibración del giroscopio..... | 56 |
| Ilustración 24 – Botón Guardar Ejercicio..... | 58 |
| Ilustración 25 – Código de guardado de un nuevo ejercicio | 61 |
| Ilustración 26 – Contador de repeticiones con objetivo | 61 |
| Ilustración 27 – Ventana de inicio..... | 63 |
| Ilustración 28 – Ventana de validación | 64 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 29 – Mensajes informativos de acceso al servicio..... | 65 |
| Ilustración 30 – Ventana principal..... | 66 |
| Ilustración 31 – Código de conexión y desconexión del sensor con el dispositivo móvil .. | 68 |
| Ilustración 32 - Botones de acceso a ejercicios y/o calibración | 69 |
| Ilustración 33 – Ventana de calibración y guardado | 70 |
| Ilustración 34 – Ventana de guardado | 72 |
| Ilustración 35 – Ventana de ejercicios guardados | 73 |
| Ilustración 36 – Visualización de video de un ejercicio | 74 |
| Ilustración 37 – Ventana de realización de un ejercicio seleccionado | 75 |
| Ilustración 38 – Visualización de las estadísticas finales del movimiento..... | 77 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 – Versatilidad de Apache Cordova. Servicios vs Sistema Operativo. Fuente: Apache Cordova Web..... | 21 |
| Tabla 2 – Rangos de ángulos leídos en función del cuadrante sobre el que gira el sensor, al comienzo del proyecto..... | 37 |
| Tabla 3 - Rangos de ángulos leídos en función del cuadrante sobre el que gira el sensor, después de implementar el algoritmo | 38 |
| Tabla 4 – Desglose de tareas a realizar al comienzo del proyecto | 40 |
| Tabla 5 – Desglose de costes en Hardware | 42 |
| Tabla 6 - Desglose de costes en Software y Desarrollo | 43 |
| Tabla 7 - Bits y uso correspondiente en la cadena de 16 bits..... | 57 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de uno de los ámbitos que mayor interés ha suscitado a lo largo de los últimos años: el mundo del IoT. El “Internet de las cosas” ha supuesto una revolución en las relaciones entre los objetos y las personas, en definitiva, en la digitalización del mundo físico. Ya no solo se trata de las novedades que han tenido lugar desde su aparición hasta ahora, sino del gran abanico de posibilidades que se abre ante nosotros dentro del “mundo de las cosas”.

El Internet de las cosas (IoT) es un término acuñado por Kevin Ashton, un pionero de la tecnología británico que trabajaba en la identificación de radiofrecuencias (RFID) y concibió un sistema de sensores universales que conectaban el mundo físico a Internet. Aunque las cosas, Internet y la conectividad son los tres componentes principales del IoT, el valor se logra al reducir la distancia entre el mundo físico y el mundo digital mediante el empleo de sistemas que se refuerzan y mejoran de manera constante. Y lo que se busca con este proyecto es precisamente eso: acercar el mundo físico, en este proyecto son sensores bluetooth, con el mundo digital, el mundo de los teléfonos inteligentes, aportando valor dentro del mundo de la rehabilitación física.

Por lo tanto, este proyecto tiene como objetivo implementar una solución IoT dentro del mundo médico, en concreto en el ámbito de la rehabilitación de pacientes con algún tipo de proceso incapacitante para mejorar dicha rehabilitación y ayudar así a esos pacientes y a todos los profesionales médicos en su día a día.

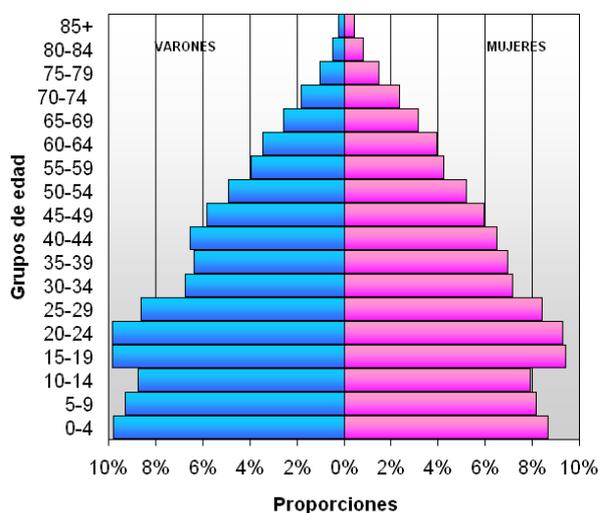
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El origen de este proyecto está en la necesidad de implementar una solución para pacientes en procesos de rehabilitación más sencilla que las que existen actualmente, y enmarcada dentro del mundo de los smartphones que permita emplearse conjuntamente con las herramientas que ya existen en el mercado. Actualmente no existen plataformas que permitan al usuario, de una manera sencilla e intuitiva, poder recibir en su smartphone retroalimentación relativa al movimiento que está llevando a cabo para así saber si el proceso de rehabilitación se está realizando correctamente, haciendo de esta solución una opción al alcance de cualquier usuario.

A lo largo de las últimas décadas, en España, se han producido cambios demográficos notables, los cuales han tenido una consecuencia clara: la pirámide de población en España ha cambiado significativamente, teniendo lugar un aumento considerable del número de personas de mediana edad y mayores. Este aumento está directamente relacionado con el aumento de personas con algún tipo de discapacidad, ya que la edad es un factor determinante en la aparición de enfermedades degenerativas y, por consiguiente, la aparición de problemas físicos.

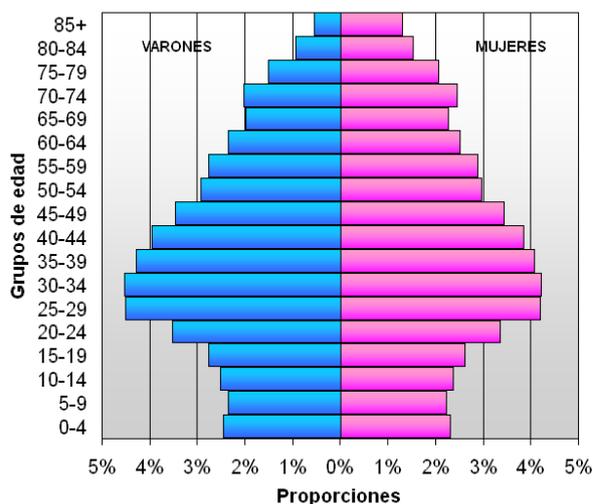
A continuación, se muestran dos gráficas, las cuales permiten realizar una comparación del número de personas mayores de 35 años presentes en España. Se comparan los años 1950 y 2005. En ellas se puede observar cómo, gracias a los diversos avances científicos y tecnológicos que han tenido lugar en las últimas décadas en el ámbito de la salud, se ha producido un envejecimiento de la población, ya que la esperanza de vida ha aumentado notablemente.

Pirámide de población de España, año 1950



Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Censo de 1950

Pirámide de población de España, año 2005



Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Censo a 1 de enero de 2005

Ilustración 1 – Comparativa pirámides de población España 1950 - 2005

Un estudio llevado a cabo en 2008 por el Ministerio de Sanidad y Política Social en colaboración con el Instituto Nacional de Estadística, afirmó la existencia de 3,85 millones de personas, residente en hogares, con discapacidad dentro del territorio español. Esto supone una tasa de 85,5 por mil habitantes [1].

Este estudio arroja uno de los datos más importantes, el cual sustenta la motivación de este proyecto dentro del ámbito en el cual se enmarca: la discapacidad predominante es la que afecta a la movilidad de los pacientes. Un 67,2% de las personas con discapacidad presentan limitaciones para moverse y por lo tanto llevan a cabo procedimientos de rehabilitación física.

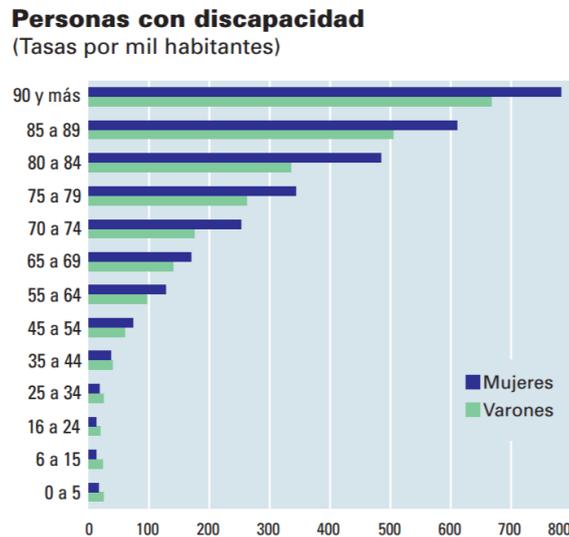


Ilustración 2 - Proporción de personas con discapacidad por edades. Fuente: INE

La osteo-articular, la cual consiste en alteraciones mecánicas y motrices en cara, cabeza, cuello y extremidades, se erige como la primera causa de discapacidad, con 1.078.000 personas (un 28,04% del total), seguido por los crónicos (19,10%) [2].

En cuanto al gasto que se produce en el ámbito de la rehabilitación en España las cifras son muy representativas de la situación que se vive hoy en día en nuestro país. El gasto en servicios de asistencia curativa y de rehabilitación alcanza 52.799 millones de euros. Atendiendo al tipo de proveedor de atención sanitaria, el gasto de los hospitales, que asciende a 37.973 millones de euros, supone el mayor porcentaje del gasto sanitario total [4].

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), en el mundo hay aproximadamente mil millones de personas con discapacidad, de las que la mayoría carece de acceso a una atención médica y a servicios de rehabilitación apropiados, especialmente en los países de ingresos bajos y medios. Como consecuencia de ello, estas personas tienen más problemas para alcanzar y mantener un nivel óptimo de autonomía y salud. La falta de servicios obstaculiza su plena inclusión y participación en todos los aspectos de la vida [3].

Existen diversos tipos de discapacidades en la actualidad. Se puede decir que una persona padece una discapacidad cuando tiene dificultades con alguna de las siguientes funciones:

- Actividades normales del cuerpo, como ver, oír, hablar o caminar.
- Actividades cotidianas, como lavarse o vestirse.
- Algunas actividades frecuentes, como realizar las tareas del hogar, los deberes escolares o trabajar.
- Realizar actividades habituales, como conducir o tomar el autobús.

En el caso de discapacidades físicas las cifras son absolutamente indicadoras del ámbito al que hace frente este proyecto. Solo en Estados Unidos, aproximadamente 54 millones de personas tienen algún tipo de discapacidad con efectos en los aspectos físico, sensorial, mental y del cuidado personal, que varían de leves a graves. Casi un 42 por ciento de las personas mayores de 65 años (14 millones de personas) tienen algún grado de discapacidad y aproximadamente 11 millones de personas de todas las edades presentan algún tipo de discapacidad severa y necesitan ayuda para realizar las actividades mencionadas [4] [5]. Todas ellas requieren de algún tipo de proceso de rehabilitación el cual ayuda a la mejora, no solo de su discapacidad, sino también a mejorar su estado de bienestar en el día a día.

A nivel mundial, la cifra es de 110 millones de personas con discapacidad, y dichas tasas están aumentando a causa del envejecimiento de la población y el aumento de las enfermedades crónicas, entre otras causas.

Por lo tanto, es verdad que existe un número muy elevado de personas que, o se encuentran en la necesidad diaria de llevar a cabo algún tipo de rehabilitación, o que por alguna razón particular y, durante un período de tiempo limitado, requieren pasar por una etapa de rehabilitación física. Algunos ejemplos podrían ser comunes lesiones propias de la práctica de deportes, malas posturas que desembocan en lesiones articulares y/o musculares o incluso accidentes.

Dentro del mundo de la rehabilitación física, este proyecto tiene como principal objetivo tener una influencia clara y servir como complemento, además de ayudar, a todos los pacientes que tienen que llevar a cabo ejercicios terapéuticos.

Los ejercicios terapéuticos comprenden una serie de maniobras que estimulan el funcionamiento de músculos, nervios, huesos, articulaciones y los aparatos cardiovascular y respiratorio. La recuperación de la movilidad depende de la función de la potencia de los músculos que controlan las articulaciones. Los objetivos globales son desarrollar mediante ejercicios adecuados los músculos con deficiencias, restablecer un movimiento lo más natural posible con el objeto de prevenir deformidades, fortalecer los músculos y estimular las funciones de los diferentes sistemas y órganos corporales [6].

Se puede decir que estos ejercicios no son solo una forma de tratamiento de diferentes afecciones, sino que también son un arma preventiva. Además, cuentan con muchas ventajas, ya que generan más energía y capacidad de trabajo, ayudan a combatir el estrés, aumentan la vitalidad, restauran funciones nerviosas, ayudan a combatir la ansiedad y la depresión, incrementan la resistencia a la fatiga, ayudan a relajarse y estar menos tenso, mejoran el tono muscular, queman calorías, ayudando al paciente a perder peso, su peso de más o a mantenerse en su peso ideal.

Como se ha mencionado, es en este ámbito de la rehabilitación física donde entra en juego este proyecto. Son muchos los pacientes que deben realizar ejercicios terapéuticos como tratamiento para sus respectivas dolencias, pero en ningún caso esos pacientes tienen manera de saber si el movimiento que están realizando lo están llevando a cabo correctamente o no, a menos que su médico rehabilitador o su fisioterapeuta se encuentren constantemente con ellos guiándoles durante todas y cada una de las sesiones que dura su rehabilitación.

Mediante el uso de la aplicación desarrollada en este proyecto, junto con un sensor del cual se hablará más adelante, tanto los pacientes como los médicos rehabilitadores y fisioterapeutas, tendrán a su disposición una herramienta muy potente al alcance de sus manos, la cual les permitirá seguir su rehabilitación de una manera más guiada, siendo

conscientes en todo momento de la eficacia del ejercicio que estén realizando y sobre todo si lo están haciendo de forma correcta.

Es importante mencionar que una incorrecta realización de los ejercicios físicos que comprenden la rehabilitación en sí, puede agravar las lesiones o incluso provocar lesiones nuevas. Por lo tanto, es muy importante llevar a cabo dichos ejercicios de la mejor manera posible, aumentando así la efectividad de la rehabilitación y reduciendo, por lo tanto, la duración de los períodos de dicho proceso rehabilitador.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

El siguiente capítulo tiene como principal objetivo llevar a cabo una explicación detallada de todas y cada una de las tecnologías y herramientas que han sido empleadas para la realización de este proyecto a lo largo de todas y cada una de sus fases, desde el diseño, pasando por la implementación del sistema y la elección de la parte hardware del mismo, hasta llegar a la fase de pruebas y la generación de la aplicación como producto final.

No solo se pretende profundizar en el estudio de las mismas, sino que además se busca justificar para cada una de ellas la elección que se ha hecho. Una elección inevitable, de unas tecnologías frente a otras, en base a los objetivos del proyecto y las necesidades planteadas.

2.1 SENSOR BLUETOOTH

Uno de los elementos más importantes dentro de este proyecto es el sensor que se ha utilizado como elemento para capturar toda la información relativa al movimiento realizado por parte del paciente. A continuación, se expone cuál se ha elegido junto con todas sus características.

El sensor empleado es el SimpleLink Bluetooth SensorTag de la empresa Texas Instruments. Esta compañía, conocida en la industria electrónica como TI, es una empresa estadounidense con sede en Dallas (Texas, EE. UU.) que desarrolla y comercializa semiconductores y tecnología para ordenadores. TI es el tercer mayor fabricante de semiconductores del mundo detrás Intel y Samsung, y es el mayor suministrador de circuitos integrados para teléfonos móviles. Igualmente, es el mayor productor de procesadores digitales de señal y semiconductores analógicos. Desarrollan su actividad en otras áreas como circuitos integrados para módem de banda ancha, periféricos para ordenadores, dispositivos digitales de consumo y RFID.

El modelo de sensor que se ha utilizado es el CC2650STK. TI ha introducido este sensor en el mercado con el objetivo de facilitar la puesta en marcha y el desarrollo de productos basados en ideas relativas al mundo IoT/cloud y de los sistemas interconectados.

Este sensor consta de una pequeña placa donde están integrados una serie de sensores para su uso y captación de datos. En concreto, consta de diez sensores MEMS (Sistemas Microelectromecánicos) de baja potencia. Dicha placa se puede extender mediante una serie de paquetes de desarrollo que Texas Instruments proporciona y comercializa a parte del sensor, con el fin de dotar de una mayor autonomía al conjunto diseñado (conectores para llevar a cabo simulaciones en directo desde el ordenador, un display que permite mostrar información de los sensores sin necesidad de conectarlo vía Bluetooth a un dispositivo, etc).

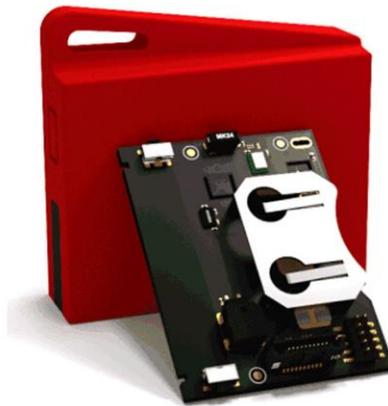


Ilustración 3 – SensorTag 2650STK

La familia SimpleLink de Texas Instruments está constituida por un conjunto de microcontroladores wireless (MCUs), los cuales forman parte de la última generación disponible de soluciones orientadas a conectividad wireless de bajo consumo. Este es uno de los factores que hacen que este sensor sea una de las mejores opciones para este proyecto, ya que el consumo energético se reduce notablemente, lo cual es muy beneficioso para que los pacientes puedan emplearlo a diario sin tener que preocuparse por cargar el dispositivo.

Esto permite al sensor estar alimentado por una única batería (pila de botón), la cual dota al sensor de una gran autonomía. Esto, unido a que se emplea la tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) de la cual se hablará más adelante, hacen que este sensor tenga un consumo energético mínimo.

En cuanto a los sensores que incorpora este dispositivo encontramos los siguientes: sensor de luz, sensor magnético, de humedad, de presión, acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y sensor de temperatura entre otros.

Teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, solo se harán uso de dos de los diez sensores provistos. Por un lado, se utilizará el acelerómetro, y por otro el giroscopio. Estos son los dos sensores necesarios para poder conocer en todo momento la posición y la velocidad del sensor y, de esa información, poder obtener conclusiones acerca del movimiento realizado. Más adelante se comentará específicamente todo lo relativo a estos sensores, desde su calibración hasta el empleo que se hace de ellos. La idea es que el paciente se coloque este sensor, a modo de dispositivo wearable, en aquella extremidad sobre la que se va a realizar la rehabilitación y por consiguiente el movimiento, y por medio del análisis detallado de la información recibida por estos sensores, ser capaces de ofrecer una retroalimentación detallada al paciente, con el fin de que corrija el movimiento en el caso de que no se esté llevando a cabo correctamente. Esta es una de las muchas funcionalidades que puedan llegar a implementarse en la aplicación posteriormente y de las cuales hablaremos en el capítulo 7, en la parte de “Conclusiones y Trabajos Futuros” de esta memoria.

2.2 BLUETOOTH LOW ENERGY

La tecnología BLE (Bluetooth Low Energy) es una de las tecnologías que más está influyendo en el desarrollo del mundo IoT debido a sus grandes ventajas en cuanto a consumo energético. A continuación, se explica en qué consiste esta tecnología y por qué es tan beneficiosa para este proyecto.

La tecnología BLE evoluciona de forma separada al estándar “clásico” (Bluetooth 4.0) que emplean como protocolo de comunicación la inmensa mayoría de los dispositivos electrónicos y tiene como objeto concentrarse en rebajar drásticamente el consumo de energía requerido. Actualmente, se está trabajando ya en la comercialización de la nueva versión de bluetooth, el denominado Bluetooth 5. La quinta versión del protocolo inalámbrico apunta directamente al Internet de las Cosas con el doble de velocidad para aplicaciones de baja potencia.



Ilustración 4 – Tecnología Bluetooth Low Energy

Es importante mencionar aquí un dato muy importante en cuanto a esta tecnología, el cual es aportado por la consultora ABI Research. Esta consultora ha confirmado que, debido al incremento del tráfico Wifi, a la llegada de nuevos casos de uso y a la extensión de las aplicaciones IoT, la comercialización de circuitos integrados inalámbricos crecerá un 54% en 2020 [7]. Por lo tanto, queda claro que la tecnología que emplea el sensor utilizado para

este proyecto es una de las tecnologías punteras a día de hoy para aplicaciones relacionadas con el mundo del IoT.

El empleo de la tecnología Bluetooth Low Energy es idóneo en el caso de necesitar utilizar dispositivos que deben estar en funcionamiento durante largos períodos de tiempo, y cuya fuente de energía son baterías que incorpora el propio dispositivo en sí, como pueden ser las baterías de tipo botón, la cual es la que está presente en el sensor CC2650STK y de la cual obtiene toda su alimentación.

Al estar estandarizado dentro de las comunicaciones inalámbricas hace que sea sencillo llevar a cabo una integración transparente con otras tecnologías o arquitecturas que puedan formar el sistema diseñado. En el caso de este proyecto, la tecnología Bluetooth Low Energy estará presente en el enlace entre el sensor y el dispositivo móvil. Mencionar que este estándar es además compatible con las versiones anteriores de Bluetooth, incluyendo BR/EDR (Basic Rate / Enhanced Data Rate) y la versión 3.0 de Bluetooth.

2.3 EVOTHTINGS STUDIO

Una vez que se han establecido las principales líneas por las que se va a ir desarrollando el proyecto al comienzo del mismo, y al mismo tiempo se ha establecido qué sensor se va a emplear para captar los datos del movimiento del paciente, llega el momento en el que comienza el desarrollo del software propiamente dicho.

Existen muchas herramientas en el mercado que pueden ser empleadas como entorno de desarrollo para un proyecto como este. Al comienzo del mismo se hizo un análisis de cuáles eran las que mejor podría cubrir las necesidades del proyecto.

Desde el momento en el que se decidió llevar a cabo el desarrollo de una aplicación multiplataforma se descartaron los propios entornos de desarrollo de aplicaciones nativas. En el caso de aplicaciones nativas para Android el entorno empleado es Android Studio, y

en el caso de desarrollar una aplicación nativa para dispositivos iOS lo más conveniente sería utilizar Xcode.

Una vez descartados esos dos entornos de desarrollo, comenzó el estudio de entornos de desarrollo integrados que permitieran desarrollar la aplicación multiplataforma de comienzo a fin. Dentro de este mundo existen dos opciones que son las más empleadas: NetBeans y Eclipse. Ambos podrían haber sido dos entornos adecuados para el desarrollo de la aplicación, ya que, al ser una aplicación multiplataforma, como veremos más adelante, el desarrollo está basado en tecnologías como HTML, JavaScript y CSS principalmente. Esto hace que tanto NetBeans o Eclipse hubieran sido compatibles. Cuando ya prácticamente cualquier otra opción estaba descartada y nos íbamos a decantar por una de estas dos últimas opciones mencionadas, encontramos Evothings Studio.



Ilustración 5 – Logotipo de Evothings

Evothings es una compañía fundada con el principal objetivo y la visión de hacer más sencillo y eficiente el desarrollo de aplicaciones móviles para la industria del IoT [8], es por lo tanto una de las mejores herramientas que existen en el mercado actualmente para este tipo de desarrollos, y fue ésta la principal razón por la que fue seleccionado este entorno de desarrollo frente a los anteriormente mencionados.

Evothings Studio es una plataforma que permite desarrollar aplicaciones móviles multiplataforma, es decir, basadas en HTML5, JavaScript y CSS3, de una manera mucho más rápida de lo se podría hacer empleando otros entornos. El desarrollo utilizando esta herramienta funciona de la siguiente manera. Una vez que hemos realizado la descarga de la aplicación de escritorio y su posterior instalación en el equipo que se vaya a emplear para

desarrollar la aplicación, tenemos a nuestro alcance un sistema sencillo de utilizar y a la vez muy potente. Creamos un nuevo proyecto, cuya carpeta local estará, como no puede ser de otra manera, localizada en nuestro equipo. Una vez creado el proyecto, podemos empezar a trabajar y desarrollar la aplicación. Hasta aquí no hay ninguna novedad respecto de haber empleado otro entorno de desarrollo. La principal diferencia aparece cuando queremos ejecutar y probar el código.

Evthings Studio permite la conexión con un dispositivo móvil (el que vayamos a utilizar para testear la aplicación en lugar de usar un simulador en el propio ordenador) mediante un token y su propia aplicación, Evthings Viewer, a un servidor propio de Evthings. De esta forma, cada vez que guardamos el avance del proyecto, podemos visualizarlo en directo en el dispositivo móvil.

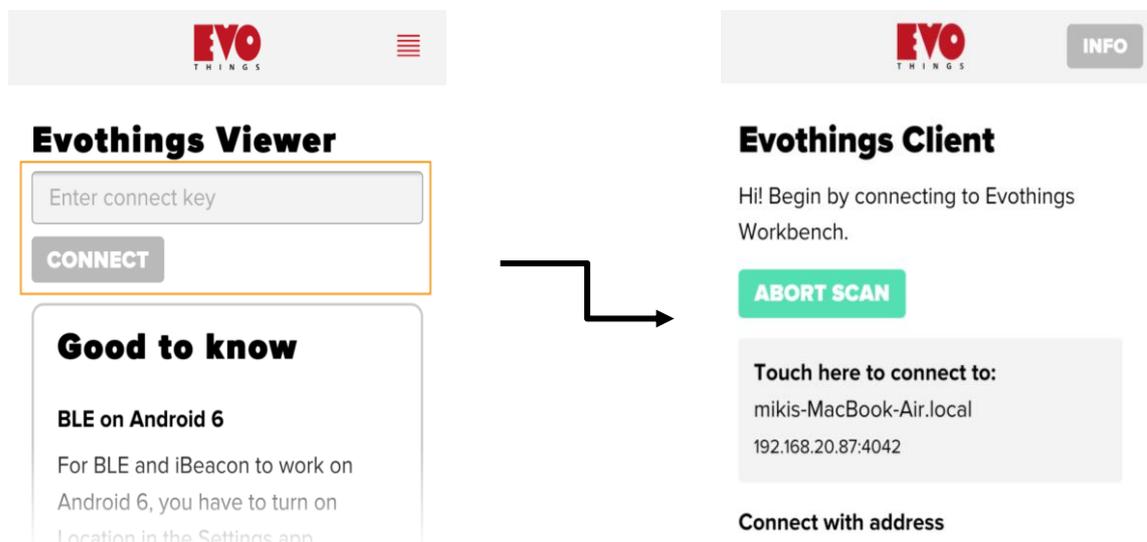


Ilustración 6 – Método de conexión mediante token

De esta manera se consigue ahorrar mucho tiempo en cuanto a la parte de testing de la aplicación y permite ir probando de forma muy rápida el código que se va escribiendo. Por

último, mencionar que el dispositivo físico móvil que se ha utilizado para el desarrollo del proyecto ha sido un Nexus 4, de la familia de smartphones de Google, el cual mediante la comentada conexión por token a la plataforma de Evothings nos ha permitido desarrollar correctamente la aplicación.

Estas fueron las razones que llevaron, al comienzo del proyecto, a utilizar este entorno de desarrollo y no otro de los que se han mencionado anteriormente. Se puede afirmar, sin duda alguna, que fue una decisión correcta ya que el desarrollo ha sido muy cómodo a través de la herramienta de Evothings.

2.4 APACHE CORDOVA

Para el desarrollo de aplicaciones móviles multiplataforma, existen diferentes frameworks que pueden ser utilizados. Dos de los más conocidos son PhoneGap y JQuery Mobile. Concretamente, PhoneGap es una distribución de Apache Cordova.



Ilustración 7 – Logo de Apache Cordova

En el caso de este proyecto, hemos hecho uso de Apache Cordova directamente para poder encapsular todo nuestro código, generando una aplicación híbrida. Básicamente, Apache Cordova permite construir aplicaciones para dispositivos móviles utilizando CSS3, HTML5, y JavaScript en vez de utilizar APIs específicas de cada plataforma como Android, iOS, o incluso Windows Phone. Permite encapsular CSS, HTML, y código de JavaScript

dependiendo de la plataforma del dispositivo. Además, extiende las características de HTML y JavaScript para trabajar con el dispositivo.

Que la aplicación sea híbrida significa que no es ni una aplicación móvil nativa (porque toda la representación gráfica se realiza a través de vistas Web del propio dispositivo en vez del framework nativo) ni puramente basadas en web (porque no son solo aplicaciones web, sino que están empaquetadas como aplicaciones para su distribución y tienen acceso a las APIs nativas del dispositivo). A continuación, se muestra una tabla que recoge con claridad qué servicios son accesibles por medio de Apache Cordova dependiendo del sistema operativo que posea el dispositivo móvil, desde el cual se ejecutará la aplicación:

| | iPhone / iPhone 3G | iPhone 3GS and newer | Android | Blackberry OS 5.x | Blackberry OS 6.0+ | WebOS | Windows Phone 7 | Symbian | Bada |
|--------------------------|--------------------|----------------------|---------|-------------------|--------------------|-------|-----------------|---------|------|
| Accelerometer | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Camera | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Compass | X | ✓ | ✓ | X | X | ✓ | ✓ | X | ✓ |
| Contacts | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | ✓ | ✓ | ✓ |
| File | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X | ✓ | X | X |
| Geolocation | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Media | ✓ | ✓ | ✓ | X | X | X | ✓ | X | X |
| Network | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Notification (Alert) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Notification (Sound) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Notification (Vibration) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Storage | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | X |

Tabla 1 – Versatilidad de Apache Cordova. Servicios vs Sistema Operativo. Fuente: Apache Cordova Web

Como se puede observar, Apache Cordova es un framework extremadamente versátil, con el que se puede hacer uso de la mayoría de servicios del dispositivo móvil independientemente del sistema operativo que dicho dispositivo esté utilizando.

En el caso de la aplicación desarrollada, se tiene acceso a uno de los servicios nativos del propio dispositivo: el servicio de Bluetooth. Mediante las APIs nativas correspondientes al Bluetooth del móvil que se vaya a utilizar para realizar la rehabilitación, se ha podido gestionar la comunicación con el sensor de Texas Instruments, no solo la conexión y desconexión del sensor con el dispositivo móvil, sino también el envío y recepción de toda la información relativa al movimiento que está realizando el paciente. Más adelante se explicará en detalle cómo tiene lugar dicha conexión entre el sensor y el dispositivo móvil, además de los distintos casos de uso de la aplicación y las fases en las que la aplicación interactúa con el bluetooth del dispositivo, por medio de la API nativa correspondiente.

2.5 JSON

Una de las funcionalidades que tiene la primera versión de la aplicación, además de las principales que fueron comentadas en los objetivos del proyecto al comienzo de la memoria, es la funcionalidad de que el paciente pueda guardar todos los ejercicios que formen parte de la rutina de rehabilitación que su médico rehabilitador, traumatólogo o fisioterapeuta haya establecido dentro de su tratamiento. De esta forma no necesitará estar constantemente recordando cuáles son esos ejercicios que forman parte de esa rutina, y lo que es más importante, poder seleccionarlos para realizarlos de la manera en que fueron establecidos en un primer momento por parte del especialista. Para realizar dicho almacenamiento se ha utilizado la tecnología JSON.

Por el hecho de que la aplicación se desarrolla sobre una base similar a la que se emplearía en el desarrollo de una de aplicación web, debido al uso de HTML y JavaScript, y lo que hemos comentado en el apartado anterior relativo a cómo son las aplicaciones híbridas, JSON es la mejor opción en este caso.

JSON (Javascript Object Notation) es un formato para el intercambio de datos. JSON describe los datos con una sintaxis dedicada que se usa para identificar y gestionar dichos

datos. Nació como una alternativa a XML, y esto unido al fácil uso que se puede hacer de él a través de JavaScript, ha hecho que haya aparecido un gran número de seguidores de esta alternativa [9].

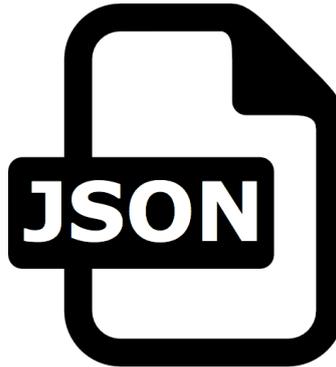


Ilustración 8 – JSON

Una de las mayores ventajas que tiene el uso de JSON es que puede ser leído por cualquier lenguaje de programación. Por lo tanto, puede ser usado para el intercambio de información entre distintas tecnologías. Esta es la principal razón por la que se decidió, en el momento de comenzar a implementar la parte del almacenado de ejercicios, utilizar JSON como formato para dicho almacenado de toda la información relativa a cada movimiento perteneciente al programa de rehabilitación del paciente. Además, pensando en aquel momento en futuras versiones de la aplicación, en las cuales ésta estará conectada a una plataforma cloud para almacenar ahí toda la información en lugar de que esté esa información en el dispositivo de manera local, JSON era la mejor opción y lo sigue siendo, ya que reduce considerablemente el tráfico a través de la comunicación con dicha plataforma cloud vía Internet (HTTP).

Los tipos de datos disponibles en este formato son los siguientes: números, cadena de caracteres, booleanos, null (para representar el valor nulo), vectores (permitiendo crear lista ordenadas de cero o más variables, las cuales pueden ser de cualquier tipo) y por último objetos. En el caso de los objetos, es importante mencionar que son colecciones no ordenadas de pares de la forma ‘nombre’ – ‘valor’, teniendo que ser el nombre una cadena de caracteres.

DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Más adelante, cuando definamos a fondo el trabajo realizado, comentaremos cuáles han sido los tipos de datos utilizados para definir un ejercicio.

Como puede observarse, el número de posibilidades es muy extenso y, teniendo en cuenta los objetivos y los pilares sobre los que se fundamenta la aplicación, podemos decir que JSON encaja a la perfección como formato para almacenar toda la información que se requiere.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Una de las principales razones por las que surge este proyecto es la falta de una pieza clave que debería jugar un papel fundamental de cara a los pacientes que están dentro de procesos de rehabilitación física.

Los pacientes no tienen ninguna manera de saber si el ejercicio que están realizando, como parte de la rutina de ejercicios propuestos por su especialista, lo están llevando a cabo correctamente o no, a menos que el médico rehabilitador o su fisioterapeuta estén presentes de manera constante en todos los movimientos que comprenden la rehabilitación de sus pacientes. Esto, además de no ser posible, ya que los especialistas no pueden llevar a cabo un control tan exhaustivo y preciso de todos y cada uno de los ejercicios que tienen que realizar sus pacientes a lo largo del período de tiempo que duran sendos procesos de rehabilitación, limita completamente la autonomía del paciente y además reduce la eficacia de la rehabilitación. Se dice que la eficacia de la rehabilitación se ve afectada negativamente, ya que cuando no se está realizando bien un ejercicio, no solo no se avanza en la mejora de la extremidad tratada, sino que además esto podría dar lugar a la generación de nuevas lesiones colaterales. Es cierto que, en las primeras fases de la rehabilitación física de un paciente, los especialistas llevan a cabo un control muy preciso de todo el proceso y de sus movimientos, pero una vez que se avanza por las siguientes etapas de la rehabilitación, esta aplicación marca un punto de inflexión de cara a generar una gran seguridad, tanto en el paciente como en el especialista, de que la rehabilitación está siendo efectiva y se están cumpliendo todas las pautas establecidas.

Por lo tanto, este proyecto surge con el objetivo de cubrir una necesidad muy concreta que se presenta en el día a día de dichos pacientes que se ven en la necesidad de tratarse de alguna dolencia o discapacidad, permitiéndoles así recibir por medio de la aplicación móvil retroalimentación detallada y en directo del ejercicio que están realizando. Así, en el caso en el que no se esté haciendo bien un ejercicio, se sabrá de manera inmediata a través de la

pantalla del dispositivo móvil, y por lo tanto, se podrán realizar las modificaciones correspondientes para hacerlo tal y como lo ha establecido el especialista en la consulta médica.

