





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INFORMÁTICA  
GRADO EN INGENIERÍA DE LA SALUD

**SENSORES TEXTILES: APLICACIÓN EN EL CAMPO DE LA  
INGENIERÍA DE LA SALUD**

**TEXTILE SENSORS: APPLICATION IN THE FIELD OF HEALTH  
ENGINEERING**

Realizado por  
**Pablo Reyes Hernández**  
Tutorizado por  
**Rafael de Jesús Navas González**  
**Julián Castellanos Ramos**  
Departamento  
**Electrónica**

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
MÁLAGA, Septiembre 2019

Fecha defensa:  
El Secretario del Tribunal





## RESUMEN

La tecnología *wearable*, los textiles inteligentes y los sensores textiles avanzan a una velocidad vertiginosa y se encuentran en constante desarrollo. Es de especial interés el uso de este tipo de tecnología en dispositivos orientados al sector sanitario. A día de hoy existen numerosos productos *wearables* usados para éste y otros muchos sectores como el laboral, deportivo o en la vida rutinaria de las personas. Relojes inteligentes, bandas pulsómetro o camisetas capaces de regular la temperatura corporal son sólo algunos ejemplos de ellos. Además, existen algunas tecnologías que saldrán al mercado próximamente y se presentan como ideales compañeras de la tecnología *wearable*, como por ejemplo, el 5G y el grafeno aplicable a baterías y sensores.

En este Trabajo Fin de Grado se ofrece una panorámica de las tecnologías *wearable* y de los sensores textiles, además se ha diseñado y fabricado un dispositivo *wearable*: un guante para el control de una mano robótica basado en sensores textiles. El trabajo se ha centrado en conseguir un movimiento preciso y natural de la mano buscando la optimización de cada uno de los componentes del sistema, para una primera inmersión en el mundo de las prótesis y la robótica médica. Gracias al sistema diseñado pueden surgir aplicaciones tales como manipulación a distancia de objetos peligrosos, actividades para la rehabilitación de pacientes o como principio de funcionamiento de una prótesis.

El componente principal del sistema son los sensores textiles de flexión, cuyo principio de funcionamiento consiste en la variación de la resistencia de un material. Otro componente hardware del sistema es el microcontrolador *Arduino UNO*, sobre el que se ha diseñado el software de control y una *PCB shield* que contiene la alimentación y el circuito de acondicionamiento.

El funcionamiento del dispositivo se inicia con un sistema de calibración, en el que el programa recoge valores a diferentes grados de flexión de los sensores, para adaptar el funcionamiento del software a la morfología de la mano de la persona que lo está usando. Finalmente comienza a funcionar el sistema: la mano robótica replica a tiempo real los movimientos que realiza el usuario con cada dedo de forma independiente.

## PALABRAS CLAVE:

Tecnología *wearable*, textiles inteligentes, sensores textiles, piezorresistivo, biomedicina, mano robótica, *Arduino UNO*, *Linqstat MVCF*, sensor de flexión.

## ABSTRACT

Wearable technology, smart textiles and textile sensors are moving exceptionally swiftly and they are continually being developed. Of particular concern is the use of this technology in health sector-focussed devices. Nowadays there are many wearable products in this field and oriented toward many other sectors such as labor, sports or everyday life. Smart watches, pulsometer bands or shirts that are able to regulate body temperature are just a few examples of them. In addition, there are some technologies that will come on the market soon and they are thought to constitute an ideal wearable technology companion, such as 5G and graphene for batteries and sensors.

The aims of this Final Degree Project are to provide a state of the art of wearable technologies and textile sensors, as well as designing and manufacturing a wearable device: a glove for controlling a robotic hand by using textile sensors. In this study, efforts have focused on the search of optimize every single component of the wearable system, for the purpose of achieving a precise and natural movement of the hand. This has been done for a first immersion in the world of prosthetics and medical robotics. Thanks to the designed system, useful applications may arise such as remote handling of hazardous objects, activities for the rehabilitation of patients or as working principle of prosthesis.

The main component of this system is textile pressure sensors that are based on the bending of a piezoresistive material, so that its resistance varies. Another hardware component of this system is the *Arduino* UNO microcontroller, which has been used to design software program and a PCB shield where a regulated batteries circuit and the conditioning circuit are located.

The device operating begins with a calibration system: the software takes values from the sensors at different degrees of tilt, to adapt the operation of software to the hand morphology according to the user. Finally, the device starts working: the robotic hand replicates the user's movements of each finger independently in real time.

## KEYWORDS

Wearable technology, smart textiles, textile sensors, piezoresistive, biomedicine, robotic hand, *Arduino* UNO, Linqstat MVCF, flex sensor.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivaciones	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Metodología	10
1.4. Estructura documento	11
CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA <i>WEARABLE</i> Y SENSORES TEXTILES	13
2.1 Introducción	15
2.2 ¿Qué es la tecnología <i>wearable</i> ? ¿Qué son los textiles inteligentes? Orígenes y evolución	15
2.3 Tipos de <i>wearables</i>	28
2.4 Tipos de sensores textiles inteligentes	34
2.5 Aplicaciones en Biomedicina	38
2.6 Futuro de la tecnología <i>wearable</i>	43
2.7 Importancia de la tecnología <i>wearable</i> en salud	45
CAPÍTULO 3: EJEMPLO DE APLICACIÓN TECNOLOGÍA <i>WEARABLE</i> : GUANTE PARA EL CONTROL DE UNA MANO ROBÓTICA	49
3.1 Introducción	51
3.2 Guante con sensores textiles de flexión: diseño y fabricación	52
3.3 Fabricación de la mano robótica	66
3.4 Diseño del hardware de control	68
3.5 Software	73
3.6 Pruebas de funcionamiento	81
CONCLUSIONES	87
REFERENCIAS	91
ANEXOS	97



## Índice de abreviaturas

<b>EMS</b>	Electroestimulación muscular
<b>EMG</b>	Electromiografía
<b>ECG</b>	Electrocardiograma
<b>IBC</b>	Vestuario biomédico inteligente
<b>IoT</b>	Internet de las cosas
<b>MEMS</b>	Sistemas microelectromecánicos
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>ReDS</b>	Detección dieléctrica remota
<b>TTI</b>	Impedancia transtorácica
<b>VR</b>	Realidad virtual



## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN



## INTRODUCCIÓN

**Wearable Technology** significa literalmente “**Tecnología para llevar puesta**”. Su objetivo es implementar y utilizar las ventajas de la tecnología más novedosa en dispositivos que las personas puedan ponerse y utilizar cómodamente.

Un grupo dentro de la familia de la tecnología *wearable* son los **textiles inteligentes**. La industria textil lleva años reinventándose y gracias a ello, a día de hoy disponemos de productos altamente tecnológicos dentro del sector. La inteligencia de estos materiales reside en los avances tecnológicos que se han desarrollado y han dado lugar a productos con nuevas características o propiedades que aportan beneficios al usuario que lo lleva puesto. Algunos ejemplos de ellos son: camisetas con sensores capaces de monitorizar la actividad cardíaca del usuario, trajes con electrodos a los que se conecta un dispositivo de electroestimulación muscular (EMS) para el desarrollo del ejercicio físico, o ropa que es capaz de ofrecer al usuario variaciones de temperatura para mayor confortabilidad. La posibilidad de disponer de los últimos avances tecnológicos adaptados al día a día de las personas convierte a este sector en uno de los más interesantes y creativos de la industria.

Dada la naturaleza y el contexto de este proyecto, nos interesa hablar también del uso de este tipo de tecnología en el ámbito sanitario. Cuando la tecnología se utiliza al servicio de la salud humana, ésta cobra una importancia especial.

### 1.1 Motivaciones

Este proyecto nace de inquietudes enteramente personales ligadas a mi formación académica. Estas son: el mundo de la ingeniería (en particular la prótesis y robótica), y el de la tecnología *wearable*, ambas aplicadas para desarrollar un proyecto relacionado con el sector de la salud.

Científicos de todo el mundo están trabajando para que las prótesis sean más sensibles, realistas y asequibles. Combinadas, estas características son muy prometedoras para las personas que necesiten productos de este tipo. Cuando pensamos en la tecnología, por lo general la atribuimos a dos sectores: ocio y profesional. Sin embargo, la tecnología aplicada a la salud y la sanidad se centra en un objetivo más amplio y ambicioso: poner la tecnología a disposición del cuerpo humano y su bienestar.

Es por todo ello que he querido unir lo mencionado anteriormente en un sólo proyecto, un guante inteligente capaz de sensor el movimiento de la mano de una persona y gracias a la electrónica y el programa en *Arduino* desarrollado, replicar ese movimiento sobre una mano robótica que realiza el papel de actuador del sistema.

Este proyecto es una primera inmersión en el mundo de las prótesis. Partiendo de éste como base pueden surgir otros con diferentes aplicaciones, como por ejemplo, manipulación a distancia de objetos peligrosos, en el que el usuario que porta el guante se encuentra en una sala segura, y el brazo robótico que replica sus movimientos está en una zona peligrosa realizando algún tipo de acción. Otra aplicación distinta sería utilizar el sistema con fines de rehabilitación, en el que se propone al usuario realizar “retos” utilizando la mano robótica mientras él realiza ejercicios moviendo el guante introducido en su mano lesionada. También se puede utilizar como principio de funcionamiento de una prótesis robótica integrada en un cuerpo humano, utilizando tanto la mano robótica como el software creado e integrándolo con otro tipo de sensor (presión, flexión, EMG...) para que la mano realice las acciones que desea el usuario, además de muchas otras aplicaciones.

## 1.2 Objetivos

Los principales objetivos de este TFG, desde el punto de vista técnico y académico, son:

- El estudio de la tecnología *wearable* a nivel general y de los sensores textiles en particular para realizar una clasificación y un estudio de la actualidad de ese sector.
- La elección de algún sensor, propuesta de una aplicación en el campo de la salud y su ensayo en el laboratorio. En este proyecto se ha seleccionado un tipo de sensor textil piezorresistivo de flexión, capaz de controlar una mano robótica con la ayuda de un microcontrolador.
- La formación en la búsqueda bibliográfica y lectura de fuentes científico técnicas. Redacción de informes.
- La formación en metodología experimental de evaluación y caracterización de sensores.
- El desarrollo del sistema integral trabajando en diferentes campos como por ejemplo: electrónica, robótica, programación y salud como principales.

## 1.3 Metodología

La realización del proyecto se divide en varias fases:

- **Primera fase:** Estudio de en qué consiste la tecnología ponible, análisis de los sensores textiles recogidos en la literatura y las aplicaciones propuestas. En esta fase se ha recogido y analizado la información disponible sobre esta tecnología con la ayuda de las fuentes y bases bibliográficas disponibles en la universidad: web de empresas y literatura científica, técnica y de divulgación.

- **Segunda fase:** Selección de un sensor y propuesta de una aplicación en el campo de la salud. Incluye la definición de la arquitectura del sistema tanto hardware como software, y del entorno tecnológico que ofrece soporte a la aplicación. Así como del entorno experimental.
- **Tercera fase:** Diseño y desarrollo de experimentos en el laboratorio. Que incluye el diseño experimental y la ejecución de las pruebas de usabilidad y caracterización.
- **Cuarta fase:** Redacción de la memoria del trabajo fin de grado.

## 1.4 Estructura del documento

La memoria del trabajo fin de grado que se presenta está dividida en 2 bloques principales. El primero de ellos consiste en la recopilación, estudio y desarrollo de información relacionada con la tecnología *wearable*, textiles inteligentes y sensores textiles. Esta información se encuentra en los diferentes apartados que componen el capítulo 2 del documento.

Por otro lado, en el segundo bloque principal se desarrolla el estudio, diseño, fabricación y pruebas de funcionamiento de la aplicación elegida para este trabajo de fin de grado. Consiste en un guante inteligente compuesto por sensores textiles de flexión capaces de medir el grado de movimiento de la mano de una persona y replicarlo sobre una mano robótica. Todos los detalles llevados a cabo durante el desarrollo del proyecto quedan recogidos en el capítulo 3.

Para finalizar, se recogen las conclusiones obtenidas y, por último, como información complementaria, se recogen una serie de anexos relacionados con el manual de uso del sistema y los códigos de los programas de *Arduino*: uno diseñado para la obtención de la curva característica de los sensores, y otro para el funcionamiento del sistema.



## CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍA *WEARABLE* Y SENSORES TEXTILES



## 2.1 Introducción

Este capítulo se centra en el estudio y revisión de varias tecnologías que están en pleno auge y en desarrollo a día de hoy: la **tecnología *wearable*** (o “tecnología ponible”), los **textiles inteligentes** y los **sensores textiles**. A continuación se explica el origen y evolución a lo largo de la historia de este tipo de tecnologías, se realiza una clasificación de ellas, se destaca su importancia y se recogen numerosas aplicaciones donde las podemos encontrar. Cabe destacar que uno de los ámbitos en el que estas tecnologías cobran especial importancia es el de la salud. Éste es el sector sobre el que vamos a centrar nuestro desarrollo en el presente documento.

Una gran parte de *wearables* están desarrollados gracias al uso de los sensores textiles. Éstos son un tipo de sensores muy presentes en las tecnologías ponibles, por lo que también se recoge toda la información necesaria para conocerlos y saber cuáles son los más adecuados para la aplicación propuesta.

## 2.2 ¿Qué es la tecnología *wearable*? ¿Qué son los textiles inteligentes?

### Orígenes y evolución

#### **Tecnología *Wearable*:**

La tecnología *wearable* es el conjunto de dispositivos electrónicos y aparatos que podemos llevar puestos, es decir, que podemos incorporar en alguna parte de nuestro cuerpo de forma que interactúan continuamente con el usuario y/o con otros dispositivos para poder realizar alguna función, o que poseen una característica concreta, siempre aportando un beneficio al usuario.

Se puede decir que esta tecnología está cada vez más presente en nuestras vidas gracias a la incorporación de relojes inteligentes, zapatillas de deporte que incorporan GPS, lentillas que controlan el nivel de glucosa en nuestro cuerpo, pulseras que miden nuestros pasos diarios y la actividad de nuestro corazón, anillos con geolocalización, etc., como se puede ver en la *Figura 1*. Estos dispositivos pueden actuar por sí solos, poseen una pantalla donde se pueden leer los datos obtenidos de sus sensores, o pueden comunicarse con otros tipos de dispositivos por medio de Bluetooth o WIFI, como por ejemplo estar conectados con teléfonos móviles. Existe un modelo de Bluetooth llamado *Bluetooth Low Energy* [1] (BLE) que es usado habitualmente en dispositivos *wearables*. La principal característica del BLE es la de poder transmitir datos provenientes de sensores con un bajo consumo de energía. Esto es muy valioso para pequeños dispositivos que incorporan sensores, ya que el tamaño y consumo de la batería es un hándicap que suele jugar en contra de cualquier fabricante de dispositivos *wearables*.



Figura 1 - Ejemplos de tecnología *wearable*.

Fuente: "Design of wearable devices: Make versus buy." [Online]. Available: <https://www.electronicsspecifier.com/blog/design-of-wearable-devices-make-versus-buy>.

Grandes empresas como *Apple* o *Google* han estado trabajando durante los últimos años en el desarrollo de dispositivos "ponibles". En el año 2015 *Apple* creó numerosos puestos de trabajo para ingenieros especializados en el campo de la salud. Además, en estas fechas se lanzó por primera vez en el mercado su famoso reloj inteligente "*Apple Watch*" que, a día de hoy, se ha desarrollado ya su cuarta versión. Este reloj es capaz de ofrecer "un electrocardiograma en tu muñeca, notificaciones de frecuencia cardíaca alta o baja y de ritmo irregular, detección de caídas y Emergencia SOS" [2], entre otras prestaciones, según la página oficial "*apple.com*".

Estos son sólo algunos ejemplos de todo lo que se ha podido ver en los últimos años.

### **Textiles inteligentes:**

Los e-textiles o textiles inteligentes son aquellos tejidos fabricados con materiales que presentan diferentes características o propiedades, como pueden ser, materiales conductivos, con nanopartículas de gel, hidrófobos, con propiedades eléctricas, etc., a los que se les puede incluir o no componentes electrónicos cosidos en ellos. Estos procesos de fabricación dan como resultado confecciones capaces de alterar su naturaleza o modificar algunas de sus propiedades como respuesta a la acción de diferentes estímulos externos, físicos o químicos. De esta forma, se pueden llegar a obtener una serie de beneficios para los usuarios.

En la *Figura 2* podemos ver una camiseta denominada textil inteligente a la que se le han incorporado sensores textiles para la medición del pulso. Como se puede observar en la imagen, han fabricado un par de electrodos en forma de banda alimentados por un pequeño dispositivo que puede ser conectado y desconectado de la camiseta, dotándole de la capacidad de ofrecer monitorización a tiempo real, gestión de datos, obtención de indicadores (*Big Data*) y visualizar los datos y análisis guardados.

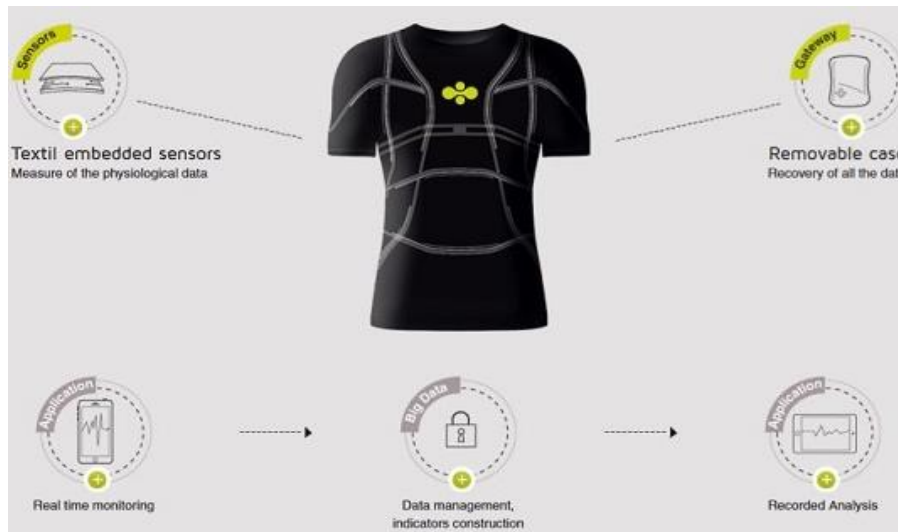


Figura 2 - Ejemplo de aplicación de textiles inteligentes.

Fuente: "Smart textiles market to reach \$130 billion by 2025." [Online]. Available: <https://spanish.globalsources.com/gsol/I/Mens-sports/a/9000000140785.htm>.

### Origen y evolución de la Tecnología *Wearable*:

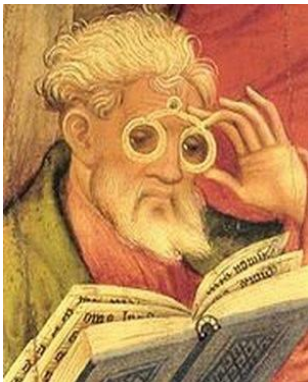


Figura 3 - Salvino D'Armato.

A lo largo de la historia, podemos hablar del origen de los *wearables* fijándonos en las primeras gafas de ver que se inventaron. Alrededor de 1284, Salvino D'Armato degli Armati [3] (1258-1312) nacido en Florencia, Italia, inventó las gafas de ver utilizando dos cristales convexos, como se puede ver en la *Figura 3*. Fue la primera vez que una persona inventaba un objeto "ponible" del que obtenía beneficio debido a las características del material usado.

Fuente: "Salvino D'Armato - Inventor de gafas." [Online]. Available: <http://www.glasseshistory.com/glasses-inventor/salvino-d-armato/>.

Dos siglos más tarde, se fabricó el primer reloj. Alrededor de 1500, el inventor Peter Henlein [4] (1485-1542), nacido en Alemania, inventó un reloj para llevar puesto como un colgante. Posteriormente, alrededor del 1600, el reloj collar fue reinventado y se fabricó en forma de brazalete hasta que finalmente pasó a ser colocado en la muñeca como lo hacemos a día de hoy. En la *Figura 4* se puede ver un ejemplo del reloj collar de Henlein.



Figura 4- Reloj collar de Henlein.

Fuente: "File:Henlein Taschenuhr.jpg," Wikipedia, le encyclopedia libere.

Hablamos del origen de la tecnología *wearable* “moderna” desde los 70 hasta los años 90. En esta época se estuvo trabajando en numerosas invenciones. Fue en la década de los 90 cuando se intentaba conseguir transformar el ordenador en un dispositivo *wearable* [5], [6]. Este nuevo concepto residía en la idea de crear un ordenador que las personas pudiesen llevar puesto y el cual los sumergiría en una realidad tecnológica, pero esta invención no tuvo gran aceptación.

Fueron los primeros relojes-calculadora, los denominados ordenadores de pulsera, los que entre 1972 y 1980 revolucionaron el mercado. Consiguieron dar una nueva perspectiva a los dispositivos que en esa época ya existían pero aún podían convertirse en objetos más avanzados tecnológicamente hablando. En la *Figura 5* se muestra el primer reloj fabricado capaz de hacer operaciones con calculadora y marcar la hora en digital. Fue el reloj de la empresa *Pulsar* [7] (anteriormente llamada Hamilton Watch Company), el cual se vendía por 2.100\$ y después de él vinieron otros muchos de su estilo.



Figura 5 - Reloj Pulsar

Fuente: “Los 5 Relojes Más Curiosos Precursores del Smartwatch | Ciberwatch.es - Blog de Relojes de marca.” [Online]. Available: <https://www.ciberwatch.es/blog/noticias/los-5-relojes-mas-curiosos-precursores-smartwatch/>. [Accessed: 22-Sep-2019]

Las empresas *Seiko* y *Casio* fueron las que inventaron los relojes más conocidos a día de hoy. La primera de ellas sacó al mercado un reloj calculadora con un teclado de grandes dimensiones, y en 1982 inventó el primer reloj conectado de la historia. Éste se conectaba a la televisión permitiendo sincronizar diferentes frecuencias de TV, disponía de una pantalla LCD y otra pantalla pequeña para visualizar la hora. Sin embargo, fue el reloj de la empresa *Casio* el más conocido y vendido de la historia que incorporaba la función de calculadora. En la *Figura 6* se pueden ver los ejemplos de los relojes de la empresa *Seiko* mencionados.

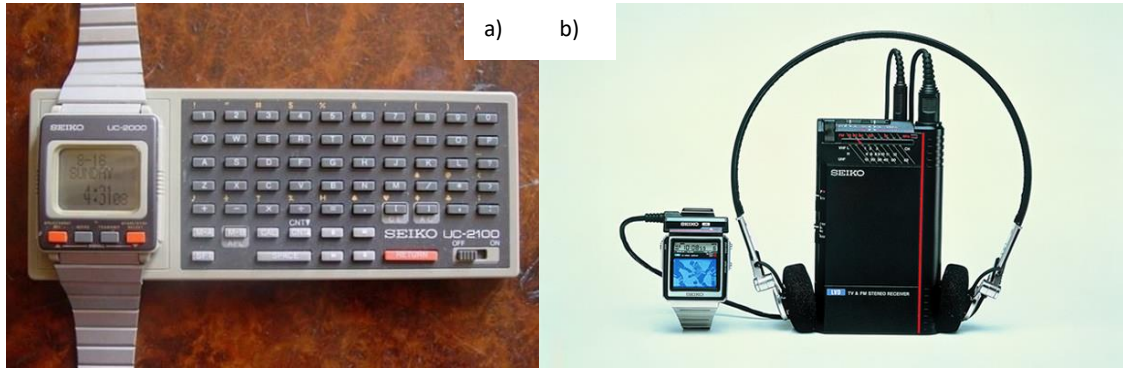


Figura 6 - a) Reloj *Seiko* calculadora; b) Reloj TV

Fuentes: J. Pastor, “(No Title),” Xataka, 2014;  
 “La historia de los wearables: 500 años vistiendo tecnología.” [Online]. Available:  
<https://elandroidelibre.espanol.com/2016/09/historia-de-los-wearables.html>. [Accessed: 22-Sep-2019].

La tecnología *wearable* ha evolucionado desde finales del siglo XX y durante lo que llevamos de siglo XXI. Algunos ejemplos del avance han sido la aparición de televisores con gafas 3D, bandas pulsómetro, relojes inteligentes o prótesis (ver *Figura 7*), entre otros muchos.[8]

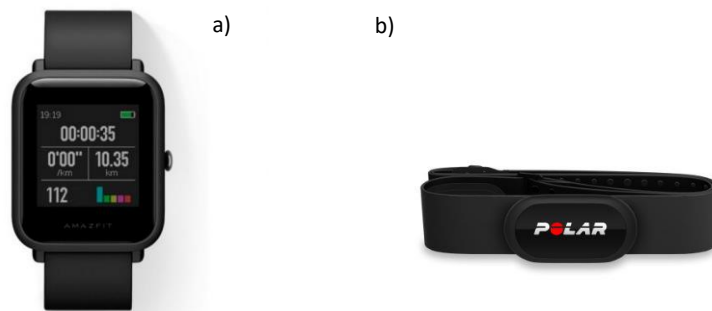


Figura 7 – a) Reloj inteligente; b) Banda pulsómetro.

Fuente: Banda Pulsómetro Polar H10® - Análisis - PulsómetroSinBanda.com.” [Online]. Available:  
<https://www.pulsometrosinbanda.com/polar-h10-pulsometro-analisis/>.

En el siglo XXI se han inventado numerosos *wearables* que utilizan sensores ópticos de frecuencia cardíaca para monitorizar el estado de nuestro pulso. Relojes, pulseras y bandas son algunos ejemplos de *wearables* que utilizan este tipo de tecnología y son cada vez más conocidos entre la población. El primer campo en el que se utilizó el control de la frecuencia cardíaca fue en el deportivo o de entrenamiento, pero cada vez más personas utilizan a diario uno de los dispositivos mencionados para realizar seguimientos de su actividad del corazón. Estos dispositivos funcionan gracias a la tecnología de la fotopletismografía, que consiste en enviar a través de uno o más LEDs una luz verde hacia nuestra piel y gracias a un sensor óptico conocer la cantidad de luz que es absorbida. La sangre es roja, lo cual quiere decir que refleja la luz roja y absorbe

el resto de frecuencias. Cuando el corazón late, más sangre pasa por nuestro cuerpo, por lo que absorbe más luz verde. Parpadeando un centenar de veces por segundo se consigue conocer nuestra frecuencia cardíaca. En la *Figura 8* se puede ver una representación gráfica de la tecnología de la fotopletimografía. En ese caso se unen dos diodos LED para enviar la luz y un sensor óptico central para recoger la luz reflejada. Según *Apple*, ellos también utilizan el tipo de luz infrarroja para cuantificar el número de pulsos del corazón por segundo. Estos tipos de dispositivos, usando la tecnología de la fotopletimografía han sido durante lo que llevamos del siglo XXI el detonante para el desarrollo de nuevas tecnologías y productos gracias a la acogida y el éxito que ha tenido entre la población. Algunas empresas que venden sensores ópticos para dispositivos con la tecnología de la fotopletimografía son *Valencell* [9], *Philips* [10] y *Osram* [11].