En este capítulo se va a llevar a cabo un estudio detallado del escaso mercado actual que existe en cuanto a tecnologías aplicadas a la rehabilitación física y, se puede afirmar que ninguna de ellas realiza el acercamiento al problema planteado tal y como lo hace la tecnología desarrollada en este proyecto.

3.2 TECNOLOGÍAS PARA REHABILITACIÓN FÍSICA

Cuando se dice que esta aplicación será revolucionaria dentro del mundo de la rehabilitación física, principalmente toda aquella rehabilitación basada en ejercicios terapéuticos, no quiere decir que se vaya a sustituir ninguna de las herramientas existentes ni ninguna de las tecnologías que ya se emplean en este mundo, sino que surge como complemento vital a todas ellas con el principal objetivo de mejorar la autonomía de los pacientes y hacer que su rehabilitación sea lo más eficaz posible, además de aportar una gran ventaja competitiva a los especialistas del mundo de la rehabilitación al poder controlar mejor a cada uno de los pacientes que tratan y llevar a cabo un mejor seguimiento de los mismos.

3.2.1 BIOMECHSOLUTIONS

Una de las empresas españolas especializada en el mundo de la rehabilitación física es biomechSOLUTIONS [10]. Es una compañía líder en el sector, la cual cuenta con una enorme experiencia en el desarrollo de sistemas orientados a aplicaciones biomecánicas. Ofrecen una serie de productos basados en la captura de movimientos, tanto unidades ópticas como inerciales, herramientas para realizar mapas de presión y cámaras térmicas con aplicación dentro del mundo de la medicina del deporte, entre otras.



biomech**SOLUTIONS**
your reference partner

Ilustración 9 – Logo de biomechSOLUTIONS

Centrando el foco de estudio en los productos que ofrecen de interés para rehabilitación se pueden encontrar los siguientes:

- Análisis del movimiento basado en tecnología inercial
- Análisis del movimiento basado en tecnología óptica
- Sistemas de rehabilitación y entrenamiento de la marcha y equilibrio
- Tapices rodantes instrumentados
- Plataformas de fuerza
- Herramientas para análisis termográficos
- Sensores biomecánicos

La última solución mencionada, los sensores biomecánicos, puede decirse que es la solución que más se aproxima al proyecto planteado, pero las diferencias son notables. Según biomechSOLUTIONS, “En el ámbito biomecánico, es un aspecto crítico la realización de múltiples medidas en un mismo estudio bajo una misma base de tiempos, es decir, de forma sincronizada. [11]”. Teniendo esto en cuenta, mediante diferentes sensores biomecánicos, lo que ofrecen es una herramienta que permite monitorizar variables físicas tales como aceleración, inclinación, posición y fuerza, registrando esas variables en un ordenador para su posterior análisis y generación de informes. Es en esto donde radica la principal diferencia con el proyecto que se presenta en este trabajo.

Mientras que, una vez recogidos los datos por sus sensores, es necesario guardarlos en un ordenador y después se realiza el estudio correspondiente de los mismos, con la aplicación presentada en este proyecto no es necesario ningún ordenador donde registrar la información relativa al movimiento, sino que todo gira en torno al dispositivo móvil del paciente.

Es cierto que en esta aplicación también se almacena toda la información recogida por el sensor en el dispositivo móvil, pero la principal ventaja es que el análisis que se realiza de esos datos recogidos se hace en tiempo real, visualizando en la pantalla del dispositivo toda la información relativa al movimiento, tal y como se ha explicado en la introducción de este capítulo. Más adelante, se explicará en detalle cuáles son las estadísticas y la información que se obtiene y se visualiza en el móvil del paciente.

Además, otra gran diferencia entre los sensores que emplean en biomechSOLUTIONS frente al sensor que se emplea en este proyecto es que utiliza la mencionada tecnología Bluetooth Low Energy, la cual permite conectarse con cualquier dispositivo móvil, mientras que empleando los sensores de biomechSOLUTIONS es necesario hacer uso de toda su tecnología propia para la recepción y el análisis de los datos.

3.2.2 TYROMOTION

Tyromotion es una empresa austriaca, especializada en proveer dispositivos robóticos y de ayuda terapéutica en el área de la neuro-rehabilitación. La gama de productos que ofrecen está centrada en la rehabilitación del tren superior del cuerpo del paciente, especialmente rehabilitación de manos y de brazos.



Ilustración 10 – Logo de tyromotion

Esta compañía austriaca cuenta con diferentes máquinas que permiten llevar a cabo la rehabilitación de brazos y manos, tal y como se ha mencionado. Pero la diferencia fundamental de tyromotion frente a biomechSOLUTIONS, es que ya ha centrado el foco de

atención en intentar ofrecer soluciones a los pacientes empleando aplicaciones móviles. En concreto han desarrollado una aplicación móvil que permite realizar una serie de ejercicios con los dedos, en forma de juegos interactivos, a través de un iPad.

Esto supone ya un gran avance para los pacientes que se encuentran en procesos de rehabilitación, ya que se hace uso de las nuevas tecnologías que están al alcance de un gran número de personas, como son los dispositivos móviles. El inconveniente principal es que se centra en un tipo de rehabilitación extremadamente concreto, como es la rehabilitación de los dedos de la mano. En cambio, el proyecto que se presenta en este trabajo permite un amplio abanico de movimientos de las extremidades, tanto del tren superior como del tren inferior, aumentando así el número de personas a las que puede ir dirigido. Tal y como se habló en la introducción, solo en España, el número de personas que se encuentran en procesos de rehabilitación es de 2,5 millones, siendo el gasto total en esta área de 52.799 millones de euros. Por lo tanto, existe un amplio mercado en el cual puede introducirse esta aplicación y mejorar así el proceso de rehabilitación de un amplio número de pacientes.

3.3 DISPOSITIVOS WEARABLES

Para poder hablar de dispositivos wearables que existen dentro del ámbito de estudio es necesario realizar un acercamiento más general al ámbito de la salud, no centrándose únicamente en el área de la rehabilitación física, ya que la oferta que hay es nula en cuanto a dispositivos wearables como tal dedicados a la rehabilitación de pacientes.

Según ABI Research, se estima que en 2018 se harán 485 millones de envíos anuales de este tipo de accesorios [12]. El 60 % de los dispositivos wearables que se vendieron en el año 2016 pertenecían a la categoría de fitness o salud. Son aparatos que miden las constantes vitales, monitorizan el sueño, avisan de la medicación, calculan las calorías consumidas en el ejercicio, entre otras funcionalidades.

Estudiando, por lo tanto, el ámbito de la salud desde un punto de vista más genérico, existen distintos dispositivos wearables para el mundo del fitness, de los cuales se habla a continuación más en detalle. Se trata de monitores fitness que sirven como complemento al entrenamiento que puede llevar a cabo cualquier persona en un gimnasio o al aire libre. Los más destacados son los siguientes.

3.3.1 BEAST

Se trata de un pequeño sensor de un tamaño semejante al de un reloj de pulsera que nos colocamos en el antebrazo para poder cuantificar entrenamientos en peso libre. En los ejercicios para los que se necesitan barras o mancuernas el sensor se coloca en el antebrazo a través de una muñequera, mientras que en los ejercicios con el peso corporal del usuario (como dominadas o flexiones) se debe colocar en la zona de la espalda a través de un chaleco especialmente diseñado para ello. El precio en el cual se vende este producto actualmente en el mercado es de 250€. A ese precio habría que añadirle el de los accesorios que están también a disposición del usuario.

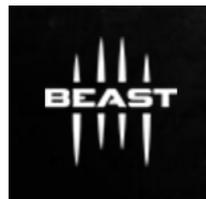


Ilustración 11 – Logo de Beast

Se trata de una solución muy bien estructurada y planteada, la cual hace uso de sensores como pueden ser un acelerómetro o un giroscopio al igual que en el caso de nuestra aplicación, pero como ocurre con la aplicación de tyromotion que se ha mencionado anteriormente, es un producto enfocado a un ámbito muy concreto con un área de aplicación muy pequeño y el cual no tiene relación con la rehabilitación física.

3.3.2 ATLAS WRISTBAND

Desarrollado por la marca Atlas Wearables, esta pulsera fitness monitoriza el movimiento que se está realizando y cuenta el número de repeticiones realizadas durante el mismo, para calcular después el número de calorías que se han quemado.



Ilustración 12 – Logo de Atlas Wearables

Debido a que está enfocado para deportistas, además cuenta con un sensor de ritmo cardíaco con el que monitoriza el pulso, y es sumergible hasta 30 metros. El precio de este producto actualmente en el mercado es de 200€.

Estos dos dispositivos wearables son dos de los que más éxito tienen a día de hoy en el mercado. Se puede observar cómo, además de ser opciones de un precio elevado no cubren la necesidad que se plantea por medio de este proyecto para pacientes que necesitan atravesar procesos de rehabilitación física.

Se ha visto la necesidad de comentar cuáles son las soluciones que existen actualmente en el mercado en cuanto a dispositivos wearables debido a que, el sensor que empleamos como medio para recoger toda la información relativa al movimiento del paciente, se coloca en la extremidad a tratar en forma de dispositivo wearable, como los que ya existen en el mercado.

Esto es una gran ventaja, ya que como se ha visto, la sociedad comienza a estar muy familiarizada con estos dispositivos, permitiendo así una gran facilidad de manejo del sensor elegido en este proyecto, ya que para el paciente no será un sensor como tal, sino que será un dispositivo wearable como cualquier otro, ante el cual ya hay una gran familiarización previa gracias a los dispositivos wearables mencionados. También es importante mencionar que todos ellos se encuentran a la venta en el mercado a precios elevados, lo cual implica

que no cualquier persona pueda ser capaz de asumir el coste de un monitor wearable de ese tipo. Uno de los principales factores que hacen que la tecnología presentada en este proyecto sea muy atractiva es su reducido coste en comparación con los productos que ya existen, aunque su fin sea muy distinto al que se busca con esta aplicación debido a su enfoque para la rehabilitación física.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Tal y como se habló en la introducción de este trabajo, existen en la actualidad millones de personas en el mundo que se encuentran atravesando procesos de rehabilitación debido a lesiones de distintos tipos, haciendo que éstas o los gobiernos de sus países, tengan que dedicar grandes cantidades de dinero o presupuestos al ámbito de la rehabilitación médica.

Si la rehabilitación no es eficaz al cien por ciento, las consecuencias son claras: se producirá un mayor gasto debido a que los períodos de rehabilitación aumentarán hasta conseguirse los objetivos buscados por parte de los especialistas, y además se corre el riesgo de que se produzcan otras lesiones debidas a la incorrecta realización de los movimientos especificados en el programa de rehabilitación.

Como seguramente ha podido concluir ya el lector una vez se ha llegado a este punto del trabajo, este proyecto tiene como principal fin dotar a los especialistas del mundo de la rehabilitación y a sus pacientes de una herramienta más, la cual permitirá marcar la diferencia en los procesos de rehabilitación, teniendo en cuenta uno de los factores clave que justifican este proyecto: no existe en la actualidad ninguna herramienta en el mercado que permita cumplir con los objetivos que se plantean en el siguiente apartado.

No se busca en ningún caso sustituir ninguna de las herramientas que ya existen en la actualidad dentro del ámbito de la rehabilitación física, sino que se pretende sumar una más, la cual, trabajando conjuntamente con las existentes, permita mejorar los resultados de la rehabilitación de los pacientes, reduciendo así el tiempo de obtención de los resultados óptimos en cuanto a la curación de esas lesiones, así como hacer que, tanto el paciente como su especialista, tengan un control total sobre la rehabilitación que se está haciendo, recibiendo retroalimentación en directo de cada movimiento que realiza el paciente. Esto

permite tomar medidas correctoras al especialista, realizando los ajustes que se consideren oportunos, a lo largo del período de la rehabilitación.

4.2 OBJETIVOS

A continuación, se detallan los objetivos que se persiguen con este proyecto, para posteriormente poder entender con claridad el sistema desarrollado y la implementación que se ha realizado del mismo.

4.2.1 AUMENTO DE LA AUTONOMÍA DEL PACIENTE

Desde el momento en el que alguien tiene una lesión que le obliga a comenzar un proceso de rehabilitación física, comienza una etapa complicada, en la que el paciente va a verse en la necesidad de dedicar mucho tiempo a la mejora de la movilidad de dicha extremidad para que, una vez haya terminado el período de la mencionada rehabilitación, los resultados sean los mejores posibles.

Esos resultados óptimos son establecidos por el especialista en función de una serie de parámetros médicos, como pueden ser el tipo de lesión, la edad y el estado de salud del paciente o la zona afectada de la extremidad, entre otros.

Una vez se ha establecido el objetivo de la rehabilitación prescrita por el especialista, da comienzo la fase de rehabilitación de la extremidad afectada. Una vez más, en función del tipo de lesión, dicha rehabilitación tendrá lugar en el hospital, en una clínica especializada para llevar a cabo esa rehabilitación o incluso en el domicilio del paciente. En este último caso, el control que puede llevarse actualmente de dicha rehabilitación es prácticamente inexistente. Únicamente, mediante las revisiones periódicas a las que asiste el paciente a la consulta de su médico, éste último puede extraer conclusiones acerca de cómo está teniendo lugar esa rehabilitación.

Mediante esta aplicación, el paciente podrá saber en todo momento si está haciendo bien o no el movimiento que estableció su especialista en un primer momento, así como la evolución que está teniendo dentro del proceso completo de rehabilitación.

4.2.2 MAYOR CONTROL POR PARTE DEL ESPECIALISTA

El empleo de esta nueva tecnología, además de dotar al paciente de un nivel de conciencia mayor de los movimientos que realiza, permitirá al médico rehabilitador o al fisioterapeuta saber también si el paciente está llevando a cabo correctamente la rehabilitación que le ha prescrito, y como se ha mencionado previamente, poder tomar medidas correctoras en cuanto a esa rehabilitación, tanto cambiando los movimientos que deben realizarse o ayudar al paciente a llevarlos a cabo de la manera adecuada, evitando lesiones colaterales.

En el capítulo 7, se hablará de una serie de ideas que podrían implementarse en este sentido y que dotaría incluso de un nivel de control mayor al especialista en este ámbito de cara a futuras versiones de la aplicación. Como podrá entenderse, este proyecto se enmarca dentro del ámbito académico, formando parte de un trabajo final de grado, al cual se le dedican unos meses de trabajo y por lo tanto no es posible abarcar todas y cada una de las ramas que podrían derivarse de este proyecto.

4.2.3 MEJORA DE LA EFICACIA DE LA REHABILITACIÓN

Es importante mencionar lo siguiente. El período de rehabilitación al que se somete un paciente varía en función de los factores que ya han sido mencionados en anteriores apartados, pero existe un período óptimo en el que puede realizarse toda la rehabilitación prescrita por el especialista obteniendo los mejores resultados en cuanto a la mejora de la extremidad tratada.

Por medio del empleo de esta aplicación en un período de rehabilitación, se pretende mejorar la eficacia del proceso de rehabilitación en sí, ya que cuanto mayor sea la precisión con que

se lleven a cabo, día a día, los ejercicios propuestos por el especialista, mejores resultados se obtendrán y se conseguirá reducir el tiempo de tratamiento.

4.3 METODOLOGÍA Y PLANIFICACIÓN

El desarrollo del proyecto ha atravesado diferentes fases desde que se comenzó en el mes de diciembre de 2016 hasta la presentación final del mismo.

Durante la primera etapa del proyecto, el principal objetivo fue conocer en detalle el sensor que se iba a utilizar para captar toda la información del movimiento concreto realizado por el paciente desde el punto de vista de un usuario. Haciendo uso de toda la documentación proporcionada por Texas Instruments acerca del sensor esta fase no se prolongó en el tiempo, permitiendo así comenzar en el mes de enero a desarrollar la aplicación como tal [13].

Lo primero que se realizó fue diseñar una única ventana para la aplicación, la cual formase parte de un entorno de desarrollo propio, por medio la cual pudiésemos empezar a visualizar los datos recibidos por el sensor. Antes de ello, fue necesario entender cómo envía el sensor la información al dispositivo móvil y cómo se debía gestionar la conexión al sensor desde un dispositivo bluetooth.

Durante las siguientes semanas se estudió la manera en la que debían tratarse dichos datos para poder interpretarlos en forma de ángulos (información enviada por parte del acelerómetro) y velocidades de rotación (información enviada por parte del giroscopio). Esto no es una tarea sencilla, ya que el sensor lo que envía es una cadena de bits al dispositivo móvil, y hay que procesar esa cadena para extraer la información necesaria. Además de esto, es muy importante calibrar los sensores, es decir, establecer una base sobre la que fundamentar todos los valores leídos por el dispositivo que envían los sensores. Esta parte se explica en detalle en el siguiente capítulo.

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

Una vez obtenidos los valores de ángulos de giro del sensor en grados, y los valores de velocidad de giro del sensor en metros por segundo, se encontró el siguiente problema. Si se observaban los ángulos de giro del sensor dentro de los cuatro cuadrantes típicos matemáticamente hablando (en sentido anti horario), se vió que, para los ángulos del primer cuadrante, los valores obtenidos eran correctos (de 0° a 90°), sin embargo, al girar el sensor haciendo coincidir el ángulo de giro con ángulos de otros cuadrantes se obtenían los siguientes valores:

| <i>Cuadrante</i> | <i>Rango de ángulos visualizado (grados)</i> |
|------------------|--|
| <i>Primero</i> | [0, 90] |
| <i>Segundo</i> | (90, 0] |
| <i>Tercero</i> | (0, -90] |
| <i>Cuarto</i> | (-90, 0] |

Tabla 2 – Rangos de ángulos leídos en función del cuadrante sobre el que gira el sensor, al comienzo del proyecto

En este momento se tuvo que trabajar en un algoritmo que fuese capaz de traducir esos ángulos “erróneos” que se recibían del sensor a ángulos que permitieran ver una vuelta completa de giro del sensor dentro de valores de los ángulos entre 0° y 360°. Una vez realizada esta modificación los ángulos se visualizaban de la siguiente forma:

| <i>Cuadrante</i> | <i>Rango de ángulos visualizado (grados)</i> |
|------------------|--|
| <i>Primero</i> | [0, 90] |
| <i>Segundo</i> | (90, 180] |
| <i>Tercero</i> | (180, 270] |
| <i>Cuarto</i> | (270, 360] |

Tabla 3 - Rangos de ángulos leídos en función del cuadrante sobre el que gira el sensor, después de implementar el algoritmo

Este cambio fue una modificación muy importante de cara al algoritmo que permite saber si se está realizando correctamente el movimiento o no.