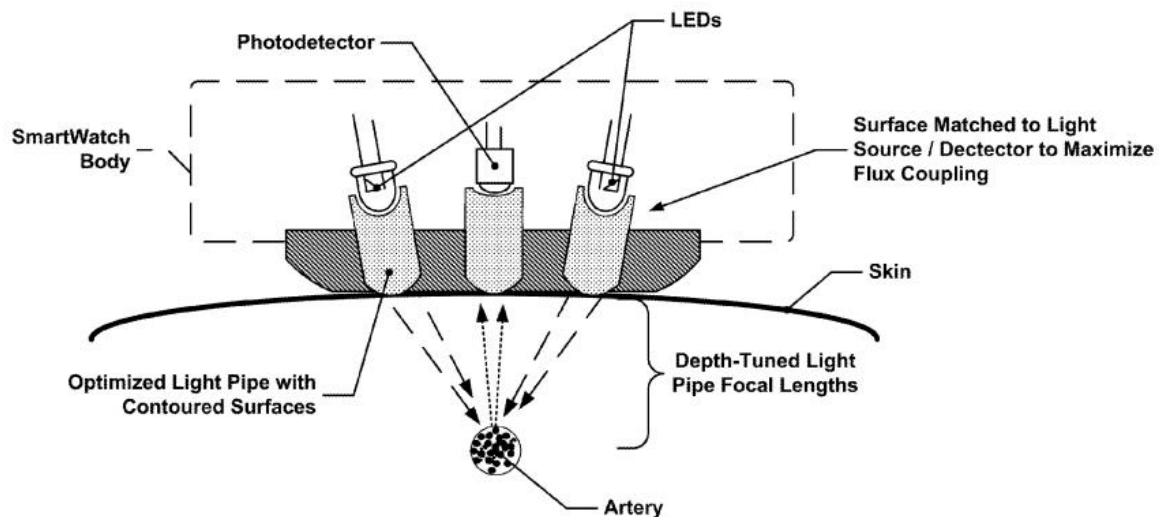


Figura 8 - Uso de la fotopletimografía por un reloj de pulsera. Imagen de la patente creada por la empresa *Fitbit* en 2015.

Fuente: "A A \* A \* A," 1991

Con la evolución de los teléfonos móviles o "*smartphones*" nace el debate sobre si deben ser considerados dispositivos *wearables* o no. Como hemos definido en el inicio de este capítulo, la principal condición para clasificar a un dispositivo como *wearable* es que éste sea "ponible". Los teléfonos móviles han evolucionado a una velocidad vertiginosa y pueden ser un complemento ideal para nuestros *wearables*, pero hoy en día no son productos diseñados para llevar puestos, si no accesorios para llevar como un complemento que facilitan alguna de nuestras actividades cotidianas. No todos los dispositivos portátiles entran en la familia de los *wearables*.

La tecnología *wearable* fue nombrada en este año 2019 como primera tendencia para el acondicionamiento físico por la revista Salud y Bienestar de la Universidad Americana de Medicinas del Deporte [12]. Además, esta tecnología está en continuo

desarrollo. Las empresas tratan de integrar la tecnología *wearable* cada vez más en los teléfonos inteligentes y en sus aplicaciones asociadas, de manera que resultan más atractivas para el usuario.

Como se ha comentado antes, existen grandes compañías como *Fitbit* o *Apple* que no se dedican solamente a ofrecer servicios como la monitorización de la actividad cardíaca, GPS, ingesta de alimentos, etc., que se sincronizan con los teléfonos inteligentes, sino que también ofrecen productos como relojes para hacer deporte. Los datos recopilados ponen de manifiesto la gran y creciente popularidad de la tecnología *wearable* [12]:

En Canadá tomaron una muestra representativa de 1215 adultos que indicó que un 38% de las personas hacen seguimiento de su actividad física a través de dispositivos. En otra muestra de adolescentes finlandeses, 1190 de ellos de un total de 4413 (27%) utilizan *smartwatch* o algún dispositivo para el registro de pulsaciones. Sin embargo, esta tecnología no es sólo popular entre la gente joven. En Suiza, el 20.5% de un grupo de adultos de  $\geq 50$  años de edad utilizan dispositivos móviles para hacer seguimiento de su actividad física. De modo que con estos datos entendemos que la tecnología *wearable* es una herramienta que ayuda a las personas a interesarse más por la actividad física y, por tanto, es capaz de mejorar la salud en personas que tienen algún tipo de afección crónica, e incluso aumentan los niveles de actividad física en personas saludables.

En otro estudio se examinó la capacidad de un reloj de deporte para aumentar la actividad física en adultos con sobrepeso durante 6 semanas, y también se examinó si el uso de mensajes motivacionales/recordatorios en el móvil influiría aún más en el aumento de la actividad física. Este estudio reveló que el uso del reloj consiguió aumentar el nivel de actividad física en esas personas, sin embargo el uso de SMS no tuvo ningún impacto, después de una semana de seguimiento.

Con lo cual, un reloj de deporte podría ser independientemente una manera de contribuir a aumentar la actividad física de una persona. Sin embargo, se sabe que el uso de estos relojes debe combinarse con intervenciones conductuales que incluyen el establecimiento de metas y algún estímulo para aumentar la actividad física.

¿Cómo ayuda la tecnología *wearable* a alguien con una enfermedad crónica a aumentar su actividad física?

Por ejemplo, los relojes *fitness* permiten a los usuarios ver su actividad física en tiempo real y tener acceso constante a esta información en sus muñecas, por lo que emplean el autocontrol de su actividad física. Gracias al autocontrol, los usuarios se centran en

aumentar su actividad física o en cambiar su ingesta de alimentos, y esto puede tener un efecto beneficioso sobre sus hábitos alimentarios, entre otros.

La tecnología trabaja para aumentar la conciencia del usuario en su actividad física diaria y en motivarle para cambiar su comportamiento y lograr una determinada meta. Esta motivación para aumentar la actividad física con la tecnología *wearable* también se ha demostrado en personas con enfermedades crónicas. Un estudio reciente realizó un análisis en 29 participantes con enfermedad crónica, quienes vieron que el uso de esta tecnología los motivó a ser más activos. Un ejemplo de cómo funciona este proceso se puede observar en la *Figura 9*. En ella se puede observar que un usuario que posee un dispositivo *wearable* de monitorización realiza diferentes acciones como actividad diaria, comer, ejercicio físico y dormir. Mientras realiza estas acciones el *wearable* trabaja recopilando datos por medio de sus sensores y enviándolos vía Bluetooth a su dispositivo móvil. En él los datos son subidos a la nube por medio de WIFI donde se procesarán para ofrecer al usuario valiosas métricas sobre su actividad, como por ejemplo las calorías consumidas, resumen gráfico de dónde ha realizado su recorrido gracias al GPS, número de pulsaciones por minuto, etc. Esta información recorrerá el mismo camino de subida a la nube pero a la inversa para que sea visible para el usuario.

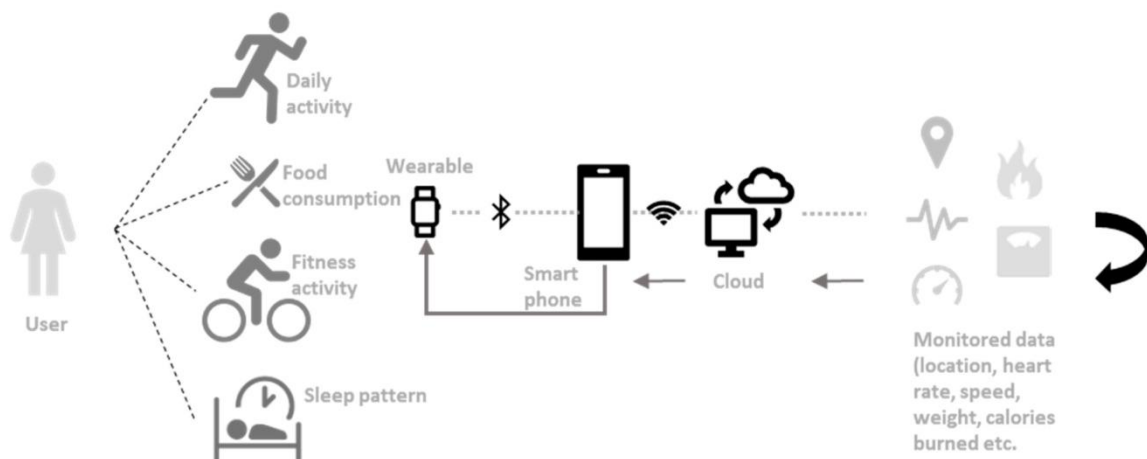


Figura 9 – Diagrama gráfico en el que se puede ver el proceso completo de adquisición y procesamiento de datos de un dispositivo *wearable* e un usuario.

Fuente: G. Aroganam, N. Manivannan, and D. Harrison, "Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications," *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 19, no. 9. NLM (Medline), 28-Apr-2019

Ellingson et al. [12] demostró en individuos sanos que los dispositivos para el registro y seguimiento de los constantes vitales durante el ejercicio pueden tener efectos beneficiosos sobre la actividad física aunque estos resultados varían según el individuo,

resaltándose aún más que, como se explicaba antes, es posible que estos dispositivos deban usarse en combinación con intervenciones conductuales personalizadas para el usuario.

Además de ayudar a la fijación de objetivos y el autocontrol, la tecnología *wearable* puede ser una herramienta potencial para facilitar las prescripciones de médicos y profesionales en relación con la actividad física, y podría ser una herramienta apropiada para usar en el contexto de enfermedades crónicas. A pesar de las investigaciones de alta calidad que respalden el uso de tecnología *wearable* en este contexto, y a pesar de los desafíos actuales, se cree que el futuro de la tecnología *wearable* en relación con la actividad física es realmente emocionante y prometedor [12].

### **Origen y evolución de los textiles inteligentes:**

Los textiles siempre han estado presentes y han acompañado al ser humano desde los orígenes de la humanidad, momento desde el que han ido transformándose y desarrollándose junto con él. Los textiles cambian según la cultura, se van transformando con la moda, y se van adaptando para hacer frente a las necesidades de un estilo de vida que está en constante transformación. Durante siglos se diseñaban prendas textiles en función de las fibras conocidas hasta el momento, las cuales limitaban la confección y el resultado final. Sin embargo, en el siglo XIX hubo un cambio muy importante: las prendas no se confeccionaban en función de las fibras existentes, si no que se fabricaban unas u otras fibras en función de la prenda que se quería confeccionar.

Durante el siglo XX las empresas trabajan en el desarrollo de textiles inteligentes, capaces de monitorizar los signos vitales de las personas, o capaces de cambiar sus propiedades según el medio ambiente en el que se encuentran. La aparición de nuevos materiales en el sector textil tiene su momento clave en la década de los 80 en Japón [13], instante en el que se produjo el lanzamiento de las fibras *Shingosen*, que significa “nuevos sintéticos”. Gracias al desarrollo de nuevos métodos de producción de las fibras tradicionales se pudo llegar, primero, a la obtención de microfibras, y luego de ultra-microfibras.

En el sector textil hoy día podemos diferenciar algunas de las etapas, como se muestra en la *Figura 10*, marcadas por la evolución de las necesidades y exigencias de las personas respecto a los materiales textiles. Estas etapas, y los diferentes criterios que las marcan se resumen en el siguiente cronograma:

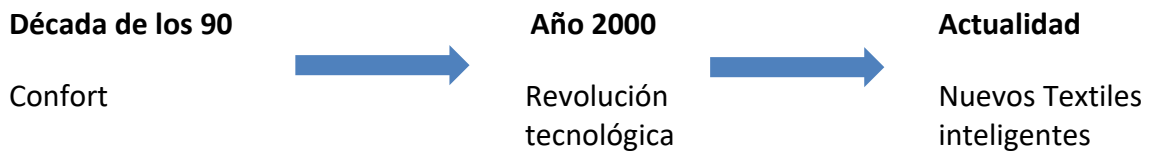


Figura 10 – Cronograma sobre la evolución del sector textil.

Fuente: elaboración propia.

Con la evolución de la industria y debido a las diferentes etapas por las que ha pasado, empezaron a surgir nuevas denominaciones para los materiales textiles, algunos ejemplos son: ecotextiles, nanotextiles, *medical textiles*, *sport textiles*, etc. Todos ellos se engloban en la familia de los textiles inteligentes.

- **Ecotextiles:** son aquellos que tienen claramente un mayor rendimiento que los demás. Son obtenidos a partir de moléculas de materiales naturales y sintéticos a los que se les incorporan, por ejemplo, nanotubos de carbono para dotar a dichos materiales de una mayor fortaleza y hacerlos más resistentes. La creación de ecotextiles trata de buscar un desarrollo más sostenible de los mismos, es decir, utilizar mucha menos cantidad de materiales y obtener otros con un rendimiento superior [14].
- **Nanotextiles:** son los materiales que surgen mediante la integración de nanopartículas sintéticas en las fibras textiles, o la aplicación de las nanopartículas como un recubrimiento sobre la superficie. Esto hace posible mejorar las funcionalidades de los textiles ya existentes, o bien fabricar textiles con propiedades totalmente nuevas [15].
- **Medical textiles:** Martin W. King define estos textiles como “estructuras compuestas por fibras textiles diseñadas para usarse en ambientes biológicos específicos, donde su rendimiento depende de sus interacciones con células y fluidos biológicos, medido en términos de biocompatibilidad y bioestabilidad” [16].
- **Sport textiles:** igual que en los ejemplos anteriores, estos son textiles creados a partir de la incorporación de nanopartículas a las fibras textiles convencionales obteniendo claras mejoras en las propiedades de las prendas resultantes, esta vez aplicadas al ámbito deportivo. Con ellos se busca sobre todo proporcionar textiles deportivos con una buena absorción de humedad y una baja fricción [17].

Como se ha explicado en el inicio de este capítulo, los textiles inteligentes pueden incorporar o no componentes electrónicos. Esto fue posible gracias a la miniaturización de la electrónica; de esta forma se han podido desarrollar dispositivos que se integran con los tejidos de las prendas que, conservando las exigencias de flexibilidad y sistemas de limpieza, aportan funciones inteligentes. Esta revolución ha conseguido

que los dispositivos puedan formar parte de las prendas y otros textiles integrando nuevas funciones desde la electrónica [18], [19].