Durante la siguiente etapa dentro del desarrollo del proyecto, se trabajó en la implementación de un algoritmo que es el núcleo de la aplicación que se presenta en este trabajo. Esto hace referencia a la lógica que se ha necesitado emplear para ser capaces de saber en todo momento la posición del sensor y, por consiguiente, saber si el movimiento que está realizando el paciente es correcto o no. Esto no es algo trivial, ya que hay una serie de factores muy importantes que permiten entender dicho movimiento y tener el control sobre el mismo. Uno de ellos es conocer el ángulo de giro completo, y el otro es, teniendo en cuenta que el sensor puede moverse libremente en el espacio, saber sobre qué eje se está produciendo dicho movimiento y en qué sentido.

Una vez entendido esto es posible dotar a la aplicación de su principal funcionalidad, que es ofrecer, tanto al paciente como al especialista, retroalimentación, clara e instantánea, acerca del movimiento que se está produciendo. Gracias a esto, a lo largo de la siguiente iteración sobre la lógica que corre detrás de la aplicación, se implementaron dos mejoras sobre ese algoritmo. Se comentan a continuación.

Una de ellas es la posibilidad de llevar la cuenta de las repeticiones de cada movimiento que el paciente lleva realizadas en cada instante. Esto supone un gran elemento de ayuda al control que se comentó previamente sobre el proceso de rehabilitación, de cara a ser conscientes en todo momento de lo que se está haciendo y, sobre todo, de cómo va la rehabilitación del paciente. Esto permite al médico rehabilitador o especialista establecer una serie de pautas a seguir en cada ejercicio, y definir con claridad cuántas repeticiones y cuántas series deben realizarse para cada uno de ellos.

La otra mejora, la cual supuso la generación de una nueva versión de la aplicación, fue la posibilidad de guardar ejercicios a nivel local en el dispositivo móvil del paciente. Esta es otra de las características que aportan un gran valor a la aplicación presentada. Tal y como se explicó en el capítulo dos, dedicado a las tecnologías que han sido empleadas para la consecución del proyecto, dichos ejercicios son guardados en el dispositivo haciendo uso de JSON y del almacenamiento local del dispositivo móvil.

Es cierto que en un comienzo la aplicación se pensó únicamente para visualizar el movimiento que se está haciendo y poder corregirlo en caso de no estar haciéndolo bien, pero es aún más atractiva la idea de poder tener varios ejercicios guardados a la vez en la aplicación y poder elegir de entre un listado ejercicios cuál es el que se va a realizar en ese momento.

Después de completar estas tareas, se trabajó en diseñar la aplicación móvil como tal, de manera que fuera sencilla de utilizar por parte del usuario, además de tener un estilo cuidado y adaptado a las necesidades del mismo. El resultado final de esta etapa puede verse en detalle en el siguiente capítulo, donde se presenta la aplicación y cómo ha sido todo su diseño e implementación.

Por último, se especifica la planificación seguida durante este proyecto. Por un lado, encontramos una tabla donde se muestra el desglose de tareas que se han ido realizando a lo largo de los meses que ha durado el proyecto, y por otro, se puede observar el cronograma relativo a las mencionadas tareas.

| Proyecto | Fecha inicio prevista | Días trabajados | Fecha final prevista | Situación | Días para el final |
|------------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------|--------------------|
| Conocer el sensor | 23-dic.-16 | 9 | 1-ene.-17 | Terminado | 160 |
| Entender BLE | 2-ene.-17 | 13 | 15-ene.-17 | Terminado | 159 |
| Familiarizarse con Apa | 16-ene.-17 | 6 | 1-feb.-17 | En curso | 138 |
| Análisis sensores | 2-feb.-17 | -11 | 10-feb.-17 | En curso | 129 |
| Primer prototipo | 11-feb.-17 | -20 | 28-feb.-17 | En curso | 116 |
| Análisis giroscopio | 1-mar.-17 | -38 | 20-mar.-17 | En curso | 85 |
| Análisis acelerómetro | 21-mar.-17 | -58 | 17-abr.-17 | En curso | 57 |
| Implementación algori | 18-abr.-17 | -86 | 18-may.-17 | En curso | 37 |
| Comienzo diseño inter | 19-may.-17 | -117 | 31-may.-17 | En curso | 19 |
| Estudio plataformas cl | 1-jun.-17 | -130 | 9-jun.-17 | En curso | 10 |

Tabla 4 – Desglose de tareas a realizar al comienzo del proyecto

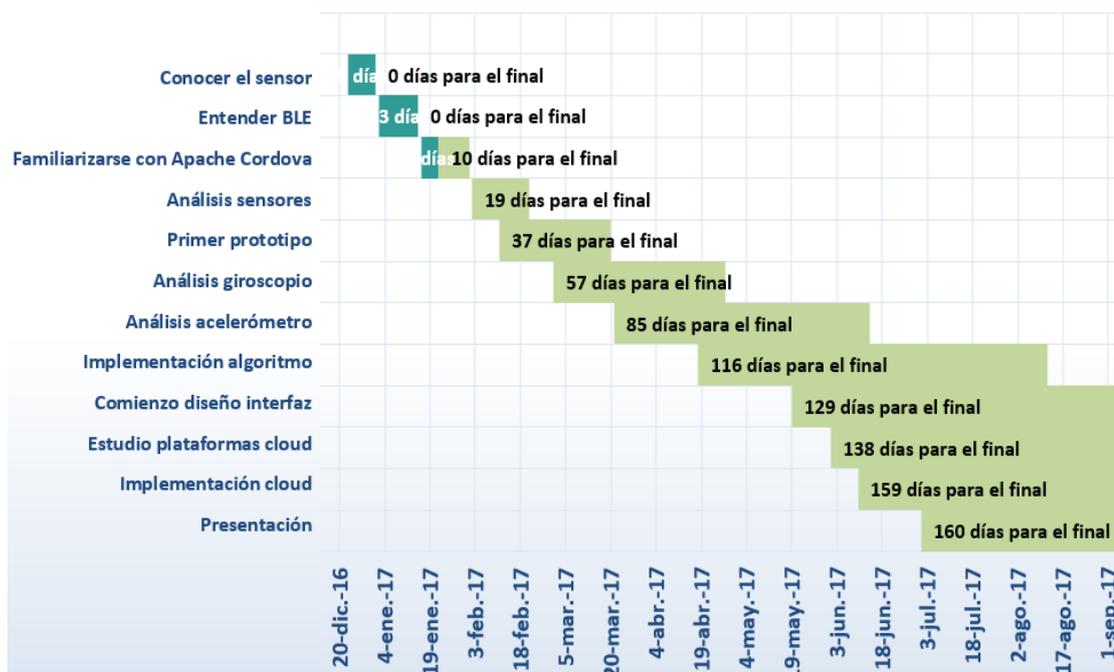


Ilustración 13 – Cronograma al comienzo del proyecto

4.4 ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Con este apartado lo que se pretende es ofrecer una visión amplia del proyecto en cuanto a costes de implementación del mismo, tanto en partes de hardware como en tiempo de desarrollo. Se expondrán cuáles son los costos más relevantes y qué recursos claves son los más costosos.

4.4.1 COSTES EN HARDWARE

Debido a la naturaleza de este proyecto, el cual se puede enmarcar dentro del ámbito de los proyectos de software, los costes a nivel de hardware no son muy elevados. El principal coste a nivel de hardware de la herramienta en sí es el coste que tiene el sensor empleado. El sensor bluetooth de Texas Instruments, modelo CC2650STK, tiene un coste de 29 \$, aproximadamente 27,6 €, habiéndose aplicado un tipo de cambio de 1EUR – 1,05 USD.

En cuanto al dispositivo móvil empleado para llevar a cabo la parte de testing de la aplicación, el empleado ha sido un Nexus 4, el cual tuvo un coste en su momento de 160 €. Se ha utilizado un único equipo de desarrollo modelo DELL XPS13, el cual tiene un coste de 1.000 €. Las características del mismo están recogidas a continuación en una tabla en la que se resumen los costes de hardware.

Es importante mencionar que no se tienen en cuenta en este desglose de gastos aquellos que tendrían que ver con una posterior implementación del sistema basándose en un entorno cloud, con servidores de bases de datos remotos, ni las correspondientes licencias de uso de dichas plataformas, como podrían ser Google Cloud Services o Amazon Cloud Platform. De esto se hablará más en detalle en el capítulo 7, dentro de la parte de ‘Trabajos futuros’.

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

| <i>Dispositivo de Hardware</i> | <i>Costo</i> | <i>Justificación</i> |
|--------------------------------|-------------------|--|
| <i>Equipo portátil</i> | 1.000 € | Intel Core i5, disco SSD 256GB, 8GB de RAM. |
| <i>Sensor CC2650STK</i> | 27,60 € | Sensor de la familia SensorTag de Texas Instruments. |
| <i>Google Nexus 4</i> | 160 € | Dispositivo móvil empleado para tareas de testing y simulaciones. |
| TOTAL | 1.187,60 € | |

Tabla 5 – Desglose de costes en Hardware

4.4.2 COSTES EN SOFTWARE - DESARROLLO

En cuanto los costes que se enmarcan dentro del ámbito del software, el gasto es el de las horas de trabajo de un desarrollador, teniendo en cuenta que se han dedicado un total de 320 horas al desarrollo del software (esto equivale a cuatro meses de trabajo dedicando 20 horas a la semana) a 50€ la hora de trabajo. A este gasto es necesario añadirle el coste del sueldo de un jefe de proyecto, al cual se le estiman 50 horas de trabajo dedicadas a este proyecto a un coste de 75 € la hora.

No ha sido necesario realizar ningún gasto en cuanto a licencias de algún tipo de software empleado para el desarrollo de la aplicación, gracias al empleo de software open source y tecnologías gratuitas, tal y como se expuso en el capítulo 2, a lo largo de la “Descripción de las tecnologías empleadas”. A continuación, se muestra el desglose correspondiente a los gastos que se han producido a lo largo de los meses que ha durado este proyecto.

DEFINICIÓN DEL TRABAJO

| <i>Concepto</i> | <i>Detalle</i> | <i>Costo</i> |
|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| <i>Desarrollador</i> | 320horas x 50€ | 16.000 € |
| <i>Jefe de proyecto</i> | 50horas x 75€ | 3.750 € |
| TOTAL | | 19.750 € |

Tabla 6 - Desglose de costes en Software y Desarrollo

Al igual que ocurre con los gastos en la parte de hardware, dentro del desglose de gastos en software se debe tener en cuenta que en el momento en el que este proyecto escalase, tal y como se explica en el capítulo 7, a estos gastos deberían ser añadidos aquellos en los que se incurre al publicar la aplicación en las correspondientes plataformas de distribución de aplicaciones móviles para los distintos sistemas operativos (en el caso de Android se estaría hablando de “Google Play Store”, y en el caso de iOS se estaría hablando de la “App Store”).

A la vista de los datos aportados anteriormente, se puede concluir que el coste total de este proyecto es de 20.937,60 €. Una ventaja clara, la cual permite que el coste del proyecto no sea excesivamente elevado, es el empleo de tecnologías cuyo coste individual es mínimo, o incluso nulo para el caso del software open source empleado.

Para el caso del sensor utilizado, es cierto que en el mercado existen otros tipos de sensores, a un precio mayor, pero el sensor que se ha empleado es más que suficiente para cubrir la casuística planteada y alcanzar los objetivos del proyecto.

Capítulo 5. SISTEMA DESARROLLADO

A lo largo de este capítulo se realiza una descripción del proyecto en detalle, especificando cómo se ha llevado a cabo el desarrollo de la parte software del mismo, toda la lógica que incorpora y el diseño que se ha realizado de la aplicación.

5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

Tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, la principal funcionalidad que ofrece esta aplicación, tanto al paciente como al conjunto de médicos involucrados en su rehabilitación, es la posibilidad de visualizar de manera constante cómo se está ejecutando un movimiento en concreto. En el caso de que no se esté haciendo correctamente dicho movimiento, la aplicación le mostrará al paciente, a través de la pantalla del dispositivo móvil, una advertencia en la cual se indica que debe realizar modificaciones en la ejecución del movimiento para poder corregirlo. El esquema del sistema desarrollado es el siguiente:

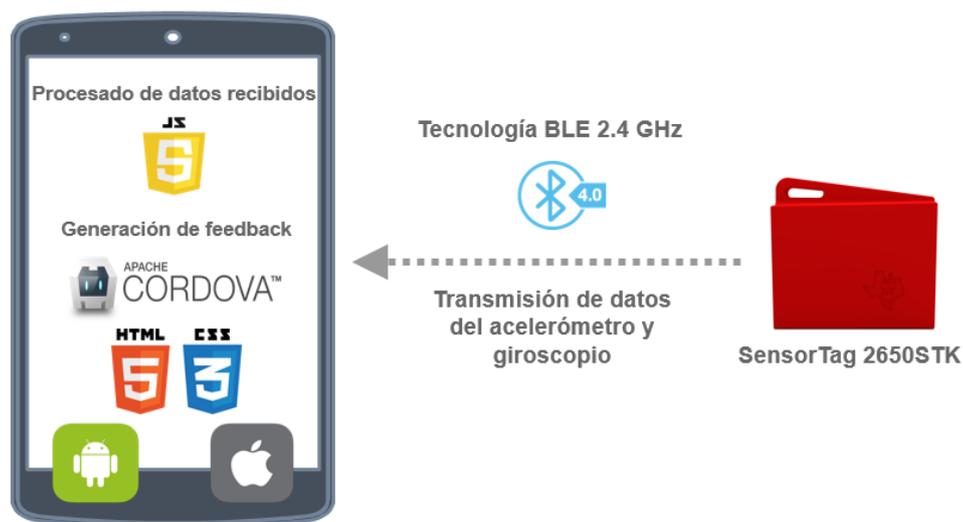


Ilustración 14 – Esquema del sistema desarrollado

Una vez entendido esto, se da comienzo a definir el uso de la aplicación, y toda la lógica que hay detrás de ella.

5.1.1 CASOS DE USO

A continuación, se muestran los diagramas de caso de uso, tanto de la aplicación como de un usuario de la misma. En ellos se muestran por un lado la descripción de los pasos que un paciente, o cualquiera de sus médicos, puede realizar mediante la aplicación para llevar a cabo su rehabilitación, y por otro lado la funcionalidad implementada para la aplicación móvil.

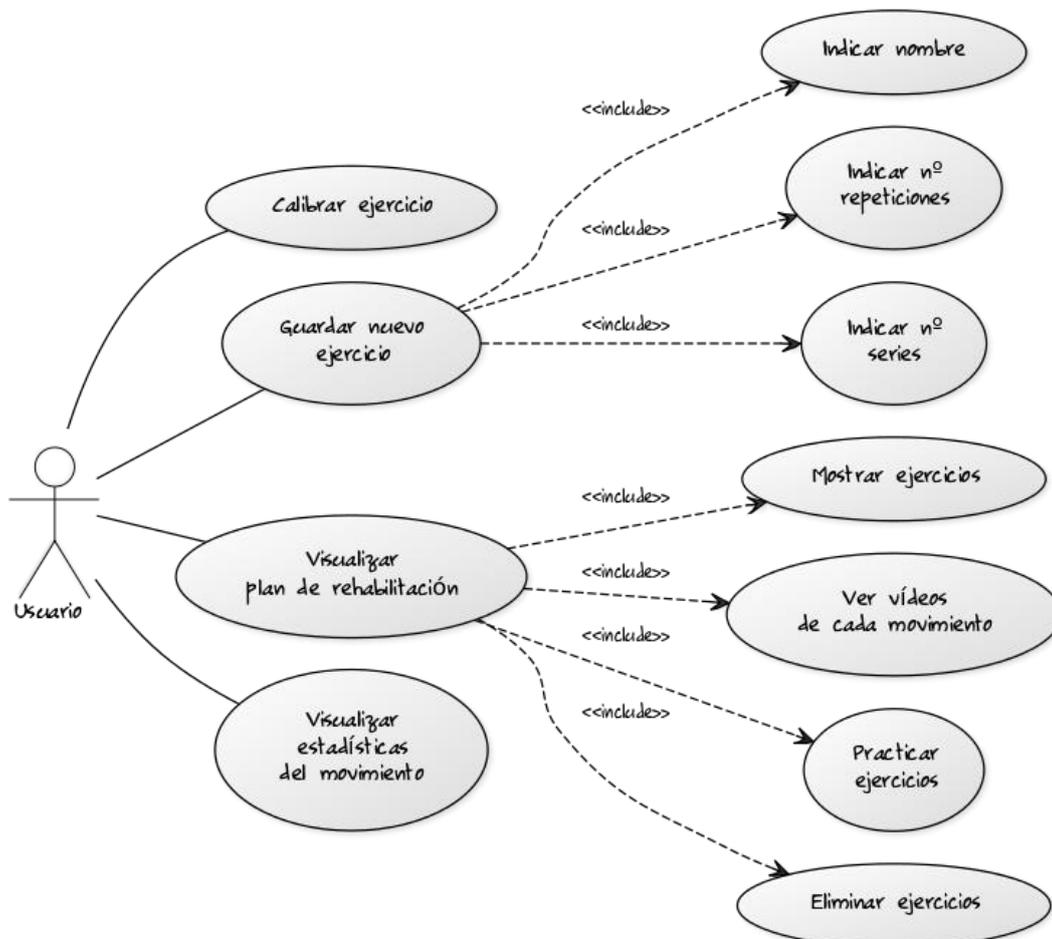


Ilustración 15 – Caso de uso de un usuario

A continuación, se muestra el correspondiente diagrama de caso de uso de la aplicación, representando las funcionalidades que implementa.

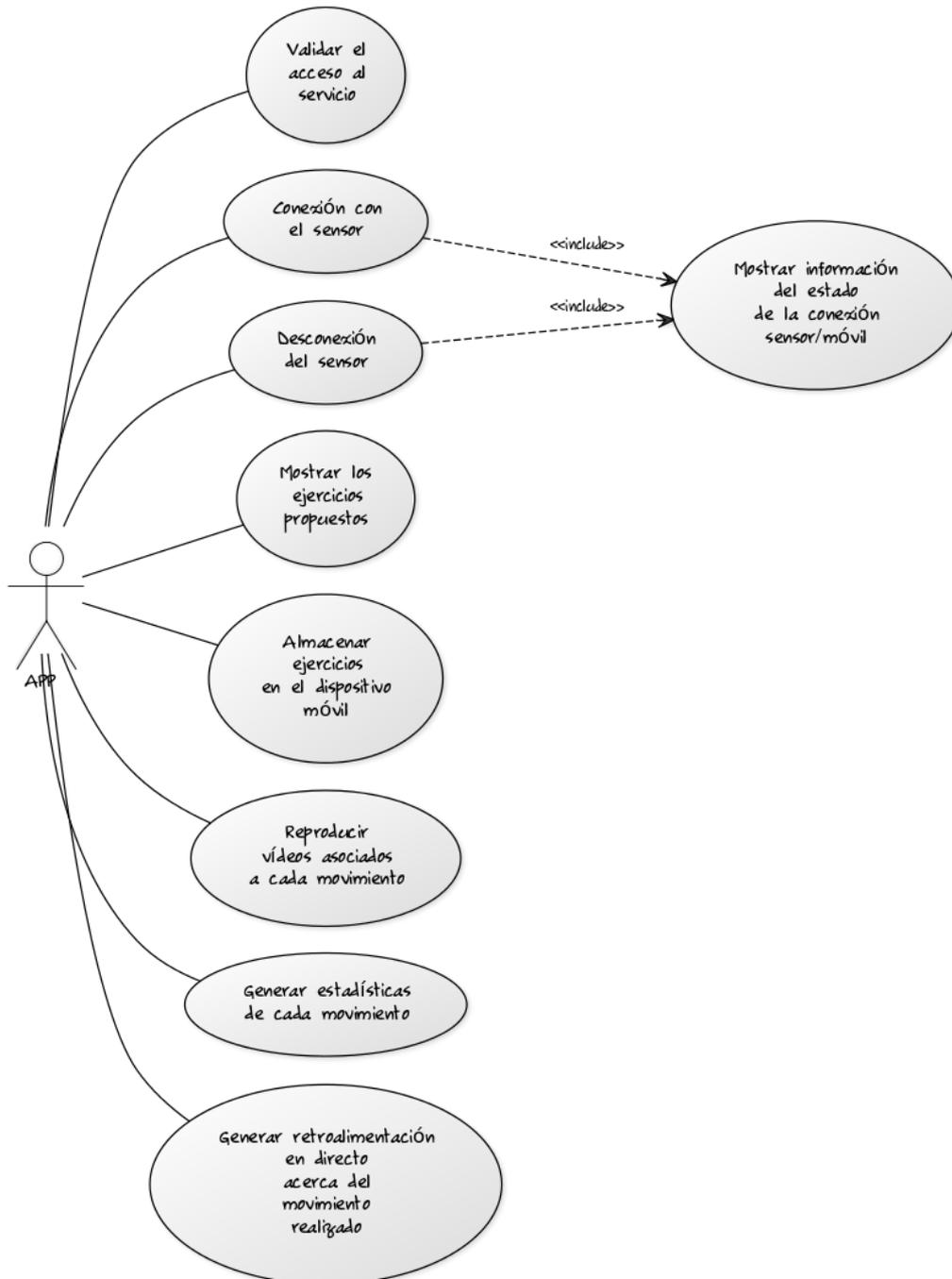


Ilustración 16 – Caso de uso de la aplicación móvil

5.1.2 DIAGRAMA DE FLUJO

Para un correcto entendimiento de la funcionalidad que se ha cubierto en el desarrollo de este proyecto, además de los casos de uso mostrados en el apartado anterior, se muestra aquí un diagrama de flujo de la aplicación. Mediante este diagrama se representa gráficamente el algoritmo del proyecto en su conjunto.

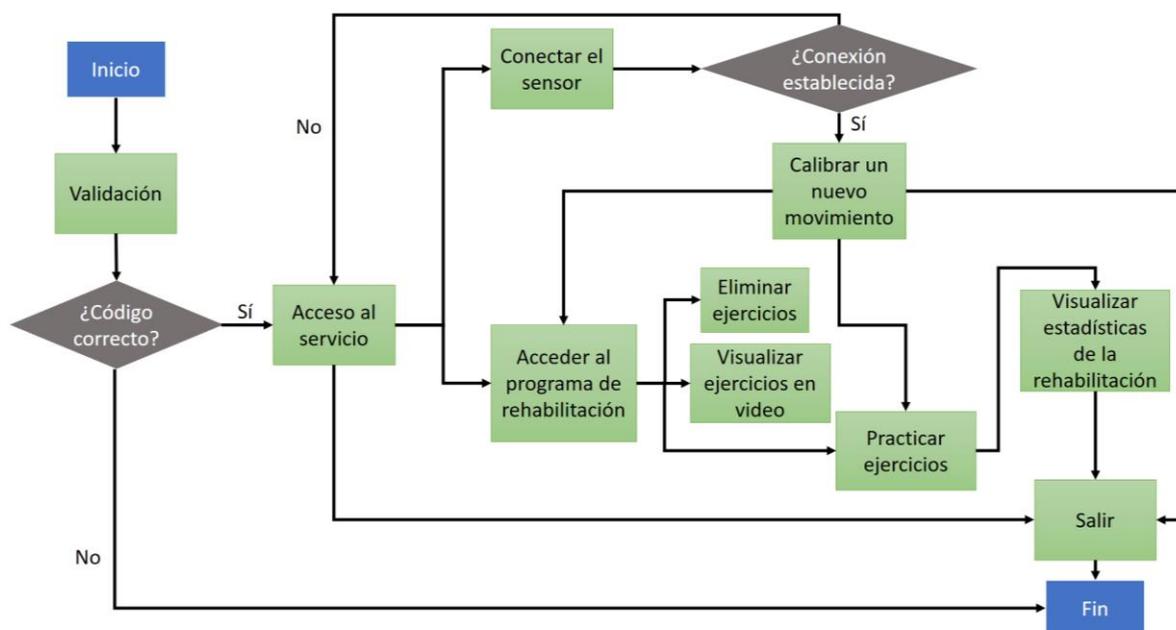


Ilustración 17 – Diagrama de flujo del sistema desarrollado

5.1.3 FASES

Es importante, llegado a este punto, realizar un comentario acerca de cómo utiliza un paciente la aplicación. Se distinguen dos fases en el uso de la aplicación a la hora de crear un ejercicio. Esta distinción se debe a que, como el movimiento del sensor es completamente libre, es necesario ubicarlo en el espacio para poder procesar correctamente la información

de los sensores más adelante. Esto permite saber en qué posición está el sensor y cuál es el movimiento en concreto que va a llevarse a cabo por parte del paciente.

Es por ello por lo que debe haber una fase previa a la realización del ejercicio, la cual se ha denominado ‘Calibración del Ejercicio’. Por lo tanto, al comienzo está la mencionada fase de ‘Calibración del ejercicio’, y después la de ‘Realización del ejercicio’. Se describen ambas fases en el siguiente apartado.

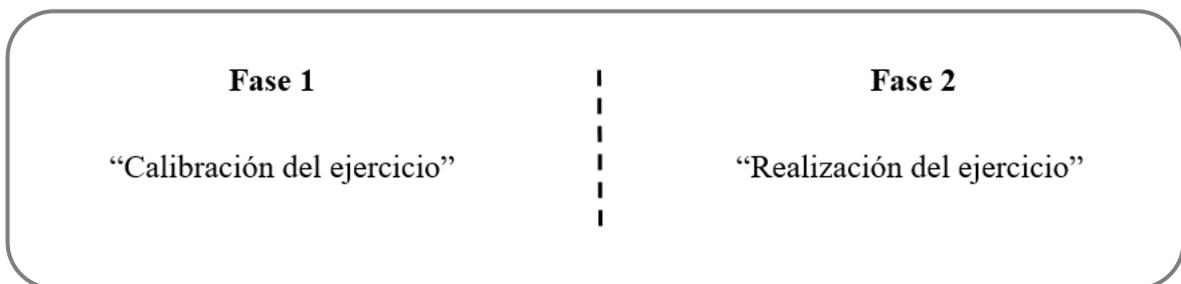


Ilustración 18 – Fases a lo largo del uso de la aplicación

5.1.3.1 Calibración del ejercicio

Esta es la fase más importante por la que se atraviesa dentro de un uso normal de la aplicación. Es importante que esta fase se realice bajo la supervisión del especialista que está tratando al paciente, para que el procesado de datos que tiene lugar a lo largo de la siguiente fase sea correcto.

Es la que permite a la aplicación recopilar toda la información relevante acerca del movimiento que se está llevando a cabo para después, a lo largo de la segunda fase, poder proporcionarle al paciente una correcta retroalimentación en directo del movimiento que está realizando.

A lo largo de toda esta fase lo que ocurre es que el sensor envía al dispositivo móvil cada, 100 milisegundos, los valores del giroscopio y del acelerómetro. Por lo tanto, al finalizar esta etapa, lo que se tiene en el dispositivo son dos listas de valores: una lista con los valores

del acelerómetro y otra con los valores del giroscopio. Es en este momento donde da comienzo la segunda fase, la de ‘Realización del ejercicio’.

5.1.3.2 Realización del ejercicio

Es necesario tener en cuenta que esta segunda fase comienza, automáticamente, justo después de terminar la fase anterior. Aquí es donde se procesa toda la información relativa al movimiento que ha sido calibrado, para así saber en qué momentos el paciente está haciendo bien el movimiento y en cuáles no.

Lo primero que se hace es analizar los valores almacenados recibidos del acelerómetro. Éstos son valores que han sido procesados a medida que se iban recibiendo en el dispositivo móvil, los cuales se han transformado a ángulos expresados en grados. Son los ángulos de giro por los que ha ido pasando el sensor a lo largo de todo el movimiento realizado por el paciente.

El procesado que se realiza de estos valores, por medio del algoritmo desarrollado en esta parte, consiste en establecer primeramente por qué eje (en términos de movimiento en el espacio) ha sido realizado el movimiento. De esta forma, se consigue saber si el paciente está llevando a cabo alguna desviación del movimiento respecto del ejercicio que fue calibrado en su momento al comienzo. Es por eso por lo que se mencionó en el apartado anterior la importancia que tiene la fase de ‘Calibración del ejercicio’, ya que, si no se llevase a cabo correctamente, las conclusiones que se obtendrían en la segunda fase no tendrían ninguna validez, haciendo que la retroalimentación ofrecida al paciente y a su especialista no fuese la adecuada. Además, se establecen los rangos de valores mínimos y máximos en cuanto a los ángulos y a las velocidades que ha llevado el sensor a lo largo del movimiento.

En cuanto a las velocidades hacemos lo mismo que en el caso del acelerómetro. Una vez que han sido traducidos los valores recibidos desde el sensor a unidades de metros por segundo, ya podemos analizar el vector correspondiente que contiene dichos valores. Cabe mencionar que esa traducción de unidades también se hace en tiempo real según van llegando los valores del giroscopio al dispositivo móvil.

A continuación, se muestra el código en el que se puede observar cómo se realiza dicha conversión de los valores que el sensor envía al dispositivo móvil. En el caso del giroscopio el procedimiento es similar.

```

1. function accelerometerHandler(data)
2.     {
3.
4.         // Calculate the x,y,z accelerometer values from raw data.
5.         var values = sensortag.getAccelerometerValues(data)
6.         var x = values.x
7.         var y = values.y
8.         var z = values.z
9.
10.        string_x = '<td>x: ' + (x >= 0 ? '+' : '') + x.toFixed(5) + ' G</td>';
11.        string_y = '<td>y: ' + (y >= 0 ? '+' : '') + y.toFixed(5) + ' G</td>';
12.        string_z = '<td>z: ' + (z >= 0 ? '+' : '') + z.toFixed(5) + ' G</td>';
13.
14.        //Valores en directo del acelerómetro
15.        displayValue('AccelerometerData_x', string_x)
16.        displayValue('AccelerometerData_y', string_y)
17.        displayValue('AccelerometerData_z', string_z)
18.
19.        /*Se calcula y muestran los angulos de los ejes X e Y.*/
20.
21.        if(z < 0){ //signo de 'z' negativo. Esto es solo relativo al sensor
22.
23.            var angulo_radianes_ejex_acel_nuevo = 0;
24.            var angulo_radianes_ejey_acel_nuevo = 0;
25.            var beta_x = 0;
26.            var beta_y = 0;
27.
28.            //EjeX
29.            angulo_radianes_ejex_acel = Math.atan(((y >= 0 ? '+' : '') + y.toFixed(5)) / (Math.sqrt((Math.pow((x >= 0 ? '+' : '') + x.toFixed(5),2)) + (Math.pow((z >= 0 ? '+' : '') + z.toFixed(5),2)))));
30.            angulo_radianes_ejey_acel = Math.atan(((x >= 0 ? '+' : '') + x.toFixed(5)) / (Math.sqrt((Math.pow((y >= 0 ? '+' : '') + y.toFixed(5),2))+(Math.pow((z >= 0 ? '+' : '') + z.toFixed(5),2)))));
31.
32.
33.            if( flag_subiendo_porEjeY == 1 && flag_subiendo_porEjeX == 0){ //aquí se hace la distinción de si se está subiendo por un eje u otro.
34.                //Esto es si se sube por el ejeY:
35.
36.                //EjeX:
37.                angulo_radianes_ejex_acel = Math.atan(((y >= 0 ? '+' : '') + y.toFixed(5)) / (Math.sqrt((Math.pow((x >= 0 ? '+' : '') + x.toFixed(5),2)) + (Math.pow((z >= 0 ? '+' : '') + z.toFixed(5),2)))));
38.                angulo_grados_ejex_acel = (angulo_radianes_ejex_acel * 180) / Math.PI;
39.                displayValue('angulo_ejex_acelerometro', 'AnguloX: ' + angulo_grados_ejex_acel.toFixed(2) + ' grados');
40.

```

```

41.         //EjeY:
42.         angulo_radianes_ejey_acel_nuevo = angulo_radianes_ejey_acel;
43.         beta_y = 1.57 - angulo_radianes_ejey_acel.toFixed(2);
44.         angulo_radianes_ejey_acel_nuevo = 1.57 + beta_y;
45.
46.         angulo_grados_ejey_acel = (angulo_radianes_ejey_acel_nuevo * 18
47.         0) / Math.PI;
48.         displayValue('angulo_ejey_acelerometro', 'AnguloY: ' + angulo_g
49.         rados_ejey_acel.toFixed(2) + ' grados');
50.
51.         //Se muestran también los valores en radianes de los angulos: (
52.         testing)
53.         displayValue('angulo_ejex_radianes_acelerometro', 'AnguloX: ' +
54.         angulo_radianes_ejex_acel.toFixed(2) + ' radianes');
55.         displayValue('angulo_ejey_radianes_acelerometro', 'AnguloY: ' +
56.         angulo_radianes_ejey_acel_nuevo.toFixed(2) + ' radianes');
57.
58.     }else{
59.
60.         //EjeX: este cambia
61.         angulo_radianes_ejex_acel_nuevo = angulo_radianes_ejex_acel;
62.         beta_x = 1.57 - angulo_radianes_ejex_acel.toFixed(2);
63.         angulo_radianes_ejex_acel_nuevo = 1.57 + beta_x;
64.
65.         angulo_grados_ejex_acel = (angulo_radianes_ejex_acel_nuevo * 18
66.         0) / Math.PI;
67.         displayValue('angulo_ejex_acelerometro', 'AnguloX: ' + angulo_g
68.         rados_ejex_acel.toFixed(2) + ' grados');
69.
70.         //EjeY: se queda igual
71.         angulo_radianes_ejey_acel = Math.atan(((x >= 0 ? '+' : '') + x.
72.         toFixed(5)) / (Math.sqrt((Math.pow((y >= 0 ? '+' : '') + y.toFixed(5),2))+(Math
73.         .pow((z >= 0 ? '+' : '') + z.toFixed(5),2)))));
74.         angulo_grados_ejey_acel = (angulo_radianes_ejey_acel * 180) / M
75.         ath.PI;
76.         displayValue('angulo_ejey_acelerometro', 'AnguloY: ' + angulo_g
77.         rados_ejey_acel.toFixed(2) + ' grados');
78.
79.         //Se muestra también los valores en radianes de los angulos:
80.         displayValue('angulo_ejex_radianes_acelerometro', 'AnguloX: ' +
81.         angulo_radianes_ejex_acel_nuevo.toFixed(2) + ' radianes');
82.         displayValue('angulo_ejey_radianes_acelerometro', 'AnguloY: ' +
83.         angulo_radianes_ejey_acel.toFixed(2) + ' radianes');
84.
85.     }
86. }

```

Ilustración 19 – Conversión en directo de los valores del acelerómetro

De esta manera se sabe también cuáles han sido los valores máximos de velocidad a la que ha sido calibrado el ejercicio y podremos advertir al paciente de que se está excediendo en términos de velocidad a la hora de hacer el movimiento. A continuación, se explica en detalle

cuál es el funcionamiento tanto del acelerómetro como del giroscopio para poder entender los valores que se obtienen acerca del movimiento del paciente.

5.1.4 ACELERÓMETRO Y GIROSCOPIO

A lo largo de esta sección se realiza una breve explicación del funcionamiento del sensor en cuanto al acelerómetro y el giroscopio, además de comentar cómo funciona la calibración de ambos para ser capaces de interpretar los valores que generan.