Un ejemplo concreto de ello es “*Arduino Lylypad*”, cosido con hilo conductor sobre un tejido elástico, lo cual se hace relativamente fácil gracias a la distribución de sus pines [20], tal y como se puede ver en la *Figura 11*.

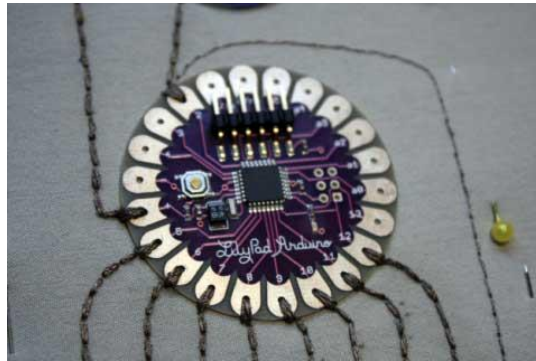


Figura 11 - Ejemplo de textil inteligente. *Arduino Lylypad*.

Fuente: “Flora y LilyPad cómo crear proyectos para Wearables con Arduino,” Programar fácil con Arduino, 2017. [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/flora-lilypad-wereables-arduino/>

### **Actualidad en el sector:**

Tengo la suerte de poder hablar de la actualidad y el futuro cercano de la tecnología *wearable* y los textiles inteligentes desde la propia experiencia, y esto es porque este año he asistido a la feria más importante de este sector llamada *TechTextil & TechProcess* [21]. Esta feria se celebra en la ciudad de Frankfurt cada 2 años y reúne a las empresas más importantes en el desarrollo de textiles inteligentes. Este año la gran mayoría de las presentaciones estaban dirigidas a unos sectores específicos: automoción, seguridad laboral, hogar, “ciudad inteligente” y medicina.

Algunos de los productos más destacados en la feria fueron:

- Tejidos que incorporan luces con fibras ópticas completamente lavables: uno de ellos fue el producto desarrollado por la empresa alemana *flt-licht* [22], que es una fábrica de productos para los sectores de la automoción, hogar y moda con luz. Por ejemplo, la chaqueta que se muestra en la *Figura 12* incorpora fibra óptica con luz de color verde.



Figura 12 – Chaqueta fabricada por la empresa alemana *flt-licht* que contiene luces de fibra óptica.

Fuente: “Light clothing - Leuchtkleidung.” [Online]. Available: <https://flt-licht.de/index.php/en/home-living-englisch/light-clothing>. [Accessed: 22-Sep-2019].

- Electrodoos impresos con silicona conductora sobre tejidos: este tipo de productos están orientados sobre todo al sector de la electroestimulación muscular (EMS). *Antelope* [23] es una empresa que desarrolla y fabrica dispositivos y trajes de electroestimulación y utiliza los electrodoos de silicona expuestos en esta feria para sus trajes, un ejemplo de ellos se puede ver en la *Figura 13*.

Es un material con baja impedancia y tiene las características de ser elástico junto al tejido estructural de la chaqueta, de poco grosor y muy liviano. La función de estos electrodoos es recibir corriente eléctrica generada por un dispositivo de EMS a través de cables que recorren el traje hasta la posición de estos electrodoos. Los cables utilizados pueden ser cables textiles y elásticos o cables convencionales adaptados a este sector. La unión de ambos tipos de materiales la realizan gracias a la tecnología “*transfer*”, que consiste en utilizar presión y calor para unir, en este caso, la silicona que forma el electrodo con la prenda textil. En la *Figura 13* se puede ver cada una de las partes de la que está compuesto el traje EMS de la marca *Antelope*.

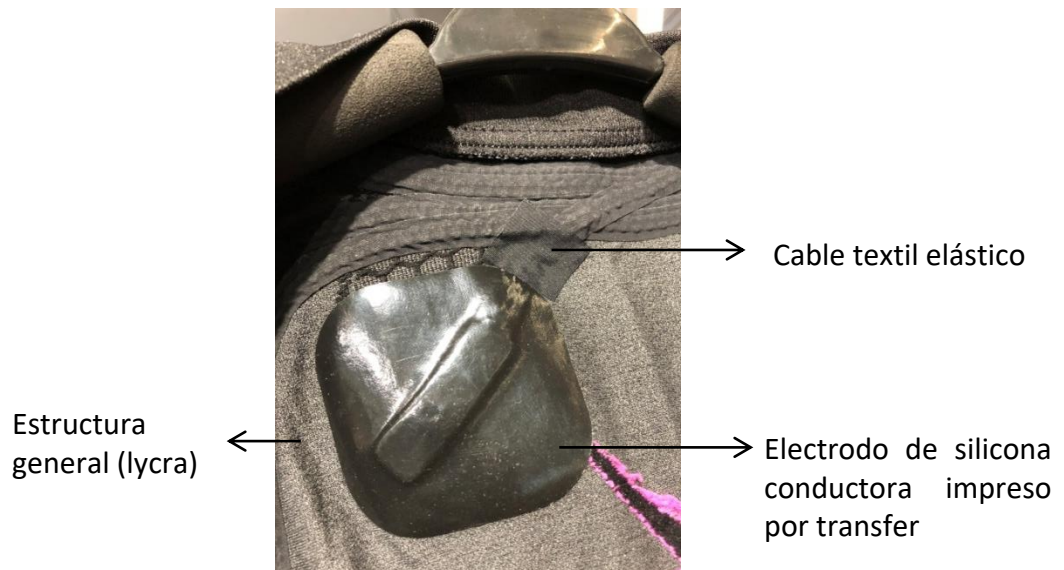


Figura 13 – Foto tomada de cerca de un electrodo en un traje EMS fabricado por la empresa *Antelope*.

Fuente: elaboración propia.

La empresa *Antelope* [23] nació en *Indiegogo*, una página web dedicada al *crowdfunding*. En ella *Antelope* consiguió recaudar un total de 1.468.473€ vendiendo su sistema de electroestimulación a 1712 personas durante su periodo de recaudación.

- Cables elásticos cubiertos de algodón/gel: en su interior están formados por una tinta metálica conductiva y los recubre un gel o algodón, como se puede ver en la *Figura 14 a)* y *14 b)*. Son capaces de expandirse 3 veces su tamaño y son ideales para utilizarlos en prendas textiles.

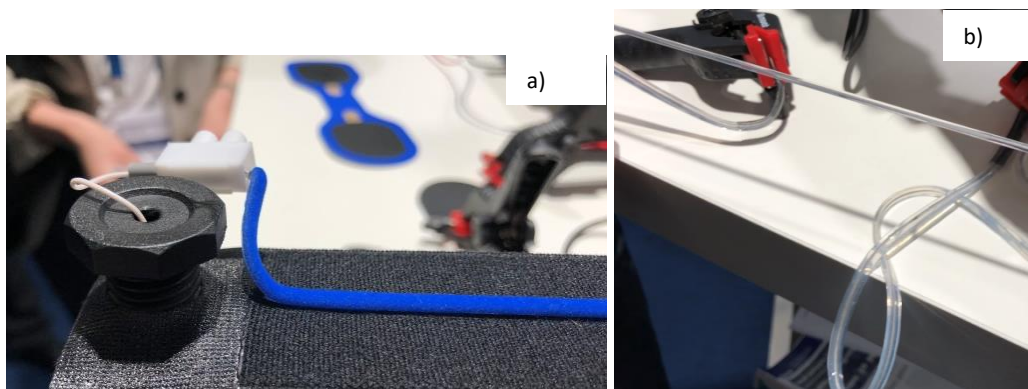


Figura 14 - a) Cable elástico recubierto de algodón sobre un tejido color negro; b) Foto tomada del cable recubierto por gel.

Fuente: elaboración propia.

- Nuevos materiales *non-woven* [24] cuya traducción es “textiles no tejidos”. Estos textiles son fabricados, no por los métodos habituales de costura, sino por procedimientos mecánicos, térmicos o químicos, sin necesidad de convertir las fibras en hilo. Tienen numerosas aplicaciones en los sectores de la automoción, hogar-decorativo y construcción.

De cara al futuro y a la evolución se puede decir que la industria textil y tecnología *wearable* han comenzado el siglo XXI con una gran evolución, lo cual también se debe al evidente avance científico y tecnológico de los últimos años. Los aportes de varias ciencias hacen que se prevean descubrimientos muy novedosos en un futuro cercano. Con la innovación de los productos de la industria textil, y con el importante papel que juegan los avances en microelectrónica, biología y nanotecnología, tenemos la gran oportunidad de aportar productos extraordinarios que se integren como materiales innovadores, gracias a los desarrollos en I+D.

### 2.3 Tipos de *wearables*

Como hemos comentado en el apartado anterior, los *wearables* son una nueva generación de dispositivos inteligentes. La tecnología que hasta ahora podíamos encontrar en un ordenador de repente podemos llevarla puesta, por ejemplo, en nuestra muñeca. Son complementos conectados con una función tecnológica que aporta un valor añadido al usuario.

Las tecnologías *wearables* pueden entenderse mejor clasificando los tipos de datos que se recopilan [25], como se puede ver en la *Figura 15*.

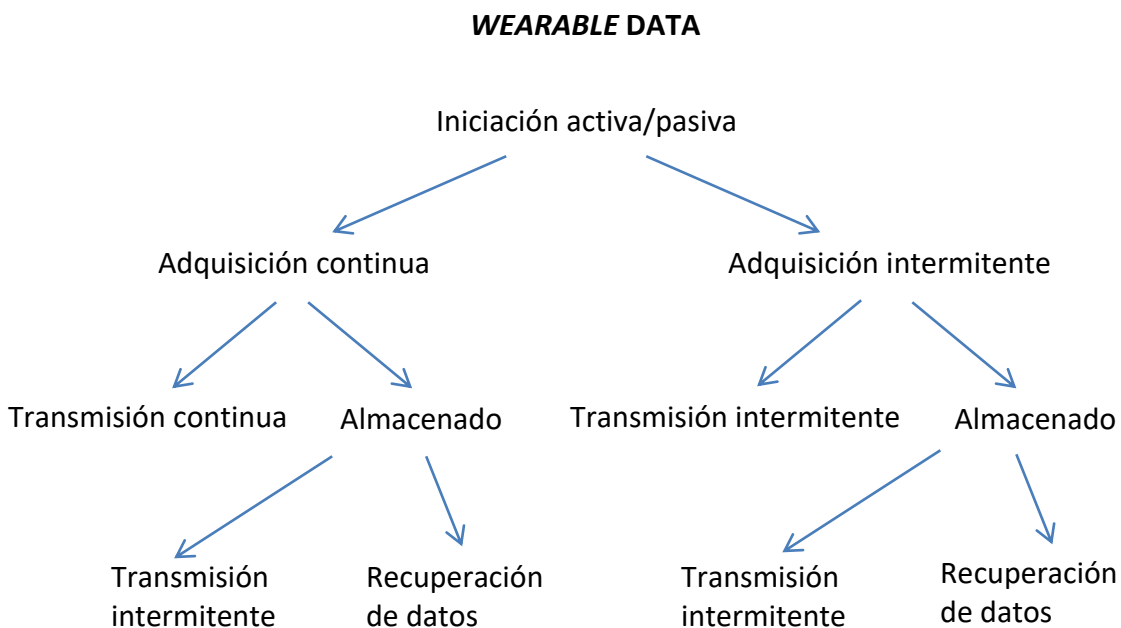


Figura 15 –Diagrama en el que se muestra las formas en que los dispositivos *wearables* gestionan los datos.

Fuente: J. M. Pevnick, K. Birkeland, R. Zimmer, Y. Elad, and I. Kedan, "Wearable technology for cardiology: An update and framework for the future," *Trends in Cardiovascular Medicine*, vol. 28, no. 2. Elsevier Inc., pp. 144–150, 01-Feb-2018.

La recopilación de datos puede requerir la participación activa del paciente para que el dispositivo adquiera datos y luego se puedan retransmitir en tiempo real o cargarse desde una fuente.

Alternativamente, algunos dispositivos no requieren iniciación activa del paciente y pueden recopilar datos pasivamente. Por ejemplo, un dispositivo *wearable* obtendría de forma continua o intermitente datos para transmitirlos, almacenarlos y luego cargarlos.

Idealmente, los dispositivos *wearables* proporcionarán datos para ofrecer apoyo para la toma de decisiones y ofrecer terapias integradas. Incluso para los dispositivos que no ofrecen terapia incorporada, los datos que se generan pueden ser diagnósticos, pronósticos, informativos del efecto del tratamiento o de utilidad clínica incierta, como se muestra en el esquema de la *Figura 16*:

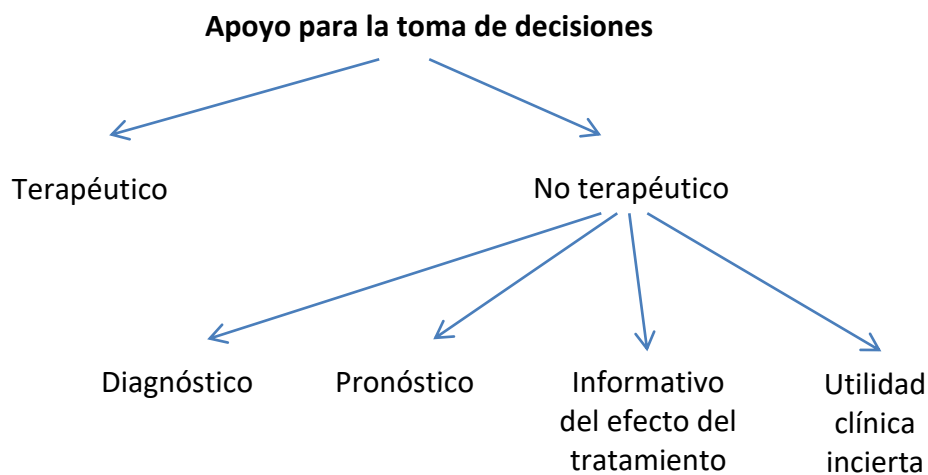


Figura 16 – Sistema de apoyo para la toma de decisiones derivado de los datos obtenidos de los dispositivos *wearables*.

Fuente: J. M. Pevnick, K. Birkeland, R. Zimmer, Y. Elad, and I. Kedan, “Wearable technology for cardiology: An update and framework for the future,” *Trends in Cardiovascular Medicine*, vol. 28, no. 2. Elsevier Inc., pp. 144–150, 01-Feb-2018.

Además, vamos a realizar otras 2 clasificaciones diferentes para este tipo de dispositivos.

**Wearables** en función de la **parte del cuerpo en el que se pone**:

- **Gafas inteligentes:** fueron prácticamente los primeros *wearables* realmente potentes en desarrollarse. Existen muchas aplicaciones, como en educación, turismo, medicina o marketing. Ver *Figura 17 a*).

- **Relojes inteligentes:** resultan una buena opción para llevar siempre encima, como reloj, como lector de mensajes o mails, o incluso para monitorizar nuestra actividad. Ver *Figura 17 b*).
- **Pulseras y anillos inteligentes:** son los *wearables* más sencillos y los primeros en salir al mercado, cuyas funcionalidades son reducidas. Aunque cada vez están desarrollándose más funciones en ellos. Ver *Figura 17 c*).
- **Ropa inteligente:** desde chaquetas que se adaptan a los cambios del tiempo y monitorizan nuestro pulso al hacer deporte, hasta camisetas con aire acondicionado incorporado o LEDs para ser vistos por la noche. Ver *Figura 17 d*).
- **Calcetines inteligentes:** miden nuestro gasto calórico para tener una dieta equilibrada y un estilo de vida saludable. Ver *Figura 17 e*).

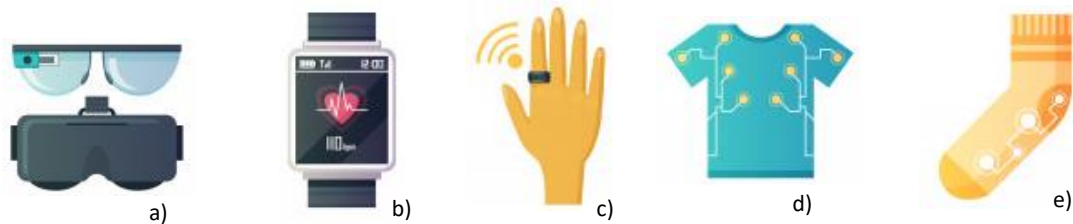


Figura 17 - a) Gafas inteligentes; b) Reloj inteligente; c) Anillo inteligente; d) Ropa inteligente; e) Calcetines inteligentes.

Fuente: “Colección de iconos planos de dispositivos portátiles de tecnología | Descargar Vectores gratis.” [Online]. Available: [https://www.freepik.es/vector-gratis/coleccion-iconos-planos-dispositivos-portatiles-tecnologia\\_4005699.htm](https://www.freepik.es/vector-gratis/coleccion-iconos-planos-dispositivos-portatiles-tecnologia_4005699.htm). [Accessed: 22-Sep-2019].

Algunos de los productos destacados dentro del grupo de relojes inteligentes son los de la marca *Samsung* [26], cuentan con más de 10 modelos diferentes y sus precios en la página oficial oscilan entre 229€ y 469€. El *smartwatch* Samsung “*Galaxy Watch Active2*” estará disponible en el mercado en los próximos meses. Tiene capacidad para introducir una tarjeta SIM, se puede utilizar bajo agua, tiene GPS disponible para monitorizar tu entrenamiento y ofrece registro de las calorías consumidas y monitorización del ritmo cardíaco. Incorpora 8 diodos junto al sensor óptico para un mejor control de la frecuencia cardíaca. En la *Figura 18* se muestra el reloj.

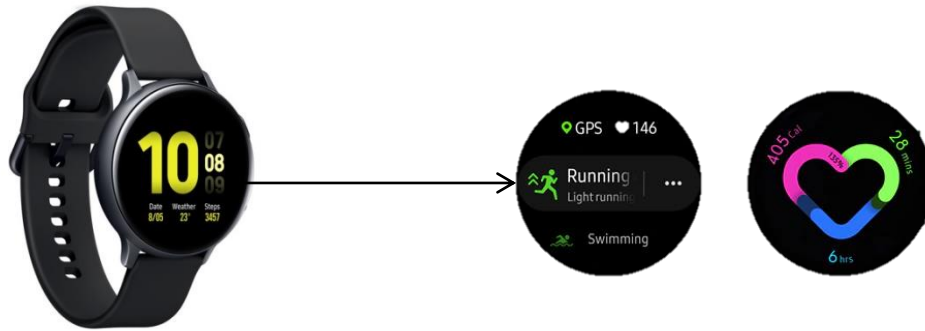


Figura 18 - Smartwatch Samsung Galaxy Watch Active2 y dos de sus pantallas donde se muestran métricas del usuario.

Fuente: “Mejores Smartwatch y Wearables | Samsung España.” [Online]. Available: <https://www.samsung.com/es/wearables/all-wearables/?smart-watch>. [Accessed: 18-Sep-2019].

Por otro lado, se va a mencionar una de las marcas más destacadas de entre las que compiten en el mercado de la ropa inteligente, esta es *Polar* [27]. Esta marca es referente en relojes inteligentes, pulsómetros de antebrazo, bandas pulsómetro de pecho y ahora también fabrica camisetas que miden la frecuencia cardíaca de los usuarios que la llevan puesta. Al sistema completo lo han llamado “*PolarTeamPro*” y consta de dispositivos para medir frecuencia cardíaca, una camiseta con sensores en la zona distal de los abdominales, una estación de carga de hasta 20 dispositivos simultáneos y la App o acceso web para el control en tiempo real de los usuarios. Este sistema está destinado para el entrenamiento profesional en grupo, y se pueden ver en las Figuras 19 y 20.

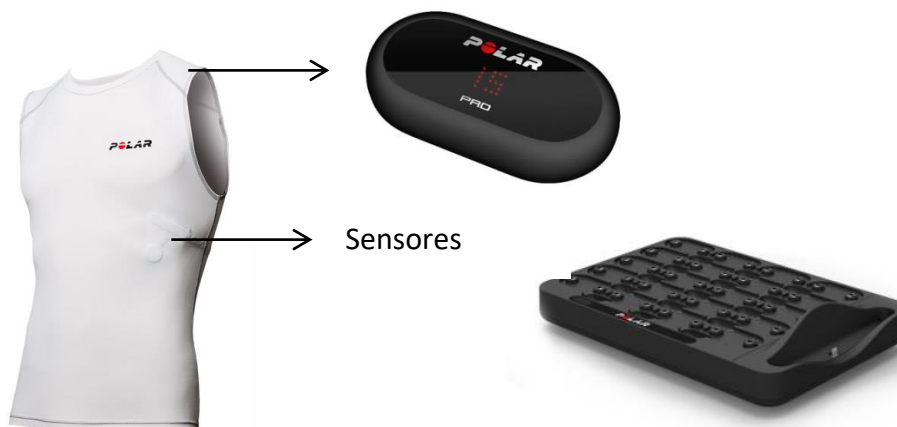


Figura 19 - a) Camiseta *Polar* que incluye los sensores de lectura; b) Dispositivo conectado por medio de snaps en la parte superior de la espalda de la camiseta; c) Estación de carga de hasta 20 dispositivos simultáneamente.

Fuente: “Polar Team Pro | Wearable GPS athlete tracking and performance analysis | Polar Global.” [Online]. Available: [https://www.polar.com/en/b2b\\_products/team-pro](https://www.polar.com/en/b2b_products/team-pro). [Accessed: 18-Sep-2019].



Figura 20 – App y web de monitorización en tiempo real de cada atleta que lleva puesto el sistema *Polar*, muestra en diferentes colores el estado del atleta. Todo en una única pantalla.

Fuente: “Polar Team Pro | Wearable GPS athlete tracking and performance analysis | Polar Global.” [Online]. Available: [https://www.polar.com/en/b2b\\_products/team-pro](https://www.polar.com/en/b2b_products/team-pro). [Accessed: 18-Sep-2019].

- GPS.
- Sensor de movimiento formado por acelerómetro 3D, giroscopio y magnetómetro.
- Frecuencia cardíaca.
- Memoria hasta 65 horas.
- Datos encriptados en vivo.
- Pantalla LED con información del número de jugador, sincronización de datos y batería.
- Bluetooth LE.
- Alcance hasta 200 metros.
- Firmware actualizable.

Otro grupo de *wearables* son aquellos que se clasifican en función para la finalidad en la que se vayan a usar:

- **Wearables para el deporte:** nos permiten medir la actividad deportiva, el ritmo cardíaco, las calorías consumidas, etc. Alguno de estos *wearables* están citados a lo largo del documento, existe una gran cantidad de productos y marcas orientadas a este objetivo. Relojes inteligentes, bandas de obtención de frecuencia cardíaca, ropa inteligente, etc. Pero quizás, de entre todos los que hemos nombrado, el sistema *PolarTeamPro* (ver Figuras 19 y 20) es el que tiene como principal y único uso previsto el de ser un *wearable* deportivo.
- **Wearables para la salud:** permiten monitorizar variables médicas como la glucosa, la presión arterial, el colesterol, etc. Hace unos años sólo existían

*wearables* capaces de medir constantes vitales básicas y eran utilizados de una forma muy general para la salud. Sin embargo, a día de hoy este tipo de *wearables* orientados al sector de la salud ha evolucionado mucho, aportando productos realmente específicos y útiles como *AerBetic* [28], una pulsera o colgante (existen las dos versiones; ver en *Figura 21*) no invasivo capaz de controlar el nivel de glucosa en tu cuerpo mediante el análisis de nano-gases medidos en tu aliento o a través de la piel. El dispositivo se conecta con tu móvil o con el móvil de la persona que desees gracias a su App gratuita y muestra información sobre tu nivel de azúcar en sangre. En estos momentos no está a la venta pero el producto está terminado y se encuentra en fase de pruebas abiertas a la comunidad. Esperan poder lanzarlo al mercado durante este año 2019.



Figura 21 – *Wearable* para la salud llamado *AerBetic* para el control del azúcar en sangre del usuario. A la izquierda se puede ver el modelo de muñeca y a la derecha el modelo de colgante.

Fuente: “AerBetic.” [Online]. Available: <https://www.aerbetic.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

- ***Wearables* para el día a día:** permiten agilizar algunas funciones en las actividades cotidianas. En este apartado son muy comunes los relojes y pulseras inteligentes. Estos dispositivos incluyen podómetro, medidor de la frecuencia cardíaca, giroscopio y acelerómetro. Los de gama más alta pueden incluir también GPS y ranura para tarjeta SIM, micrófono e incluso cámara. Las marcas más destacadas en este sector son *Fitbit* [29] y *Xiaomi* [30].
- ***Wearables* para el trabajo:** ayudan a los usuarios con funciones básicas como recordatorios, agenda, recepción de mails, llamadas, etc. Y otras avanzadas como ofrecer apoyo en su puesto de trabajo. Una empresa muy importante en este sector es *Zerintia* [31]. Se trata de una empresa Española que desde hace tiempo lleva apostando en aportar soluciones tecnológicas al entorno laboral. Uno de sus proyectos consiste en utilizar la realidad aumentada como una herramienta para los trabajadores. La realidad aumentada consiste en la utilización de unas gafas *wearables* que permiten la visión del mundo real al

que le incluye elementos digitales, como se muestra en la *Figura 22*. En esta imagen se puede ver que el trabajador lleva puestas las gafas *wearables* y observa un cuadro con una posible avería. Gracias a la realidad aumentada es capaz de ver información adicional que le ayuda a llevar a cabo su trabajo.



Figura 22 –Realidad aumentada desarrollada por *Zerintia* para el entorno del trabajo.

Fuente: “Soluciones para su Convergencia Digital - *Zerintia Technologies*.” [Online]. Available: <https://zerintia.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

Tanto *Epson* como *Google* han desarrollado gafas inteligentes que permiten el desarrollo de realidad aumentada y son dos de los modelos que *Zerintia* utiliza en sus proyectos.

## 2.4 Sensores textiles. Tipos de sensores textiles inteligentes

Los **textiles inteligentes**, como ya se ha comentado, son productos textiles, como fibras y filamentos, hilados con tejidos o con estructuras no tejidas, que pueden interactuar con el entorno/usuario con el objetivo de aportar beneficios adicionales. La unión de los textiles y la electrónica puede ser relevante para el desarrollo de materiales inteligentes, capaces de lograr un amplio abanico de funciones. Las fibras inteligentes integran un alto nivel de inteligencia, y las vamos a clasificar en diferentes tipos, por ejemplo, según su reacción a los estímulos (según su **actividad**):

- **Textiles inteligentes pasivos** o de primera generación, los cuales sólo pueden detectar y devolver información acerca de las condiciones ambientales o estímulos del usuario.

- **Textiles inteligentes activos** o de segunda generación son, por otro lado, aquellos que tienen la capacidad de detectar y de actuar frente a un estímulo del usuario o del entorno. Por tanto, la diferencia entre este tipo o los textiles inteligentes de primera generación es que estos reaccionan ante un estímulo y actúan en consecuencia para aportar un beneficio.
- **Textiles ultra inteligentes o muy activos**, también llamados de tercera generación, se caracterizan y diferencian de los dos anteriores en que además de detectar y reaccionar ante estímulos, se adaptan a las diferentes condiciones y estímulos del medio. Por tanto, reaccionan ante un estímulo y son capaces de tomar decisiones. Este tipo de textiles inteligentes adaptan sus propiedades al detectar estímulos externos, y actualmente son una realidad gracias a la interacción y aplicación de textiles tradicionales y nuevos tejidos con la ciencia de los materiales, la mecánica estructural, la tecnología de sensores y detectores, la electrónica, la biología, la inteligencia artificial, etc. [19], [32].