Antes de comenzar es importante aclarar que el sensor que se utiliza en este proyecto, el SimpleLink Bluetooth SensorTag de la empresa Texas Instruments, modelo CC2650STK, consta de un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes.

5.1.4.1 Acelerómetro

La aceleración es la variación de la velocidad por unidad de tiempo es decir razón de cambio en la velocidad respecto al tiempo:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Así mismo, la segunda ley de Newton indica que, en un cuerpo con masa constante, la aceleración del cuerpo es proporcional a la fuerza que actúa sobre él mismo:

$$a = \frac{F}{m}$$

Este segundo concepto es utilizado por los acelerómetros para medir la aceleración. Los acelerómetros internamente tienen un MEMS (MicroElectroMechanical Systems) que de forma similar a un sistema masa resorte permite medir la aceleración [14]. Con un acelerómetro se puede medir esta aceleración, teniendo en cuenta que a pesar de que no exista movimiento, siempre el acelerómetro estará captando la aceleración de la gravedad.

Gracias a la gravedad terrestre se pueden usar las lecturas del acelerómetro para saber cuál es el ángulo de inclinación respecto al eje X o eje Y.

Realizando la suposición de que el sensor está perfectamente alineado con el suelo. Entonces, como se puede observar en la imagen, el eje Z marcará 9.8, y los otros dos ejes marcarán 0. Suponiendo ahora que giramos el sensor 90 grados. Ahora es el eje X el que está perpendicular al suelo, por lo tanto, marcará la aceleración de la gravedad.

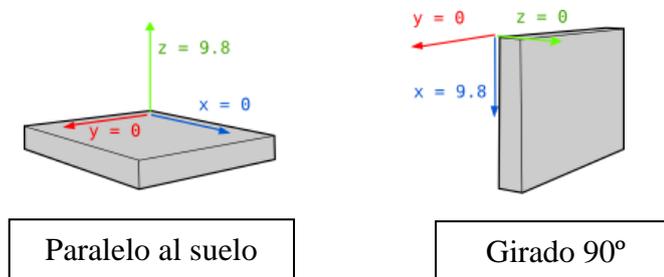


Ilustración 20 – Valores del acelerómetro en función de su posición

Si se sabe que la gravedad es 9.8 m/s², y qué medida dan los tres ejes del acelerómetro, por trigonometría es posible calcular el ángulo de inclinación del sensor. El cálculo que se lleva a cabo para obtener el ángulo de giro es el mostrado en las siguientes fórmulas:

$$\text{Angulo } Y = \text{atan}\left(\frac{x}{\sqrt{y^2 + z^2}}\right)$$

$$\text{Angulo } X = \text{atan}\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right)$$

Dado que el ángulo se calcula a partir de la gravedad, no es posible calcular el ángulo Z con esta fórmula ni con ninguna otra. Para hacerlo se necesita otro componente: el magnetómetro, que es un tipo de brújula digital. Para el caso concreto de este proyecto no ha sido necesario dicho cálculo. Para futuras versiones de la herramienta, podría llegar a

tenerse en cuenta, en el caso de alguna aplicación concreta de la misma. Las fórmulas que se acaban de mostrar son las empleadas en el código previo que muestra la conversión de los valores del acelerómetro.

5.1.4.2 Giroscopio

La velocidad angular es la tasa de cambio del desplazamiento angular por unidad de tiempo, es decir que tan rápido gira un cuerpo alrededor de su eje [15]:

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

Con un giroscopio se puede medir la velocidad angular, y si se llegase a integrar la velocidad angular con respecto al tiempo podría obtenerse el desplazamiento angular (posición angular si se supiera dónde se inició el giro). La velocidad angular es, básicamente, los grados que se gira en un segundo.

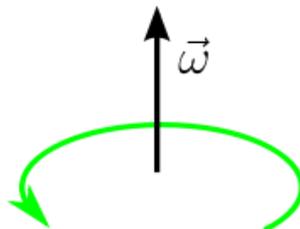


Ilustración 21 – Representación de la velocidad angular

Gracias al giroscopio, y las medidas de velocidad que se obtienen a través de él, se puede saber en todo momento si el paciente está realizando el movimiento más rápido de lo que debería, pudiendo así ofrecerle una alerta a través de la pantalla del dispositivo móvil indicándole que debe reducir dicha velocidad.

5.1.4.3 Calibración de ambos sensores

Una de las etapas más importantes a la hora de emplear estos sensores es la calibración que debemos realizar de los mismos para poder interpretar correctamente los valores que recibimos en el dispositivo móvil vía bluetooth.

Esta etapa es la que se denomina de “escalado de las lecturas” de los sensores. En el caso particular que nos compete, lo que se realiza es escalar las lecturas a valores en unidades de aceleración y velocidad angular.

Primeramente, es necesario saber los rangos con los que está configurado el sensor. Dichos rangos pueden ser 2g/4g/8g/16g para el caso del acelerómetro y 250/500/1000/2000 (grados/s) para el giroscopio. En este caso se emplea para el giroscopio 250°/s y para el caso del acelerómetro un valor de 16384. A continuación, se muestra la parte del código donde se ha realizado esta calibración para la correcta lectura de los valores de ambos sensores:

```
1. instance.getAccelerometerValues = function(data)
2.     {
3.         //ORIGINAL
4.         var divisors = {x: -16384.0, y: 16384.0, z: -16384.0}
5.
6.
7.         // Calculate accelerometer values.
8.         var ax = util.littleEndianToInt16(data, 6) / divisors.x
9.         var ay = util.littleEndianToInt16(data, 8) / divisors.y
10.        var az = util.littleEndianToInt16(data, 10) / divisors.z
11.
12.        // Return result.
13.        return { x: ax, y: ay, z: az }
14.    }
```

Ilustración 22 - Código de calibración del acelerómetro

```
1. instance.getGyroscopeValues = function(data)
2.     {
3.         // Calculate gyroscope values.
4.         var gx = util.littleEndianToInt16(data, 0) * 255.0 / 32768.0
5.         var gy = util.littleEndianToInt16(data, 2) * 255.0 / 32768.0
6.         var gz = util.littleEndianToInt16(data, 4) * 255.0 / 32768.0
7.
8.         // Return result.
9.         return { x: gx, y: gy, z: gz }
10.    }
```

Ilustración 23 - Código de calibración del giroscopio

Se ha considerado importante adjuntar este código, ya que puede ser de gran ayuda a todas aquellas personas que puedan llegar a usar este sensor en el futuro, en concreto para aquellas que fueran a hacer uso del acelerómetro y del giroscopio en detalle, de la misma manera en que se emplean en este proyecto. Para llegar a comprender esta parte del sensor y elegir correctamente los valores de calibración, ha resultado de gran utilidad un manual de usuario de Texas Instruments, donde se expone información relativa al formato en el que el sensor genera cada dato y cómo realizar posteriormente la traducción de los mismos [16]. Este manual ha permitido obtener valores claros del acelerómetro y del giroscopio, para después realizar el análisis y la correspondiente extracción de conclusiones.

El sensor envía por bluetooth al dispositivo móvil una serie de 16 bits del tipo ‘unsigned – little endian’ (en formato de ‘raw values’, es decir, valores sin procesar, en bruto). Estos bits son los correspondientes al giroscopio y al acelerómetro, los cuales primero tenemos que convertir al tipo ‘integer’, para ya después poder operarlos. En la siguiente tabla se muestra qué función tiene cada bit del conjunto de 16 bits:

| <i>Bit</i> | <i>Uso</i> |
|------------|--|
| 0 | Habilita Eje Z Giroscopio |
| 1 | Habilita Eje Y Giroscopio |
| 2 | Habilita Eje X Giroscopio |
| 3 | Habilita Eje Z Acelerómetro |
| 4 | Habilita Eje Y Acelerómetro |
| 5 | Habilita Eje X Acelerómetro |
| 6 | Habilita el magnetómetro (todos los ejes) |
| 7 | Activa Wake-On-Motion |
| 8:9 | Rango del acelerómetro (0=2G, 1=4G, 2=8G, 3=16G) |
| 10:15 | No se usan |

Tabla 7 - Bits y uso correspondiente en la cadena de 16 bits

5.1.5 OTRAS FUNCIONALIDADES

En el momento en el que se completó la etapa que tenía como objetivo principal permitir al paciente recibir la retroalimentación relativa al movimiento que está realizando en tiempo real, se dio comienzo a una nueva etapa en la cual la aplicación ha seguido creciendo en cuanto a funcionalidades de cara al paciente y a los médicos que harán uso de esta tecnología. A continuación, se exponen esas nuevas funcionalidades implementadas.

5.1.5.1 Guardado de los Ejercicios

Una vez que el paciente junto con su especialista ha realizado la calibración de un ejercicio en concreto que forme parte de la rutina de rehabilitación del mismo, se ha introducido la funcionalidad de poder guardar cada ejercicio que ha sido calibrado.

Desde la ventana de ‘Calibración de un ejercicio’, se ha implementado un botón de guardado.



Ilustración 24 – Botón Guardar Ejercicio

Este botón lleva a un menú de guardado donde se pueden establecer una serie de parámetros antes del almacenamiento del ejercicio en el dispositivo. Estos parámetros son los siguientes:

- Nombre del ejercicio.
- Número de repeticiones.
- Número de series a realizar.

Esto permite, por un lado, al especialista, establecer una rutina detallada de los ejercicios a realizar por parte del paciente al cual esté tratando, y al paciente lo que le aporta es una manera muy sencilla de tener la información de los ejercicios que tiene que realizar al alcance de su mano.

El almacenamiento de los ejercicios se lleva a cabo de manera local en el dispositivo móvil, haciendo uso de la tecnología JSON, tal y como se comentó en el Capítulo 2 - ‘Descripción de las Tecnologías’, pensando de cara al futuro en una situación en la que esta aplicación pudiera llegar a conectarse a servidores cloud en los que grabar toda esta información. En ese tipo de comunicaciones se emplea JSON ya que permite reducir enormemente la cantidad de texto y cabeceras a enviar a través de la red. Además, JSON tiene la gran ventaja de que los datos están almacenados en vectores y registros. Esto es una ventaja ya que es una estructura muy manejable haciendo uso de JavaScript, que es el lenguaje que maneja la lógica principalmente en este proyecto.

A continuación, se muestra una porción de código que hace referencia al guardado de un nuevo ejercicio en la aplicación, tal y como se acaba de mencionar, en forma de JSON.

```
1. function guardar_ejercicio(){
2.
3.     //Reseteo el valor del flag_he_mostrado_lista para que cuando se vuelva
    a mostrar la lista se muestre actualizada:
4.     flag_he_mostrado_lista = 0;
5.
6.     document.getElementById("listado_ejercicios").innerHTML = "";
7.
8.
9.     //Leo los valores definidos a la hora de guardar el ejercicio: nombre,
    nºrepeticiones, nºseries:
10.    var selnom = document.getElementById("sel_nom"); //numero de series
11.    nombre = selnom.options[selnom.selectedIndex].text;
12.
13.    //Si se ha elegido como nombre 'Otro', entonces se coge el valor del ár
    ea de texto que aparece
14.    if(selnom.options[selnom.selectedIndex].text == 'Otro'){
15.
16.        nombre = document.getElementById('nom_texto_escrito').value;
17.        flag_nombre_otro = 1; //activo el flag para saber que el usuario ha
    escrito un nombre tal cual
18.    }
19.
20.    //se guarda el codigo del ejercicio como el indice en el que está en la
    lista para luego mostrar el video correspondiente
21.    codigo_ejercicio = selnom.selectedIndex;
22.
23.    var e1 = document.getElementById("sel2"); //numero de series
24.    numero_series = e1.options[e1.selectedIndex].text;
25.
26.    var e2 = document.getElementById("sel1"); //numero de repeticiones
27.    numero_repeticiones_objetivo = e2.options[e2.selectedIndex].text;
28.
29.
```

```

30.     //Primero se comprueba si se puede almacenar datos en el localStorage d
    el dispositivo:
31.     if (typeof(Storage) !== "undefined") {
32.
33.         // Store
34.
35.         /*Se guarda un array de ejercicios.
36.         Primero hay que guardar lo que tenga en el localStorage para no sob
    reescribirlo: */
37.         oldItems = JSON.parse(localStorage.getItem('itemsArray')) || [];
38.
39.         if(oldItems.length == 0){ //esto es que no hay ningún ejercicio aún
    guardado
40.
41.             identificador = 0;
42.
43.         }else{ //ya hay ejercicios guardados
44.
45.             identificador = oldItems.length + 1;
46.         }
47.
48.         if(flag_nombre_otro == 1){ //entonces el código de ejercicio será '
    null' de cara a no mostrar luego opción de ver su video
49.
50.             codigo_ejercicio = null;
51.             flag_nombre_otro = 0; //reseteo el flag
52.
53.         }
54.
55.         /*Se crea el nuevo elemento que se va a añadir a la lista: */
56.         myObj = { "identificador":identificador,
57.                 "nombre":nombre,
58.                 "codigo_ejercicio":codigo_ejercicio,
59.                 "max_valor_angulo_ejex_acel":max_valor_angulo_ejex_acel,
60.                 "min_valor_angulo_ejex_acel":min_valor_angulo_ejex_acel,
61.                 "max_valor_angulo_ejey_acel":max_valor_angulo_ejey_acel,
62.                 "min_valor_angulo_ejey_acel":min_valor_angulo_ejey_acel,
63.                 "numero_repeticiones_objetivo":numero_repeticiones_objet
    ivo,
64.                 "numero_series":numero_series,
65.                 "max_valor_ejex_gir":max_valor_ejex_gir,
66.                 "min_valor_ejex_gir":min_valor_ejex_gir,
67.                 "max_valor_ejey_gir":max_valor_ejey_gir,
68.                 "min_valor_ejey_gir":min_valor_ejey_gir };
69.
70.
71.         /*Se guarda el nuevo elemento después de los anteriores: */
72.         oldItems.push(myObj);
73.         myJSON = JSON.stringify(oldItems);
74.
75.         /*Se Sobreescribe el localStorage: */
76.         localStorage.setItem("itemsArray", myJSON);
77.
78.         /*Se limpian los campos de los detalles del ejercicio a guardar: */

```

```
79.         document.getElementById("sel1").value = 10;  
80.         document.getElementById("sel2").value = 2;  
81.  
82.         sweetAlert("¡Ejercicio guardado correctamente!", "", "success");  
83.  
84.         /*Se oculta por defecto el mensaje de la lista de ejercicios: */  
85.         document.getElementById("mensaje_lista").style.display = "none";  
86.  
87.     } else {  
88.  
89.         //No Web Storage support  
90.     }  
91. }
```

Ilustración 25 – Código de guardado de un nuevo ejercicio

En futuras versiones se pensará acerca de la ampliación del número de campos a guardar para poder dar más versatilidad a esta funcionalidad de la aplicación. Para esto, lo mejor será contar con la opinión de especialistas en la materia para poder saber qué información, además de la que ya se guarda para ejercicio, podría llegar a ser útil e interesante también almacenar.

5.1.5.2 Contador de Repeticiones

Otra de las funcionalidades que ha sido añadida a posteriori es el contador de repeticiones. Mediante el algoritmo que se ha implementado, la aplicación es capaz de contar las repeticiones que el paciente está haciendo en tiempo real de cada ejercicio.



Ilustración 26 – Contador de repeticiones con objetivo

Esta es una funcionalidad extremadamente útil. Le proporciona al paciente la oportunidad de no tener que estar pendiente del número de repeticiones que lleva realizadas, así éste podrá centrarse exclusivamente en realizar correctamente el ejercicio en cuestión, aumentando así la eficacia de la rehabilitación que está haciendo. Y de cara al especialista, éste podrá saber si el paciente está cumpliendo estrictamente con el programa de rehabilitación que debe seguir.

Además, se ha añadido una ventana de estadísticas finales, la cual se muestra al paciente al terminar cada uno de los ejercicios. Esto permite, tanto al paciente como a su médico, visualizar conclusiones del ejercicio que se ha realizado con el fin de poder mejorar día a día su proceso de rehabilitación. Se pueden visualizar estas ventanas en el siguiente apartado.

5.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

A lo largo de los capítulos previos se ha definido claramente la usabilidad y funcionalidad de la aplicación que se presenta en este proyecto, por lo tanto, se procede a continuación a exponer en detalle todo el diseño que se ha realizado de la misma.

Al tratarse de una aplicación multiplataforma, en cuanto a su diseño, se puede afirmar que existe una gran libertad de estilos y de organización de toda su funcionalidad asociada, debido a la posibilidad de emplear tecnologías relacionadas con el diseño web, pero lo que se ha intentado en todo momento es que el usuario final no tenga la sensación de estar utilizando una aplicación móvil distinta a las que está acostumbrado a usar habitualmente. Por lo tanto, todas las fases de diseño que se han realizado de la misma han tenido siempre como objetivo principal seguir las bases de diseño que sustentan las aplicaciones nativas.

La interfaz de la aplicación es conocida como la capa que hay entre el usuario y el corazón funcional de ésta, allí donde tienen lugar todas las interacciones. Es por esto por lo que, a pesar de haber dotado a la aplicación con un amplio abanico de funcionalidades, se ha buscado constantemente llevar a cabo un diseño sencillo, pero a la vez muy cuidado. El

objetivo ha sido siempre eliminar todos aquellos elementos innecesarios, colocando el contenido en una posición privilegiada frente al contenedor del mismo.

5.2.1 VENTANA DE INICIO

Se dice que la primera impresión es la que cuenta, y dentro del mundo de las aplicaciones el elemento que primero visualiza el usuario es la ventana inicial. En el caso de esta aplicación la ventana inicial es la siguiente:



Ilustración 27 – Ventana de inicio

Como se puede observar, se trata de una ventana muy sencilla, en la que se muestra el nombre de la aplicación y botón de acceso el cual le permite al usuario entrar a hacer uso de la aplicación.

5.2.2 VENTANA DE VALIDACIÓN

Una vez se ha entrado, lo primero que se encuentra el usuario, en este caso el paciente o su médico especialista, es la ventana en la que deberá introducir un código de acceso. Este es un elemento clave el cual permite tener el control de los usuarios que accederán a hacer uso de esta tecnología y por lo tanto de este servicio.



Ilustración 28 – Ventana de validación

Cada paciente que tenga que comenzar un proceso de rehabilitación recibirá un código de acceso, el cual deberá ser introducido en el campo de texto habilitado a tal efecto en esta ventana. Siempre que dicho código sea un código válido, previamente dado de alta por los administradores de esta tecnología en las bases de datos correspondientes, el usuario podrá acceder al servicio, es decir, tendrá acceso permanente a la aplicación mientras dure su proceso de rehabilitación, sin necesidad de introducirlo cada vez que acceda a la aplicación. Una vez finalizada su rehabilitación, ese código caducará y dejará de tener acceso al servicio. En todo momento se muestran mensajes informativos al usuario, tanto si el código es válido

o no, tal y como se observa en las siguientes ilustraciones:

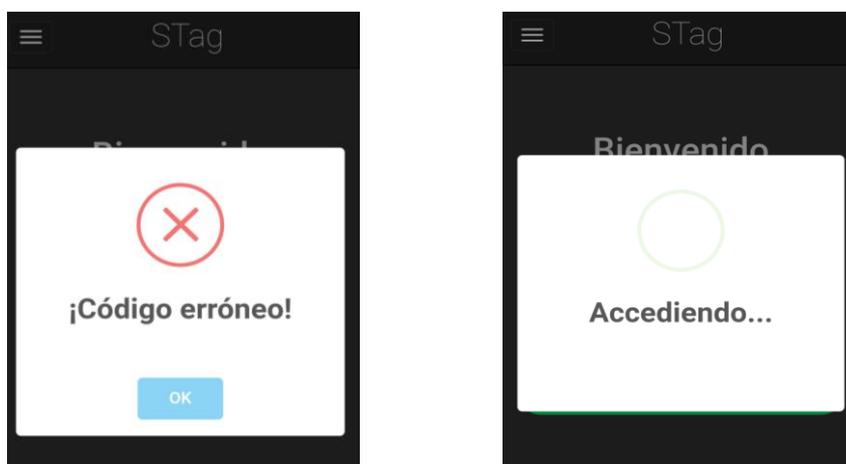


Ilustración 29 – Mensajes informativos de acceso al servicio

Como puede observarse, se emplean mensajes cuyo diseño se ha tenido muy en cuenta, de manera que éstos no sean intrusivos de cara a la experiencia de uso del cliente final de la aplicación.

5.2.3 VENTANA PRINCIPAL

Una vez que el usuario ha introducido un código de acceso válido en la ventana anteriormente expuesta, el usuario llega a la ventana principal de la aplicación.



Ilustración 30 – Ventana principal

En ella se observa en la parte superior una imagen del sensor que posee el paciente para hacer su rehabilitación.

El objetivo primario de esta ventana es que el usuario comience conectando su sensor con el dispositivo móvil. Para realizar la conexión con el mismo debe presionar el botón 'Conectar'. En caso de querer desconectar el sensor del móvil deberá presionar el botón 'Desconectar', una vez haya finalizado todos los ejercicios prescritos por su especialista para ese día. A continuación se muestra el código por medio del cual se puede realizar la mencionada conexión y desconexión con el sensor.

```
1. // SensorTag object.
2.   var sensortag
3.
4.   function initialiseSensorTag()
5.   {
6.       // Create SensorTag CC2650 instance.
7.       //Función de la librería propia de ble-sensortag
8.       sensortag = evthings.tisensortag.createInstance(
9.           evthings.tisensortag.CC2650_BLUETOOTH_SMART)
10.
11.      /*Lo que se hace aquí es llamar a cada función
12.      (primer argumento) cada 1000 ms para activar los diferentes servicios.*/
13.
14.      sensortag
15.        .statusCallback(statusHandler)
16.        .errorCallback(errorHandler)
17.        .keypressCallback(keypressHandler)
18.        .temperatureCallback(temperatureHandler, 1000)
19.        .humidityCallback(humidityHandler, 1000)
20.        .barometerCallback(barometerHandler, 1000)
21.        .accelerometerCallback(accelerometerHandler, 100)
22.        .magnetometerCallback(magnetometerHandler, 1000)
23.        .gyroscopeCallback(gyroscopeHandler, 100)
24.        .luxometerCallback(luxometerHandler, 1000)
25.    }
26.
27.    evthings.tisensortag.createInstance = function(type)
28.    {
29.        // TODO: Update this function as new models are added.
30.
31.        // Get a factory object that will add in specific methods.
32.        if (evthings.tisensortag.CC2650_BLUETOOTH_SMART == type)
33.        {
34.            var factory = evthings.tisensortag.ble.CC2650
35.        }
36.        else
37.        {
38.            return null
39.        }
40.
41.        // Create abstract instance.
42.        var instance = evthings.tisensortag.createGenericInstance()
43.
44.        //Por defecto: Add specific implementation.
45.        return factory.addInstanceMethods(instance)
46.    }
47.
48.    function connect()
49.    {
50.        sensortag.connectToNearestDevice();
51.    }
52.
53.
54.    instance.connectToNearestDevice = function(scanTimeMilliseconds)
55.    {
```

```

56.         instance.callStatusCallback(sensortag.status.SCANNING)
57.         instance.disconnectDevice()
58.         evthings.easyble.stopScan()
59.         evthings.easyble.reportDeviceOnce(false)
60.
61.         var nearestDevice = null
62.         var strongestRSSI = -1000
63.         var scanTimeoutStarted = false
64.         var noTagFoundTimer = null
65.
66.         // Timer that connects to the nearest SensorTag after the
67.         // specified timeout.
68.         function startConnectTimer()
69.         {
70.             // Set timeout period.
71.             scanTimeMilliseconds = (('undefined' == typeof scanTimeMillisecon
ons)
72.                 ? 1000 // Default scan time is 3 seconds
73.                 : scanTimeMilliseconds) // Use user-set value
74.
75.             // Start timer.
76.             setTimeout(
77.                 function() {
78.                     if (nearestDevice)
79.                     {
80.                         evthings.easyble.stopScan()
81.                         instance.callStatusCallback(
82.                             sensortag.status.SENSORTAG_FOUND)
83.                         instance.connectToDevice(nearestDevice)
84.                     }
85.                 },
86.                 scanTimeMilliseconds)
87.         }
88.     }
89.
90.     function disconnect()
91.     {
92.
93.         /*Vacio los vectores generales de los sensores (acelerómetro y giroscop
io) */
94.         array_ace1.length = 0;
95.         array_gir.length = 0;
96.
97.         sensortag.disconnectDevice() //función de la librería propia de ble-
sensortag
98.         resetSensorDisplayValues() //función de la librería propia de ble-
sensortag
99.     }

```

Ilustración 31 – Código de conexión y desconexión del sensor con el dispositivo móvil

Por medio de un área de texto situado debajo de estos botones, el usuario recibe información relativa al estado de la conexión, y en caso de fallo mensajes informativos de lo que ha ocurrido. Una vez que se ha realizado la conexión con éxito, el usuario podrá acceder a todas

las funcionalidades que desee presentes en la aplicación. Para ello en la parte inferior de esta ventana se han situado dos botones.

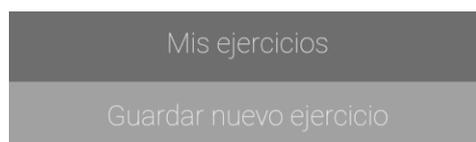


Ilustración 32 - Botones de acceso a ejercicios y/o calibración

‘Mis Ejercicios’: permite al usuario acceder a la lista de ejercicios recetados por su médico.

‘Guardar Ejercicio’: permite al usuario, por lo general será el médico especialista, calibrar un nuevo ejercicio y poder guardarlo para que el paciente lo realice a lo largo de su proceso de rehabilitación.

El usuario podrá acceder a la lista de ejercicios por medio del primer botón mencionado, sin necesidad de que se haya conectado el dispositivo con ningún sensor, pero sí será necesario que el paciente conecte el sensor al dispositivo móvil para poder guardar un nuevo ejercicio. Es por ello por lo que el segundo botón permanecerá bloqueado hasta que se detecte un sensor conectado a la aplicación.

5.2.4 VENTANA DE CALIBRACIÓN Y GUARDADO DE UN EJERCICIO

Por medio de esta ventana, el usuario podrá calibrar un nuevo ejercicio para, posteriormente, guardarlo para futuras sesiones de rehabilitación.



Ilustración 33 – Ventana de calibración y guardado

Una vez que da comienzo el período de calibración de un nuevo ejercicio, el paciente, con la ayuda y supervisión de su especialista, deberá realizar el movimiento que se desea guardar en la plataforma. Tal y como se mencionó en el apartado ‘5.1.2 Fases’, esta fase denominada ‘Fase de calibración’ es crítica, ya que es necesario que el movimiento se realice tal y como establezca el médico el tratamiento prescrito, teniendo en cuenta tanto los ángulos de giro de la extremidad a tratar así como la velocidad del movimiento, ya que es la fase en la que se procesa toda la información relativa al movimiento realizado para poder después proporcionar al paciente retroalimentación en directo acerca de dicho movimiento cuando esté llevándolo a cabo cada vez que comience una nueva sesión del tratamiento.

Una vez repetido durante unos segundos el movimiento, al presionar el botón de ‘Detener calibración’, esta fase habrá terminado.

En este momento el usuario tiene varias alternativas que se exponen a continuación.



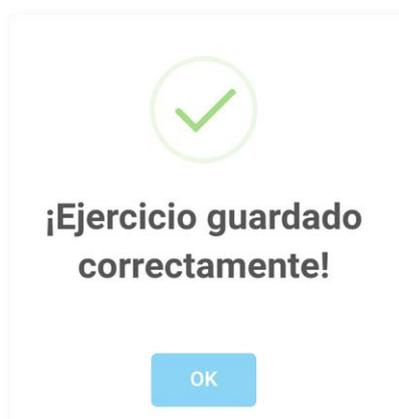
Una de ellas es poder practicar el movimiento que acaba de ser guardado para comprobar que ha sido calibrado correctamente haciendo click en el botón de ‘Empezar ejercicio’. Si el ejercicio se ha calibrado correctamente a gusto del médico, es en este momento en el que se deberá proceder a guardarlo en la aplicación. Para ello, presionando en el botón de ‘Guardar’, se mostrará una ventana con los campos a definir específicos que acompañarán al ejercicio antes de guardarlo definitivamente.



Ilustración 34 – Ventana de guardado

Como se puede observar en la Ilustración 31, el usuario podrá seleccionar el ejercicio que ha calibrado dentro de un panel desplegable de ejercicios disponibles. También puede establecer el número de repeticiones objetivo de las sesiones para este ejercicio en concreto, así como el número de series.

Una vez guardado, se muestra el siguiente mensaje de confirmación:



5.2.5 VENTANA DE EJERCICIOS GUARDADOS

Es esta la ventana que le permite al paciente visualizar su programa de rehabilitación por completo, con todos los ejercicios que debe realizar localizados en un mismo sitio, pudiendo acceder a ellos en cualquier momento, y estando éstos presentados de una manera muy sencilla.



Ilustración 35 – Ventana de ejercicios guardados

En esta ventana podrá visualizar el video de cada ejercicio a realizar, de modo que sepa claramente cuál es cada uno de ellos. Por medio de la flecha situada a la derecha de cada ejercicio podrá acceder a la ventana que le permitirá realizarlo y, además de visualizar más información relativa a dicho movimiento (como el número de series objetivo o el número de repeticiones que debe realizar), es ahí donde recibirá la retroalimentación en directo a través de la pantalla del movimiento que está haciendo para así sabes si lo está haciendo correctamente o no.

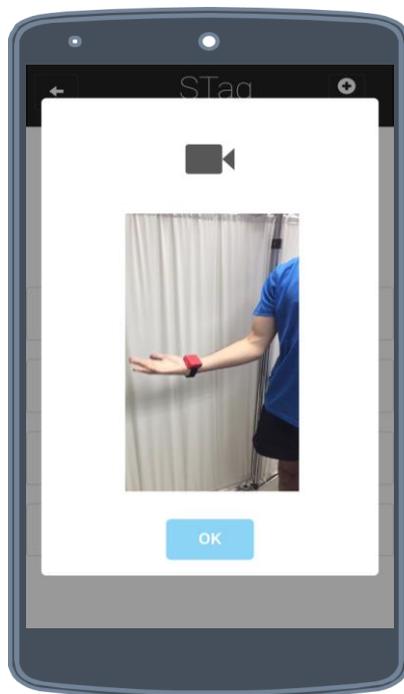
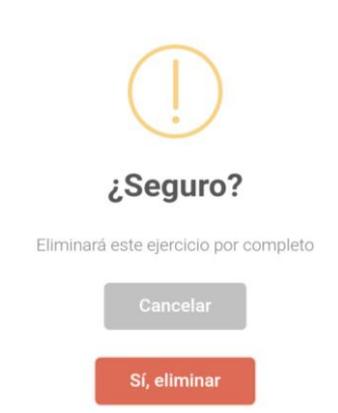


Ilustración 36 – Visualización de video de un ejercicio

Por último, mencionar que por medio de esta ventana el usuario podrá llevar a cabo dos acciones adicionales. Por un lado, podrá eliminar ejercicios de forma individual. Antes de eliminarse por completo el ejercicio seleccionado, se muestra al usuario un último mensaje de confirmación de borrado del mismo.



Por otro lado, a través del botón ‘+’ situado en la parte superior derecha de la ventana el usuario podrá acceder directamente a la ventana de calibración de un nuevo ejercicio, en el caso de que se quieran añadir ejercicios nuevos al plan de rehabilitación presente.

5.2.6 VENTANA DE REALIZACIÓN DE UN EJERCICIO SELECCIONADO

El acceso a esta ventana tiene lugar desde la ventana anterior, a través de la mencionada flecha situada a la derecha de cada ejercicio. Esta es la ventana que proporciona al paciente información en directo del movimiento que está haciendo.



*Ilustración 37 – Ventana de realización de un ejercicio
seleccionado*

En la parte superior hay un botón verde que al pulsarlo se da comienzo a la etapa en la que el paciente debe hacer el movimiento seleccionado. Aparece información específica del ejercicio que se debe hacer, como puede ser el número de repeticiones o el número de series objetivo de la sesión.

En la parte central se encuentra el área donde se ofrece retroalimentación del movimiento al paciente, indicando en color verde que el ejercicio se está llevando a cabo correctamente, o en rojo si se está produciendo algún tipo de fallo en la ejecución, el cual podría ocasionar que la rehabilitación no sea efectiva, o incluso provocar otras lesiones colaterales debidas a la mala ejecución del mismo.

Una vez que el paciente ha terminado de realizar el ejercicio podrá finalizar pulsando en el botón superior de 'Dejar el ejercicio', terminando así este ejercicio y pudiendo volver al listado de movimientos a realizar para continuar con su sesión de rehabilitación.

En este momento se le muestra al paciente, a modo de resumen, una ventana informativa con datos adicionales de cómo ha ido el ejercicio que ha realizado. Se proporciona el tiempo que ha estado haciendo el movimiento, así como el número total de repeticiones hechas junto con un porcentaje que expresa cómo de efectivo ha sido el movimiento de cara a la completa recuperación de la extremidad tratada, es decir, cuantos menos fallos haya cometido a lo largo de la ejecución del mismo mayor será este porcentaje de efectividad.



*Ilustración 38 – Visualización de las estadísticas
finales del movimiento*

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se ha presentado la aplicación a fondo, a lo largo de este capítulo se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos por medio de este proyecto y posteriormente se hablará de los trabajos futuros en el último capítulo de la memoria.

Tras haber realizado numerosas pruebas de test de la aplicación con el principal objetivo de comprobar que todas las funcionalidades que se han desarrollado están implementadas correctamente, surgió la oportunidad de presentar la aplicación en funcionamiento en el Hospital Universitario Puerta de Hierro. Se trata de un centro hospitalario de titularidad pública de la Comunidad de Madrid, localizado en Majadahonda.

Además de ser ésta una oportunidad muy positiva de cara a la fase final del proyecto, tiene el valor añadido de que este hospital nos ha abierto sus puertas de cara a futuras pruebas de esta nueva aplicación con pacientes reales. No solo se trata de un hospital puntero en cuanto a tecnologías en España, sino que también es un hospital altamente enfocado a la docencia y, por lo tanto, siempre están abiertos a colaborar con este tipo de iniciativas. También mencionar que se trata de uno de los cuatro hospitales con los que cuenta la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Madrid de cara a la formación de los futuros médicos de la sanidad española, siendo este un aspecto completamente alineado con el ámbito docente previamente mencionado.

El proyecto desarrollado ha sido presentado a la jefa del Servicio de Rehabilitación, la doctora Mercedes Ramos Solchaga. Con esta presentación se ha buscado validar el proyecto a través de los profesionales cuyo trabajo se centra en el terreno de la rehabilitación física.

En dicha reunión se llevó a cabo una demostración del potencial y las funcionalidades con las que cuenta esta nueva tecnología y, se puede afirmar que la reunión fue todo un éxito. La doctora Mercedes, en primer lugar, comentó lo beneficiosa que puede ser esta tecnología para la denominada “rehabilitación domiciliaria”. Esto es, básicamente, pacientes con algún

tipo de dolencia que se encuentren en fases avanzadas de sus procesos de rehabilitación puedan llevar a cabo sus sesiones de rehabilitación en sus casas, sin tener que desplazarse a su centro médico de referencia, con los inconvenientes que esto conlleva.

Comentó que, a día de hoy, el Hospital Puerta de Hierro se encuentra desarrollando un programa ‘expres’ de rehabilitación para pacientes operados de rodilla. Son pacientes a los que se ha implantado una prótesis, y esta aplicación supondría un gran avance en este ámbito. Tal y como nos comentó la doctora, la idea que tiene a día de hoy el hospital de cara a este nuevo concepto de rehabilitación es el siguiente. Un paciente que acaba de ser operado de la rodilla deberá hacer tres o cuatro sesiones de rehabilitación presencial en el hospital. Una vez realizadas estas sesiones, en las cuales los pacientes han aprendido cómo deben realizar cada uno de los ejercicios de su programa de rehabilitación, podrán seguir con las siguientes sesiones en sus respectivos domicilios. La principal ventaja que tiene esto, tal y como hemos mencionado previamente, es que no tendrán que desplazarse hasta el hospital todos los días para realizar ahí los ejercicios, sino que los podrán llevar a cabo en sus domicilios, aumentando así enormemente su autonomía y calidad de vida.