Los **sensores textiles** [33], como el resto de textiles inteligentes que hemos comentado anteriormente, utilizan la electrónica junto con materiales textiles para dar como resultado dispositivos que el usuario puede llevar puestos para sensar alguna variable del exterior o de su propio cuerpo.

Una propiedad muy importante en este tipo de dispositivos es la conductividad. Utilizando la microelectrónica se ha conseguido adionar a los polímeros textiles esta propiedad, permitiéndole al material que la posee el paso a través de sí del calor y/o la electricidad.

Para hacer posible la incorporación de elementos electrónicos a la vestimenta humana, han sido claves la utilización de fibras flexibles y la miniaturización. De esta manera las prendas de vestir pueden incorporar sensores o fibras conductoras de tamaño diminuto, siendo muy importante que estos elementos no afecten al estilo de la prenda ni a su tacto, y que sean lo suficientemente resistentes como para permitir el lavado o la limpieza en seco de las prendas.

Para suministrar la energía necesaria para que el dispositivo funcione se pueden coser pequeñas baterías al tejido, aunque no son las más adecuadas ya que podrían ocasionar algún problema a las personas. Sin embargo, está previsto que en un futuro la energía proceda del movimiento del usuario de la prenda o de la energía solar [32].

A continuación vamos a clasificar los sensores textiles más habituales en función de su principio de funcionamiento:

- **Sensor de flexión:** estos sensores realmente actúan ante la presión que se ejerce al doblar, permitiendo así que se pueda medir la curva (ángulo) a través de la presión. Generalmente se utilizan materiales piezorresistivos recubiertos de un material textil y el material piezorresistivo variará su resistencia en función del grado de flexión que se realice. Esto ocurre por la presión que ejercen las paredes al material del interior. Como resultado tenemos que la presión es directamente proporcional al ángulo de movimiento que se realice, por lo que es fácil interpretar los valores de salida que muestra el sensor.

Algunos ejemplos son:

- Funda con sensor de curvatura.
- Sensor de curvatura de neopreno.

Éste es el tipo de sensor utilizado en este proyecto. Se ha fabricado un sensor de curvatura para cada dedo del guante utilizado para medir el grado de flexión durante el movimiento de la mano.

- **Sensor de presión:** sensores que varían su resistencia al ejercer presión sobre su superficie. La sensibilidad de este tipo de sensores no es lineal, pero es estable.

Un ejemplo de productos que utilizan sensores textiles de presión son los fabricados por la empresa *Sensingtex* [34]. Ésta es una empresa española que fabrica diferentes productos utilizando una matriz textil de presión. Los productos que han desarrollado son los siguientes:

- Funda de cama que mide la presión que ejerce tu cuerpo sobre la cama cuando estás durmiendo. Envía la señal que mide a una App que muestra a través de un mapa de calor los puntos de tu cuerpo que ejercen presión. Ver *Figura 23 a*).
- Plataforma de presión: mismo producto que el descrito anteriormente pero utilizado en forma de “tapete” de 20cm x 20cm, está destinado para realizar mediciones de presión de diferentes tipos de objetos. Ver *Figura 23 b*).
- Sensor de presión para asientos: utilizando la tecnología de matriz de presión y colocada sobre una silla, esta manta muestra mediante un mapa de calor la presión que ejerce tu cuerpo mientras estás sentado.
- Manta de suelo: orientada al sector *fitness*, monitoriza tu nivel de presión durante ejercicio físico sobre la manta. Ver *Figura 23 c*).



Figura 23 - a) Funda de cama *Sensingtex*; b) Plataforma de presión *Sensingtex*; c) Manta de suelo *Sensingtex*.

Fuente: "Sensing Tex - Think it Sensitive, Make it Smart." [Online]. Available: <http://sensingtex.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

- **Sensor de estiramiento:** son aquellos que varían su resistencia al ejercerse una fuerza de tracción sobre ellos. Podemos encontrar, por ejemplo:
  - Sensores de estiramiento tejidos.

*StretchSense* [35] es una empresa que fabrica y vende sensores textiles de estiramiento para uso en ropa. Ha diseñado un pequeño sensor capacitivo. En la *Figura 24* se puede ver un ejemplo del sensor *StretchSense* cosido sobre una camiseta para medir el grado de flexión del codo mediante el nivel de estiramiento que reciba el sensor.



Figura 24 - Sensor textil de estiramiento fabricado por *StretchSense*.

Fuente: "How To Measure Joint Angle With Stretch Sensors." [Online]. Available: <https://stretchsense.com/article-resources/case-study/how-to-measure-joint-angle-with-stretch-sensors/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

- **Potenciómetro:** este tipo sigue el mismo principio de los potenciómetros que todos conocemos. Algunos ejemplos de potenciómetros textiles son:
  - Potenciómetros de tela.
  - Potenciómetros bordados.
  - Potenciómetros de crochet.

Algunos ejemplos de sensores textiles utilizados en **diferentes sectores** son:

- Incorporación de sensores a prendas de vestir, como por ejemplo una camiseta de deporte que incorpora medidores de signos vitales del cuerpo humano.
- Sensores textiles utilizados en paredes tapizadas para controlar la luz, la temperatura, haciendo la función de sistema de seguridad, etc.
- En automoción se puede incluir en los asientos de los coches diferentes tipos de sensores textiles.
- Y otras muchas aplicaciones en el entorno de la salud, como por ejemplo, en sensores de presión en camas de hospitales y sillas de ruedas.

Además de todos los mencionados, clasificados según criterios de funcionamiento, existen multitud de sensores textiles que incluso podemos fabricar nosotros mismos con los materiales adecuados.

Podemos encontrar otros sensores textiles que han sido fabricados con diferentes materiales, o simplemente cosiendo el material conductor que los componen dándoles otra perspectiva y variando su funcionamiento. En este caso, el sensor textil elegido para el desarrollo de este proyecto, ha sido el sensor textil de flexión. Más adelante, en el capítulo 3 de este documento, se explicarán las características de este sensor y cómo ha sido fabricado.

## 2.5 Aplicaciones en Biomedicina

El término “**medical *wearable*” device** o “**dispositivos médicos llevables**” hace referencia a los dispositivos autónomos que son usados por una persona y proporcionan **supervisión médica o soporte**. Este tipo de dispositivos pueden ser usados durante un período de tiempo medio o prolongado. La característica que los distingue es que se usan como accesorios o se incrustan en la ropa. Normalmente incorporan sensores no invasivos y/o sensores textiles, módulos de procesamiento de datos, etc. Son pequeños, ligeros, discretos, y diseñados para ser utilizados por cualquier persona. La principal ventaja que ofrece este tipo de dispositivos con respecto a los que se han usado con anterioridad es que, los dispositivos médicos llevables, al ser de pequeñas dimensiones y no presentar impedimentos físicos a los pacientes, los diagnósticos se pueden llevar a cabo analizando la vida rutinaria del paciente, es decir, el paciente al llevar el dispositivo puesto, no necesita alterar su día a día mientras está siendo estudiado.

Los dispositivos médicos llevables ofrecen atención médica a enfermos crónicos o discapacitados. Este tipo de dispositivos realizan diversas funciones de apoyo como por ejemplo la monitorización del paciente o incluso pueden ayudarle con sus rehabilitaciones.

### **La tecnología *wearable* relacionada con el ritmo cardíaco y la electrocardiografía**

Sabemos que el campo de la cardiología ha utilizado durante mucho tiempo dispositivos portátiles que se encargan de recopilar datos de actividad cardíaca, frecuencia y ritmo cardíacos, y durante la última década han aparecido muchos otros nuevos que controlan, por ejemplo, la impedancia torácica y el líquido torácico.

Los cardiólogos usan normalmente las tecnologías *wearables* para diagnosticar, evaluar el tratamiento e incluso administrar la terapia. Estas innovaciones portátiles se remontan a finales de 1800 con el uso de relojes de pulsera que medían la frecuencia cardíaca y cronometraban eventos cardíacos. Después, Norman J. Holter informó por primera vez de la transmisión de un “radioelectrocardiógrafo” en 1949, utilizando una mochila portátil [36].

Holter, químico y físico, empezó a colaborar con los médicos para hacer un uso más práctico del ECG. A principios de la década de los 60 la electrocardiografía se usaba cada vez más para detectar anomalías que ayudaran a identificar los síndromes que los pacientes describían, pero hasta principios del siglo XXI no surgió el ECG remoto con el desarrollo de la telefonía celular rentable.

En 2002 *Cardionet* empezó a comercializar el sistema “*Cardionet MCOT*”, telemetría móvil ambulatoria cardíaca, capaz de registrar y cargar datos de ECG de forma continua durante horas o días, mediante una conexión de telefonía móvil. Ahora están disponibles dispositivos portátiles de grabación de ECG más pequeños, y además se han desarrollado telas realmente innovadoras, como la camiseta “*hWear ECG*” de *Healthwatch* que se puede ver en la *Figura 25*, la cual permite adquirir 12 derivaciones de ECG, llevando el monitoreo ambulatorio a un nuevo nivel en una prenda muy fácil de usar [25].



Figura 25- Camiseta “hWear ECG” de Healthwatch.

Fuente: “HealthWatch seeks FDA clearance for its 12-lead ECG tshirt | MobiHealthNews.” [Online]. Available: <https://www.mobihealthnews.com/32774/healthwatch-seeks-fda-clearance-for-its-12-lead-ecg-tshirt>. [Accessed: 17-Sep-2019]

Otra de las aplicaciones en Biomedicina, dentro del campo de la cardiología, son los monitores de frecuencia cardíaca portátiles.

Los informes acerca de los monitores de frecuencia cardíaca que se usan en la muñeca sugieren que los mejores dispositivos *wearables* dirigidos al consumidor pueden medir la frecuencia cardíaca con un error inferior al 10%, en comparación con los dispositivos estándar de referencia en circunstancias ideales. Normalmente estos monitores transmiten los datos de forma automática a los *smartphones* y en algunos casos los datos se cargan en servidores remotos o en registros electrónicos de salud.

Estos dispositivos son, sin duda, un nuevo gran potencial en cardiología, ya que ofrecen un monitoreo continuo y pasivo, incluso durante el sueño, que además resultan ser una oportunidad significativa para aquellos pacientes con, por ejemplo, sospecha de arritmia.

### **Tecnologías *wearables* hemodinámicas, ReDS y monitorización de la bioimpedancia**

Gracias a las nuevas tecnologías *wearables* que miden la detección dieléctrica remota (ReDS) y la bioimpedancia se pueden identificar cambios en el estado del volumen intravascular y permitir intervenciones tempranas. ReDS es una nueva tecnología que se basa en la energía electromagnética desarrollada por *Sensible Medical Innovations Ltd.*, que es capaz de cuantificar, de forma no invasiva, la concentración de líquido pulmonar. Dicha tecnología se basa en las diferencias en las propiedades dieléctricas de los tejidos, de manera que el tejido pulmonar proporciona una medición numérica de su coeficiente dieléctrico.

A través de un chaleco portátil está siendo sometido a ensayos clínicos para determinar su eficacia en la reducción de los ingresos hospitalarios relacionados con la insuficiencia cardíaca congestiva. Además, se está investigando si los datos obtenidos por ReDS pueden sustituir la evaluación hemodinámica intravascular.

Por otro lado, los monitores de bioimpedancia pueden medir la impedancia transtorácica (TTI) mediante la aplicación de electrodos de superficie. Se han desarrollado varios dispositivos que miden TTI, como el collar "*Perminova CoVa*", pero actualmente siguen sometidos a ensayos clínicos. Además, se está realizando un ensayo para evaluar la bioimpedancia transtorácica medida por un chaleco y transmitida por teléfono móvil, por lo que el monitoreo de la bioimpedancia puede tener el potencial de utilizar un dispositivo no invasivo *wearable* para hacer este seguimiento [36].

Hoy en día estamos muy habituados a ver o incluso a utilizar alguno de los dispositivos mencionados, pero han sido diferentes avances en tecnología los que han permitido a los investigadores de todo el mundo implementar sistemas *wearables* en el entorno de la salud, creando aplicaciones enfocadas al bienestar de las personas. El desarrollo y la fabricación de nuevos sensores y sensores textiles especializados, los avances en la tecnología de la comunicación, el internet de las cosas (IoT), la evolución en el procesamiento de las señales y los datos obtenidos son sólo algunos ejemplos del increíble desarrollo que hemos vivido en los últimos años.

El internet de las cosas [37], en inglés llamado *Internet of the things* (IoT), es la tecnología que permite a dispositivos inalámbricos como los *wearables* comunicarse entre ellos y transmitir los datos y toda la información que recogen hasta el centro de análisis. Esta tecnología crea una red entre los dispositivos físicos y permite la comunicación interna de la propia red o externa a través de internet. La cercana aparición del 5G va a ser un impacto muy positivo para futuros desarrollos del IoT y la tecnología médica *wearable*.

Existen diferentes aplicaciones de la tecnología *wearable* en Biomedicina que ya hemos ido mencionando hasta ahora, donde destaca la monitorización de los pacientes gracias a la medición continua de las variables biológicas y las posibilidades de rehabilitación remota. Por lo tanto, podemos decir que los sensores *wearables* tienen aplicaciones de diagnóstico, así como de monitoreo. Sus capacidades actuales incluyen la detección fisiológica y bioquímica, así como la detección de movimiento. El monitoreo fisiológico podría ayudar tanto en el diagnóstico como en el tratamiento continuo de un gran número de individuos con enfermedades neurológicas, cardiovasculares y pulmonares tales como convulsiones, hipertensión, disritmias y asma. La detección de movimiento basada en el hogar puede ayudar en la prevención de caídas y ayudar a maximizar la independencia de un individuo y la participación de

la comunidad. Los sensores *wearables* y los sistemas de monitoreo remoto tienen el potencial de extender el alcance de los especialistas en áreas urbanas a las áreas rurales y disminuir las disparidades que actualmente existen.

Los sensores para monitorizar los signos vitales se podrían extender, por ejemplo, para monitorizar pacientes con insuficiencia cardíaca o pacientes con enfermedades pulmonares crónicas para que se sometan a intervenciones clínicas. Los sensores utilizados para la captura de datos de movimiento se podrían extender, por ejemplo, en aplicaciones tales como la monitorización de la efectividad de las intervenciones de rehabilitación en el hogar, o en el uso de dispositivos de ayuda a la movilidad en las personas mayores.

Un área emergente de la aplicación de la tecnología *wearable* es el uso de sensores *wearables* para facilitar la puesta en práctica de las rehabilitaciones en el hogar. Los sistemas que pretenden facilitar la implementación de programas de ejercicios de rehabilitación a menudo aprovechan la combinación de tecnología de detección y entornos de juego interactivo o realidad virtual (VR). Por ejemplo, el Centro de Investigación de Ingeniería de Rehabilitación de la Universidad del Sur de California [38] se basa en el juego de VR para abordar los desafíos de cumplimiento y motivación.

Particularmente relevantes para aplicaciones en el campo de la rehabilitación son los avances en la tecnología para fabricar sistemas microelectromecánicos (MEMS). La tecnología MEMS ha permitido el desarrollo de sensores inerciales miniaturizados, que se han utilizado en la actividad motora y otros sistemas de monitoreo del estado de salud. También se ha confiado en la microelectrónica para integrar otros componentes, tales como microprocesadores y circuitos de radiocomunicación, en un sólo circuito integrado, resultando de este modo en implementaciones *System-on-Chip*. Las medidas fisiológicas de interés en la rehabilitación incluyen la frecuencia cardíaca, la frecuencia respiratoria, la presión arterial, la saturación de oxígeno en la sangre y la actividad muscular. Los parámetros extraídos de estas medidas pueden proporcionar indicadores del estado de salud y tener un gran valor diagnóstico. Hasta hace poco, la monitorización continua de los parámetros fisiológicos sólo era posible en el ámbito hospitalario. Pero hoy en día, con los desarrollos en el campo de la tecnología *wearable*, la posibilidad de seguimiento preciso y continuo en tiempo real de las señales fisiológicas es una realidad.

## 2.6 Futuro de la tecnología *wearable*

La innovación tecnológica desafiará nuestra percepción de la salud, de la sociedad y de la economía en los próximos años.

La investigación en el ámbito de la biomedicina, el seguimiento y la monitorización de los pacientes, etc., cambiará de una manera radical gracias a las tecnologías *wearables*, ya que permiten disponer de los datos y parámetros en tiempo real.

Se estima que en 2020 se vendan 187 millones de dispositivos *wearables* para la captura, análisis, procesamiento y explotación de multitud de datos, pero esto hará necesario llevar a cabo los correspondientes procesos de validación para que sean accesibles para cualquier paciente [39].

Los tipos de tecnología *wearable* y las aplicaciones actuales de la tecnología *wearable* aplicados en la biomedicina, se pueden encontrar en este documento en los apartados 2.3 y 2.5 respectivamente.

Sin embargo, es importante mencionar que la tecnología *wearable* está dando pasos revolucionarios, así como adelantos de las innovaciones de esta tecnología que podremos ver durante los próximos años:

- **Grafeno** [40][41]: *“El grafeno es un nanomaterial de carbono bidimensional del grosor de un átomo. A pesar de ser tan fino y ligero, es el material más resistente en la naturaleza y tiene otras muchas propiedades como su transparencia, elasticidad, ligereza y su conductividad térmica y eléctrica, lo que lo convierte en uno de los materiales más considerados y estudiados en la ciencia actual.”* [42].

Este material es el principal para los investigadores que trabajan en el desarrollo de nuevas pantallas flexibles, baterías, sensores e incluso implantes biónicos. La empresa *Graphenano* es una empresa española fundada en 2012 que trabaja en la investigación sobre aplicaciones del grafeno en diferentes sectores, entre los que se encuentran la medicina y la aplicación de este material en una nueva generación de sensores. El grafeno es [41]: delgado, ligero, flexible, elástico, maleable duro y resistente transparente, conductor eléctrico y químico, híbrido entre semiconductor y metal, soporta radiación ionizante, multiplicador de frecuencias, denso e impermeable, bactericida, biocompatible, reacciona con otras sustancias y es autorreparable.

- **Inteligencia artificial:** hoy en día muchos conocemos la importancia y el uso que tiene la inteligencia artificial. Las grandes empresas recientemente han fabricado y sacado al mercado los famosos altavoces inteligentes (*Amazon-Alexa*, *Google-Google Home*, *Apple-HomePod* entre otros) que se nutren de esta tecnología para

realizar sus funciones. Ya *Apple* ha incorporado a sus nuevos auriculares inalámbricos su asistente *SIRI*. Quizás, en un futuro no muy lejano, cada uno de nosotros tengamos un asistente dotado de inteligencia artificial “llevable” como cualquier otro *wearable*.

Otro uso casi obligatorio de la inteligencia artificial será el procesamiento y la creación de nuevas tablas de los datos que se obtienen de los *wearables*. Cada vez son más las personas que utilizan estos dispositivos para el diagnóstico remoto, por lo que el número de datos que se procesarán en un futuro será tan grande que sólo una inteligencia artificial especializada será capaz de diagnosticar en tiempo y con precisión a todos los pacientes.

- **Tecnología 5G** [43]: así es como es llamada a la quinta generación de las redes móviles. En la actualidad, imperan el 3G y el 4G en nuestra red de telefonía, pero en un futuro muy cercano el 5G será una realidad y podremos conectar todos nuestros dispositivos inteligentes (*wearables* con conexión a internet) a esta nueva generación de red. Pero, ¿qué ofrece con respecto a lo que ya tenemos? Para entender las nuevas ventajas es necesario definir primero el término latencia. Éste se define como el “retardo” que existe entre el envío de un paquete de datos hasta su recepción a través de internet. Pues bien, algunas de las ventajas del 5G son las siguientes:
  - Reducir la latencia actual de alrededor de 10 ms a 1 ms. Esto significa que las comunicaciones entre los dispositivos portátiles como el envío de los datos a través de internet será casi instantáneo.
  - Mayor velocidad de descarga.
  - Incremento en el ancho de banda, lo que provocará disminución del colapso de dispositivos en una red. Si ahora en una red móvil 4G se pueden conectar 10 dispositivos simultáneamente, con el 5G se podrán conectar hasta 100 dispositivos.
  - Ahorro de energía. Ésta es una mejora importantísima, hará a tu dispositivo aún más inteligente ya que sólo utilizará internet en el momento que lo necesite, ahorrando la batería de tu dispositivo entre un 80-90%.

Cabe destacar que esta tecnología unida al ya mencionado internet de las cosas (IoT) será una combinación revolucionaria que cambiará para siempre el uso de los dispositivos *wearables*, entre muchos otros sectores.

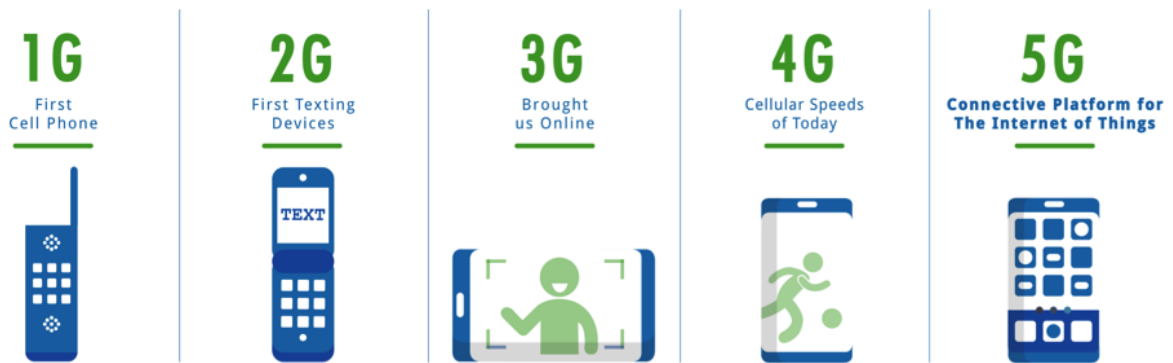


Figura 26 - Evolución de la tecnología de la red móvil.

Fuente: "5G: Transforming Tomorrow with the Power of Data." [Online]. Available: <https://www.roboglobal.com/insights/5g-transforming-tomorrow/>. [Accessed: 22-Sep-2019]

En la *Figura 26* se puede observar cómo ha ido evolucionando la tecnología de la red móvil. El primer móvil analógico fue fabricado entre 1970 y 1973 por Martin Cooper. Unos años más tarde, en 1979 nació el primer operador de telefonía 1G en Japón llamado NTT. La primera generación solo brindaba servicios de voz basados en transmisión de radio analógicos. Se utilizaban las bandas 869-894Mhz y 824-849Mhz. En 1990 comenzó el 2G cuya principal característica fue la transición a la tecnología digital. La frecuencia que se usó fue en el mismo rango que el 1G, excepto para EEUU donde se usó 1900Mhz. La velocidad de transmisión era 9.6Kbps.

En 2001 comenzó el 3G en Japón, esta nueva generación de red móvil permitió velocidades de hasta 384Kbps. Un poco más tarde apareció una generación intermedia entre el 3G y 4G, denominada 3G+ que permitía velocidades de hasta 14,4 Mbps de descarga y 5,8Mbps de subida y también nació la *SIM Card* de los teléfonos móviles. Años más tarde, en 2010, se inicia también en Japón el 4G. Tiene una velocidad máxima de 1Gbps y es la base del futuro 5G. La latencia es menor de 10ms. Es la red móvil que usamos a día de hoy y el futuro de la tecnología *wearable* está enfocado en el desarrollo del 5G sobre el que vendrán numerosas mejoras con respecto a la actual red, como se ha indicado en su listado de características [44], [45].

## 2.7 Importancia de la tecnología *wearable* en salud

A pesar de que este tipo de tecnología no es conocida para muchas personas, la verdad es que está alcanzando un grado de importancia muy grande, sobre todo en el campo sanitario. Según un estudio realizado por la empresa consultora en *eSalud FJORD*, más del 70% de los *wearables* son utilizados para el registro y monitorización de variables biológicas, lo cual resulta de gran importancia, ya que incluso estas mediciones pueden ser tomadas y transmitidas por los mismos usuarios. Este mismo estudio también revela que, el 56% de los *wearables* son dependientes, es decir, necesitan de otro dispositivo (como un ordenador o *smartphone*) para extraer los

datos o controlar sus funciones; el 26% son independientes, y el 18% restante pueden ser utilizados de forma independiente de otro dispositivo para algunas funciones (mixto) [46].

Como ya se ha explicado, la mayoría de los dispositivos *wearables* que se utilizan en salud sirven para medir las distintas variables biológicas, y éstas son transmitidas de manera inalámbrica a una aplicación específica de nuestro *smartphone*, por ejemplo, donde se van almacenando y procesando.

La gran aplicación de los “dispositivos llevables” en la salud se debe a diferentes motivos:

1. Las variables biológicas se pueden medir fácilmente.
2. La salud es un tema que preocupa a todas las personas.
3. Hay casos especiales, como en el deporte, en los que la monitorización de algunas variables resulta especialmente interesante para las personas, a la hora de conseguir un plan de ejercicios especializados, en situaciones de entrenamiento de élite, etc.

Además de poder cuantificar numerosas variables biológicas, existe información adicional que nos presentan estas aplicaciones, como por ejemplo:

- Localización geográfica: resulta muy interesante en los casos en los que exista riesgo de pérdida o extravío en la persona monitorizada (desorientación/demencias, deportes extremos) o riesgo vital en circunstancias concretas (deporte en cardiópatas de riesgo).
- Monitorización continuada y transmisión de datos.

En este apartado, uno de los avances más importantes que podemos distinguir es la telemedicina, la cual se ha introducido para hacer frente a la distancia entre especialista-paciente a fin de obtener un acceso rápido a los conocimientos médicos y atención de salud adecuada. El principal objetivo es desarrollar soluciones para apoyar el manejo de enfermedades crónicas como la diabetes y las enfermedades pulmonares y cardíacas. La evolución y ampliación de la telemedicina da lugar a una nomenclatura que incluye “*e-salud*”, “*telesalud*” y “*teleasistencia*”.

En la *Figura 27* podemos ver el esquema del funcionamiento de la telemedicina aplicada en un paciente. Un ejemplo concreto de su funcionamiento ocurre cuando uno de los pacientes que incorporan el sistema sufre una caída. Esa acción se detecta por medio de los sensores instalados y vía Bluetooth se envía al teléfono de control

vinculado. El *smartphone* inmediatamente sube a la nube vía WIFI los datos donde éstos son procesados gracias a los algoritmos implantados en el sistema. Una vez obtenida la alerta de caída, desde la nube se envía un mensaje de alarma a un centro de servicio de emergencia para proporcionar asistencia inmediata. Los miembros de la familia y los cuidadores son alertados en este caso de emergencia pero también pueden ser notificados en otras situaciones cuando el paciente requiere asistencia para, por ejemplo, tomar sus medicamentos. El personal clínico puede monitorizar remotamente el estado del paciente y ser alertado en caso de que se deba tomar una decisión médica.