El empleo de esta tecnología por parte de estos pacientes será muy sencillo. Cada paciente recibirá el sensor que utilizará durante las sesiones que lleve a cabo en su domicilio, junto con un código de acceso mediante el cual podrá hacer uso de la aplicación. Dicho código tendrá solo validez durante el tiempo que dure el tratamiento prescrito. Una vez terminado, el paciente no podrá volver a acceder a la aplicación y será el momento de devolver el sensor en su centro hospitalario, donde el especialista realizará una última revisión del paciente para comprobar que la extremidad tratada se encuentra completamente rehabilitada. Una vez que el paciente ha accedido al servicio a través de su dispositivo móvil, éste accederá a su programa de ejercicios pautados. Es ahí, tal y como se ha expuesto en el capítulo anterior, donde se podrán hacer los movimientos y comprobar su correcta realización mediante la retroalimentación en directo y la posterior obtención de estadísticas finales como son la duración en tiempo que ha estado realizando el paciente el movimiento, el número de repeticiones hechas o el porcentaje que indica la eficacia del movimiento llevado a cabo.

El inconveniente del planteamiento actual es que, cada paciente recibe simplemente una hoja de papel con los ejercicios que tiene que hacer, pero en ningún momento el propio paciente sabe si está haciendo bien las sesiones o no. Y, por otro lado, el médico tampoco sabe si los están haciendo correctamente, ni si quiera sabe si los están llevando a cabo o no. Es en este punto donde entraría en juego la aplicación desarrollada. Tal y como mencionó la doctora Mercedes, sería muy beneficioso, tanto para el paciente como para el médico, que cada paciente pudiera descargarse esta aplicación y, al recibir el sensor, pudiera realizar las sesiones cómodamente en su casa, pudiendo tener en la aplicación el programa de rehabilitación completo y visualizando la eficacia con la que está realizando cada uno de los movimientos. De esta forma, los pacientes podrán comunicarse con sus médicos en el caso de que no lo estén haciéndolo correctamente. Al mismo tiempo permitiría agilizar las largas listas de espera con las que cuentan los hospitales, ahorrando un tiempo muy valioso a los pacientes.

En resumen, la doctora Mercedes ha visto en la reunión dos ventajas principales muy claras. Por un lado, esta aplicación permite realizar un seguimiento real de la adherencia de cada paciente a su programa de rehabilitación y, por otro lado, permite conocer la calidad de realización de cada ejercicio para cada uno de los pacientes tratados.

Se comentaron en la reunión los trabajos futuros que se exponen en el capítulo siguiente, los cuales fueron muy bien valorados por parte de la doctora. Ésta, al finalizar la reunión, comentó una mejora con el fin de aumentar la funcionalidad de la aplicación. Mencionó que sería interesante que se pudiera visualizar en la aplicación el ángulo de giro de la extremidad tratada, así como la opción de seleccionar un peso, en kilogramos. Esto se debe a que existen ejercicios que el paciente debe realizar levantando pesos. Por lo tanto, añadir al menú de guardado de parámetros del ejercicio este nuevo elemento.

Por lo tanto, se considera un aspecto muy positivo, de cara al proyecto, el hecho de haber podido contar con el consejo y la ayuda del Hospital Universitario Puerta de Hierro, una vez terminado el desarrollo del mismo. Esto ha permitido dar una validación por parte de

profesionales en la materia al trabajo realizado y, se ha abierto la puerta a poder llevar este proyecto a la realidad a través de esta institución.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con este capítulo termina este Trabajo de Fin de Grado. Se procede a continuación a comentar cuáles han sido las conclusiones extraídas de este proyecto. También se indica con claridad cuáles han sido los objetivos que se han cubierto y las aportaciones hechas.

En primer lugar, me gustaría destacar que uno de los objetivos primarios que se tenía con este proyecto, el cual era comprobar si el sensor empleado sería capaz de cumplir con la misión de extraer toda la información relativa al movimiento de la extremidad de cada paciente, se ha logrado satisfactoriamente. Este sensor no sólo permite obtener la información mencionada, sino que además el performance que presenta para, una vez capturados todos los datos del sensor, poder procesarlos instantáneamente y mostrarle en tiempo real las conclusiones obtenidas al paciente y a su correspondiente especialista, ha resultado ser excelente.

El gran objetivo que se perseguía con el desarrollo de este proyecto era implementar una plataforma que permitiera mejorar el proceso de rehabilitación de pacientes que sufren algún tipo de proceso incapacitante, aumentando la interacción entre cada paciente y su médico traumatólogo, rehabilitador o fisioterapeuta, según cada caso. Con la tecnología que se ha desarrollado, los especialistas mencionados tienen la capacidad de realizar un seguimiento más detallado de cada uno de sus pacientes, y al mismo tiempo los pacientes podrán aumentar el control sobre su programa de rehabilitación al completo y a la hora de realizar cada ejercicio, recibiendo constante retroalimentación acerca de sus movimientos, acompañada de estadísticas finales donde pueden ver cómo de eficaz está siendo su rehabilitación además de otros parámetros como pueden ser el número de repeticiones realizadas o el tiempo empleado en cada uno de esos movimientos.

Todo ello se ha conseguido por medio del desarrollo de una aplicación móvil para smartphones, implementada siguiendo las pautas de desarrollo de aplicaciones multiplataforma, la cual se presenta como una aplicación muy sencilla de manejar, pero al mismo tiempo muy potente debido a la utilidad y funcionalidad que presenta de cara al uso de ésta por parte tanto de los pacientes como de sus especialistas. La naturaleza multiplataforma que tiene como base esta aplicación se presenta como una gran ventaja de cara a la introducción de esta tecnología en el mercado actual ya que permite ser empleada tanto en dispositivos móviles Android o iOS.

Esto supone por lo tanto un gran avance dentro de un ámbito en el que los métodos no han evolucionado con el paso de los años, esto es debido a que actualmente los pacientes reciben la información relativa a la rehabilitación que deben realizar en papel y no tienen ninguna manera de saber, en directo, si están llevando a cabo correctamente o no los ejercicios pautados. Además, gracias al diseño que se ha realizado de la aplicación, los pacientes ganan autonomía gracias a la posibilidad de realizar los ejercicios en su casa, siempre y cuando el especialista lo considere oportuno. Esto ayudado por la incorporación de videos de ejemplo de cada ejercicio, gracias a los cuales los pacientes podrán visualizar el movimiento que deben hacer al comienzo de cada uno de ellos, sin la necesidad de que esté el especialista presente acompañando al paciente de manera constante durante toda su rehabilitación.

La aplicación se ha desarrollado teniendo en cuenta en todo momento las limitaciones que pueda tener cada paciente, ya que cada uno de ellos es único y debe tratarse como tal, a pesar de que puedan tener las mismas dolencias o estar atravesando similares procesos incapacitantes. Esto se traduce, en la aplicación, en la existencia de una fase de calibración previa al guardado de cada ejercicio, permitiendo así al algoritmo desarrollado adaptarse en todo momento a las mencionadas limitaciones de cada paciente tratado.

La posibilidad que tiene cada paciente, al emplear esta tecnología, de realizar modificaciones del movimiento llevado a cabo de manera instantánea, permite aumentar claramente la eficacia de la rehabilitación, ya que si cada uno de los movimientos que debe hacer no se realizan correctamente esto se traduce en la necesidad de aumentar el período de

rehabilitación, con su asociado coste. En el peor de los casos, esto implicaría la aparición de lesiones colaterales debidas a la incorrecta realización de sendos movimientos. Este aumento de la eficacia va unido al coste mínimo de esta tecnología como tal, a nivel de hardware, que se ha conseguido gracias a el empleo del sensor elegido.

Tras la presentación de este trabajo, de cara al futuro más próximo de este proyecto, una de las claves principales que supondría el siguiente paso y avance de esta tecnología sería la conexión de la aplicación a una plataforma cloud. Esta conexión, permitiría aumentar la funcionalidad del servicio, haciendo posible almacenar mucha más información relativa a cada paciente y a su proceso de rehabilitación física en bases de datos remotas. De esta manera, se podrían implementar una serie de dashboards en los que, tanto el paciente como el especialista, podrían visualizar distintas estadísticas y parámetros relativos al proceso que se está siguiendo. El acceso a dichos dashboards se llevaría a cabo a través de la aplicación móvil, previo inicio de sesión por parte del usuario. El paciente accedería a aquella información que se considerase relevante y el especialista podría obtener una visión global del progreso de cada uno de sus pacientes.

También se ha pensado en un sistema que permita al médico realizar modificaciones o comunicarse a través de la aplicación con sus pacientes, habilitando así un canal de comunicación más directo con sus pacientes, evitando desplazamientos innecesarios de los pacientes a sus centros de rehabilitación u hospitales. Por medio de esta tecnología, cada médico podrá llevar un control más exhaustivo de cada uno de los pacientes que trata, llevando el servicio ofrecido dentro del mundo sanitario a otro nivel y sabiendo que se está empleando un elemento innovador tecnológico dentro del sector sanitario.

Además, se abre una línea de investigación y desarrollo de este proyecto con el estudio de la posibilidad de integrar esta tecnología con pulseras inteligentes presentes ya en el mercado, de las cuales sería muy bueno averiguar si es posible obtener toda la información que obtenemos de nuestro sensor a través de ellas, para poder ofrecer este mismo servicio en el caso de que el paciente cuente ya con una de ellas, sin la necesidad de adquirir el sensor que se ha empleado en este proyecto.

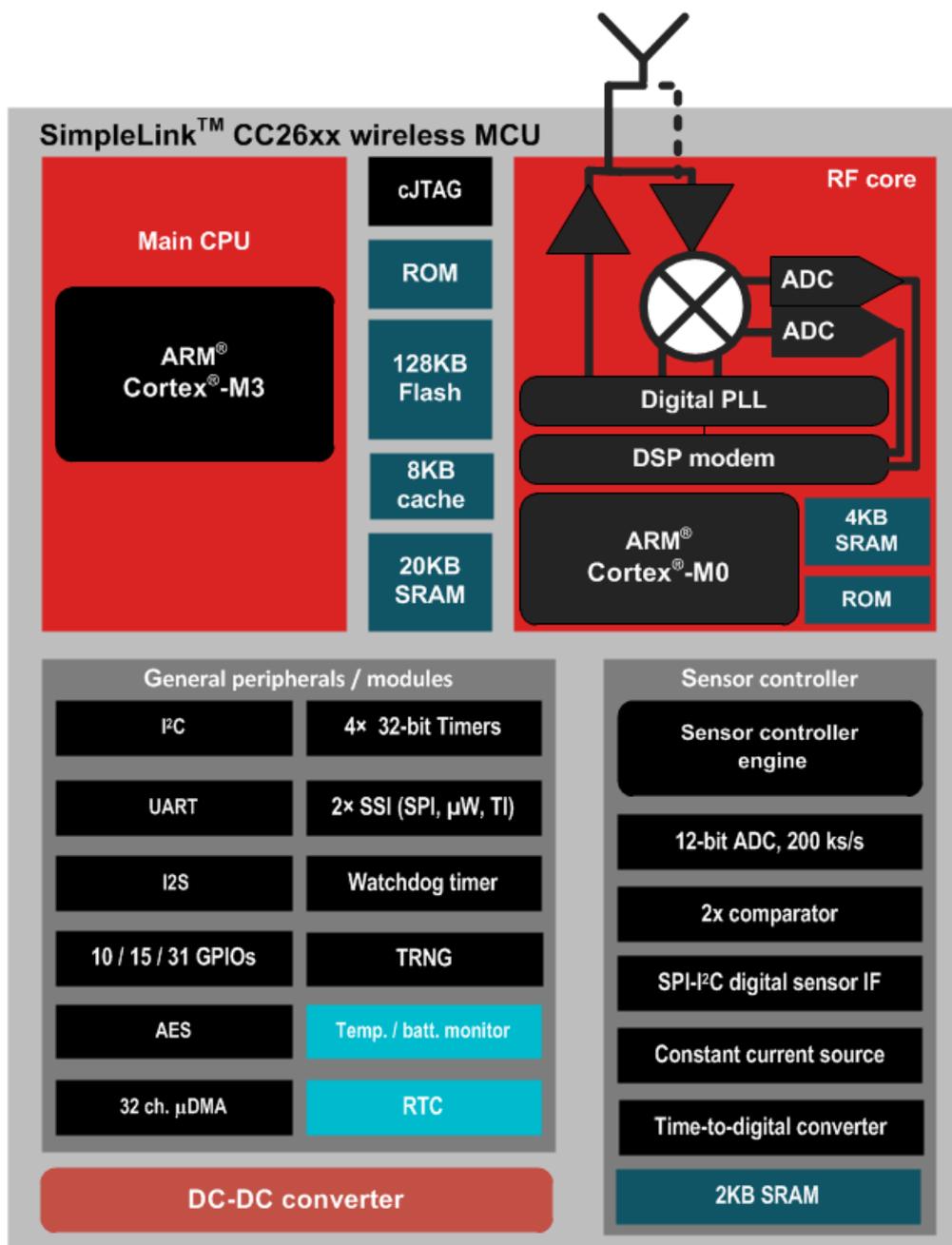
Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Panorámica de la discapacidad en España.* <http://www.ine.es/revistas/cifraine/1009.pdf>
- [2] *Informe sobre la Base Estatal de Datos de Personas con Valoración del Grado de Discapacidad del Instituto de Mayores y Servicios Sociales (Imserso).*
http://imserso.es/imserso_01/documentacion/estadisticas/bd_estatal_pcd/index.htm
- [3] *Atención médica y rehabilitación.* <http://www.who.int/disabilities/care/es/>
- [4] *Informe Anual del Sistema Nacional de Salud.*
https://www.msssi.gob.es/estadEstudios/estadisticas/sisInfSanSNS/tablasEstadisticas/Resum_Inf_An_SNS_2015.pdf
- [5] *Estadísticas relacionadas con las discapacidades.*
<http://es.uhealthsystem.com/enciclopedia-medica/pmr/stats>
- [6] *Modalidades de Terapia y Rehabilitación física.*
<http://www.terapiayrehabilitacionfisica.com/modalidades.html>
- [7] *ItUserTech&Business, Enero 2017.* <http://www.ituser.es/en-cifras/2017/01/la-venta-de-circuitos-integrados-inalambricos-crecera-un-54-en-2020>
- [8] *Evotings, web oficial.* <https://evotings.com/>
- [9] *Mario Pérez Esteso, “JSON, Programación web”.* <https://geekytheory.com/json-i-que-es-y-para-que-sirve-json/>
- [10] *Página oficial de biomechSOLUTIONS.* <http://www.biomech-solutions.com/index.html>
- [11] *Sensores biomecánicos de biomechSOLUTIONS.* <http://www.biomech-solutions.com/sensores-biomecanicos-noraxon.html>
- [12] *Clara Sánchez, “Wearables para cuidar la salud”.* <http://blog.saluspot.com/10-dispositivos-wearables-para-cuidar-la-salud/>
- [13] *Description and parametrics, CC250.* <http://www.ti.com/product/CC2650/description>
- [14] *Naylamp Mechatronics, Acelerómetro y Giroscopio.*
http://www.naylampmechatronics.com/blog/45_Tutorial-MPU6050-Aceler%C3%B3metro-y-Giroscopio.html
- [15] *Hyperphysics, Department of Physics and Astronomy. Georgia State University.*
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/rotq.html>

- [16] *CC2650 SensorTag User's Guide, Texas Instruments.*
http://processors.wiki.ti.com/index.php/CC2650_SensorTag_User's_Guide#Calibration

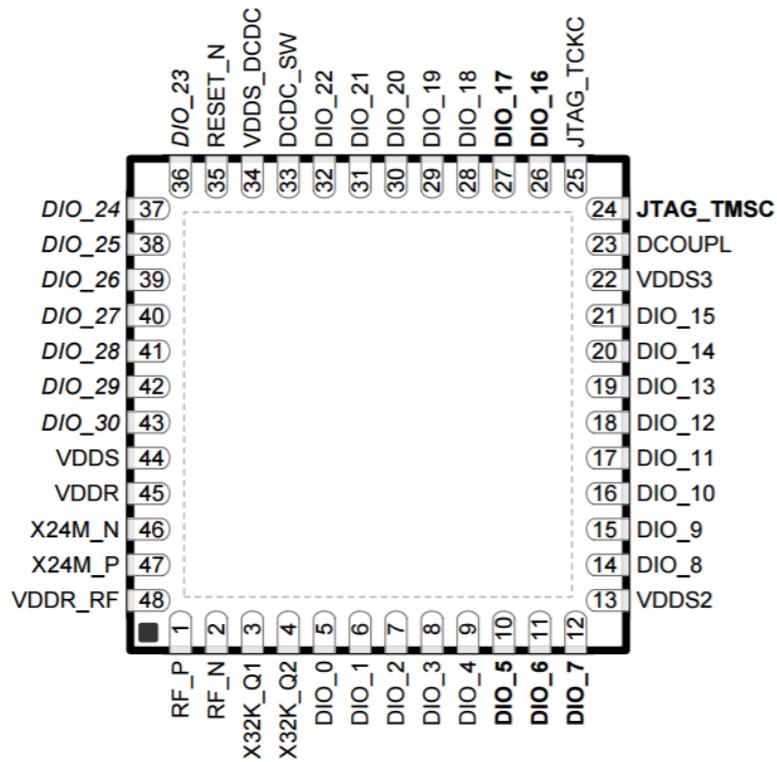
ANEXO A

8.1 DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL (CC26XX)



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

8.2 DIAGRAMA DE PINES



Note: I/O pins marked in **bold** have high drive capabilities. I/O pins marked in *italics* have analog capabilities.

8.3 DISEÑO DEL CIRCUITO