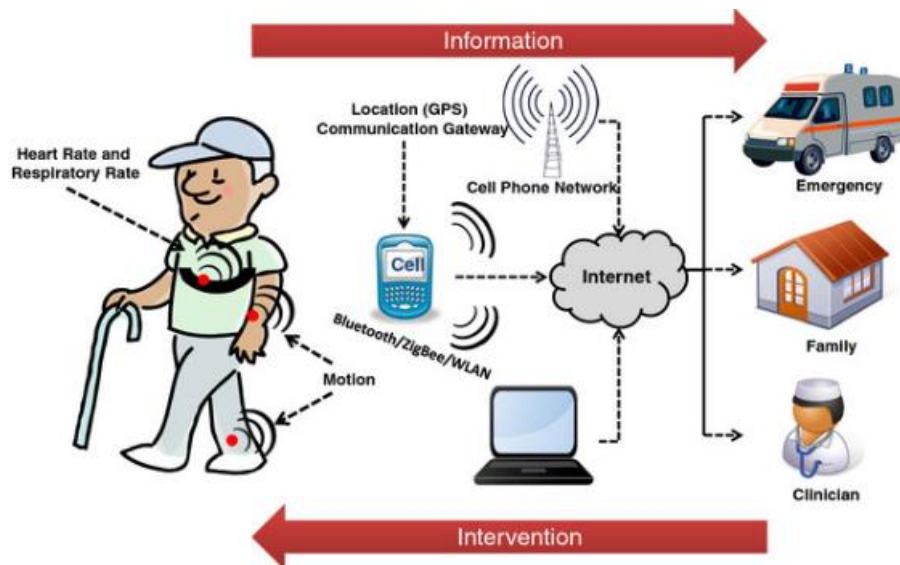


Figura 27 - Sistema de monitorización *wearable* con asistencia remota.

Fuente: M. Maksimović, "Improving computing issues in Internet of Things driven e-health systems," 2017.

Los últimos avances en microsistemas y nanotecnologías permiten la miniaturización y obtención de forma no invasiva de datos físicos y fisiológicos. La investigación multidisciplinar de vanguardia en fibras textiles, sensores biomédicos y telecomunicaciones inalámbricas y móviles integradas con la telemedicina, tiene como objetivo desarrollar el vestuario biomédico inteligente (IBC), para apoyar la gestión personalizada de la salud y las enfermedades.

Durante los primeros años del desarrollo de esta tecnología se hicieron importantes avances en el ámbito de la ingeniería para el desarrollo de sensores y sistemas *wearables*. Sin embargo, más recientemente, los estudios se han centrado en el desarrollo de aplicaciones de esta tecnología para el monitoreo de las personas, con fines de salud y bienestar. Así, se ha podido ver que el objetivo de los investigadores y los clínicos de integrar las tecnologías y las comunicaciones portátiles, así como de conseguir la vigilancia remota en el hogar, han producido un cambio en el campo de la tecnología *wearable*, desde el desarrollo de sensores hasta el diseño de sistemas [47].



CAPÍTULO 3: EJEMPLO DE APLICACIÓN TECNOLOGÍA  
*WEARABLE*: GUANTE PARA EL CONTROL DE UNA MANO  
ROBÓTICA



### 3.1 Introducción

Para este trabajo fin de grado se ha diseñado y fabricado un sistema *wearable* basado en sensores textiles. Un componente esencial del sistema es un guante con sensores textiles de flexión incorporados en los dedos índice, anular, corazón y pulgar. Otra parte del sistema es una mano robótica de elaboración propia. Los sensores realizan mediciones constantes del ángulo de inclinación de los dedos de la persona que lleva puesto el guante. Las señales generadas son procesadas y enviadas a servomotores de la mano robótica, que replica el movimiento en tiempo real.

La fase inicial consistió en la realización de un estudio del estado actual de productos similares en el mercado. Se obtuvieron diferentes referencias que sirvieron para realizar pruebas en el laboratorio y construir las bases del sistema que posteriormente se desarrolló.

Además de las partes mencionadas, para el sistema se utilizan el microcontrolador *Arduino UNO*, una *PCB shield* de *Arduino* diseñada y fabricada específicamente para este proyecto y la programación escrita en el programa de *Arduino* e instalada en el microcontrolador.

La *PCB* contiene el circuito de acondicionamiento de la señal y la alimentación de los servomotores, y el código programado sirve para realizar una primera calibración del sistema, y posteriormente procesar las señales recibidas de los sensores.

Teniendo en cuenta la aplicación propuesta para este proyecto, se establecieron una serie de requisitos esenciales previos al proceso de diseño y fabricación:

- Dispositivo *wearable*, ya que, como se ha explicado, esto no es sólo que un dispositivo se lleve puesto, sino que realiza alguna acción y del que se obtiene un beneficio.
- Sensores con un amplio rango de medición para que la mano robótica se comporte de la forma más natural posible.
- Programa de control optimizado, en cuanto a velocidad de adquisición y procesamiento, para que el movimiento de los dedos de la mano robótica siga el movimiento sentido con el guante, con el menor retraso posible. El objetivo es, como antes, que la mano robótica se comporte de la forma más natural y precisa posible.
- Materiales duraderos. Esto es imprescindible para la aplicación propuesta.

Una vez finalizada la fabricación se realizará una validación del diseño del prototipo, en función de los requisitos previamente establecidos.

A lo largo de este capítulo se presentan los detalles de fabricación, resultados y explicación de uso de cada uno de los elementos por separado que componen el sistema propuesto.

### 3.2 Guante con sensores textiles de flexión: fabricación

El guante fabricado es uno de los componentes más delicados del sistema. Está formado por un guante de mano derecha de neopreno sobre el que se han cosido sensores de flexión fabricados con materiales y procesos textiles. Cada sensor funciona gracias a la utilización de un material piezorresistivo como material principal, llamado *Linqstat MVCF*. Este material tiene una resistencia muy elevada en reposo que disminuye cuando sobre él se aplica presión.

Además, se ha utilizado neopreno, distinto del guante, para la fabricación de los sensores. Éstos se han fabricado de modo que el material piezorresistivo se encuentra cosido entre dos capas de neopreno, como se puede ver en la *Figura 28*. El sensor, al ser flexionado por uno de los dedos, hace que ambas capas de neopreno ejerzan presión sobre la lámina de material piezorresistivo haciendo que disminuya su resistencia. De esta forma podemos establecer una relación entre el ángulo de flexión y la resistencia del sensor.

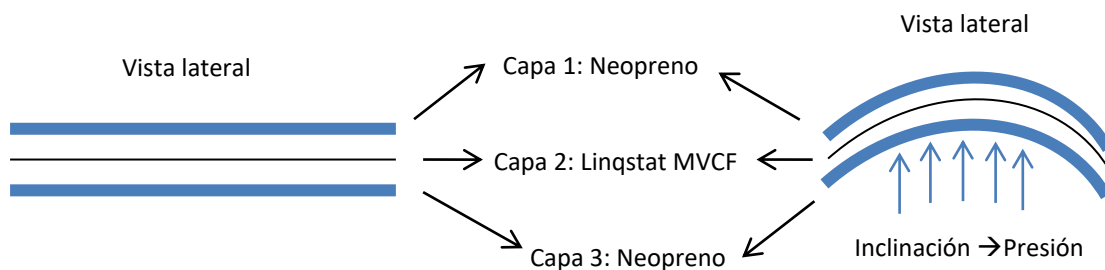


Figura 28 – Esquema sobre la localización del material piezorresistivo en el sistema.

Fuente: elaboración propia.

Por tanto, podemos determinar que el guante fabricado es un textil inteligente, ya que usa sensores textiles fabricados únicamente con materiales y procesos textiles, dando lugar a un producto con el que podemos obtener información en tiempo real del grado de flexión de los dedos de la mano de una persona. El guante, unido al resto del sistema, constituye un dispositivo *wearable*.

El primer paso para el diseño y fabricación del guante fue realizar una exhaustiva búsqueda del estado actual del mercado con respecto a estos sensores. Se

encontraron sensores individuales, guantes completos, alámbricos, inalámbricos, sensores de flexión usados para medir ángulos de diferentes partes del cuerpo y para usarlos como interruptores on/off en otras aplicaciones. Algunos de ellos se muestran en la *Figura 29*.



Figura 29 – a), b), c), d), e), f), g), h) Ejemplos de sensores textiles de flexión.

Fuentes: “SEN-10264 Sparkfun Sensor Flex Sparkfun.” [Online]. Available: <https://www.electan.com/sensor-flexion-sparkfun-p-3135.html>. [Accessed: 18-Sep-2019].

“Como Hacer Un Guante Con Sensores Flex Y Conexión Para Android: 9 Steps.” [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Como-Hacer-Un-Guante-Con-Sensores-Flex-Y-Conexión-/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

A. Atalay et al., “Batch Fabrication of Customizable Silicone-Textile Composite Capacitive Strain Sensors for Human Motion Tracking,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 2, no. 9, 2017.

“MoCap Pro Glove (Pair) - StretchSense.” [Online]. Available: <https://stretchsense.wpengine.com/product/multi-knuckle-splay-glove-pair/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

“StretchFABRIC Sensing Element (SSD18) StretchFABRIC Sensing Element.”

“Fabric Bend Sensor: 8 Steps (with Pictures).” [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Fabric-bend-sensor/>. [Accessed: 18-Sep-2019].

“HOW TO GET WHAT YOU WANT.” [Online]. Available: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=5615>. [Accessed: 18-Sep-2019].

“Pattern creations by sensing body motion 3 | one-o-one.” [Online]. Available: <http://nerding.at/course/101/?p=1522>. [Accessed: 18-Sep-2019].

Del sensor comercial mostrado en la imagen c) pude obtener una idea general de cómo podía fabricar el sensor. Por ejemplo, ambos conectores podían colocarse en uno de los extremos y el material piezorresistivo no debía estar en pleno contacto con el conductor de la señal, si no que este último debía colocarse realizando zigzags. Por otro lado, con los sensores mostrados tanto en la imagen a) como en la imagen f) pude conocer algunos de los materiales utilizados y que se podrían aplicar en el sensor que proponemos en este proyecto: material piezorresistivo para el núcleo (*Velostat*), neopreno para la estructura del sensor e hilo conductor como cable por el que se conduce la señal. Por último, viendo g) y h) obtuve un concepto general de cuál podría ser la disposición de los sensores en el guante.

Para más información sobre cada uno de los sensores mostrados en la *Figura 29*, se pueden consultar respectivamente las siguientes referencias [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55].

Una vez investigada, recogida y analizada la información de las referencias citadas, se procedió a realizar pruebas en el laboratorio. El objetivo principal de las pruebas fue determinar los materiales a utilizar para fabricar el sensor, los modos de fabricación y las pruebas que se deberían realizar para validar su funcionalidad.

### **Prueba de selección del material piezorresistivo para el sensor**

La elección más importante y, por tanto, la primera que se realizó, fue la selección del material piezorresistivo que debía ser usado para el núcleo sensor.

Para ello, se realizó un estudio de comportamiento de diferentes marcas y modelos de este material: todos ellos poseen propiedades piezorresistivas. El objetivo fue seleccionar aquel que se comportase de la manera más precisa y con un rango amplio de medidas ante diferentes cambios físicos de entrada de presión. Los modelos estudiados fueron: *Velostat* (empresa 3M), *Linqstat XVCF*, *Linqstat VCF* y *Linqstat MVCF*. Ver *Figura 30*.



Figura 30 - Material Linqstat MVCF.

Fuente: [https://www.caplinq.com/blog/tighter-specifications-on-linqstat-volume-conductive-plastic\\_881/](https://www.caplinq.com/blog/tighter-specifications-on-linqstat-volume-conductive-plastic_881/)

Para realizar el estudio se utilizaron los siguientes materiales:

- Transportador de ángulos.
- Multímetro.
- Regla.
- Tijeras.

La prueba consistió en realizar mediciones con el multímetro de la resistencia eléctrica interna de cada uno de los materiales seleccionados bajo diferentes condiciones (longitudes del material y ángulos de flexión). Al ser materiales piezorresistivos que varían su resistencia interna con la flexión (presión), el objetivo fue comprobar la precisión de las mediciones ante estas situaciones y su rango de medidas. De esta forma podríamos extrapolarlo a la respuesta que daría cuando se estuviese usando junto al guante para la aplicación propuesta en este trabajo fin de grado.

Todas las mediciones que se muestran a continuación se realizaron cortando el material piezorresistivo con un grosor fijo de 1cm y siempre colocando en sus extremos distales cada una de las puntas del multímetro. Los resultados obtenidos fueron:

Velostat:

	Material recto	Ángulo de 30°
Longitud		
1 cm	17,5 kΩ	
2 cm	23 kΩ	
4 cm	32 kΩ	29 kΩ

Linqstat XVCF:

	Material recto	Ángulo de 30°
Longitud		
1 cm	810 Ω	
2 cm	1,1 kΩ	
4 cm	1,6 kΩ	1,6 kΩ

Linqstat VCF:

	Material recto	Ángulo de 30°
Longitud		
1 cm	0,9 MΩ	
2 cm	2,8 MΩ	
4 cm	1,7 MΩ *	1,7 MΩ

Linqstat MVCF:

	Material recto	Ángulo de 30°
Longitud		
1 cm	47 kΩ	
2 cm	50 kΩ	
4 cm	60 kΩ	45 kΩ

Nota: cabe destacar que en las pruebas realizadas se utilizó el material “desnudo”, es decir, las medidas se tomaron directamente sobre él, no sobre el sensor fabricado, por lo que los datos variarán después de la fabricación.

Una vez tomados los resultados y habiendo analizado cada una de las tablas, automáticamente se descartó el *Linqstat XVCF* y *Linqstat VCF*. Los valores de resistencia obtenidos del *XVCF* son muy bajos por lo que, en un posible uso de este material para los sensores del guante, su rango de medidas sería pequeño. Además, como se puede ver en la tabla, este material no experimentó cambios de resistencia cuando se le sometió a flexión. Por el contrario, el *VCF* se encuentra en el otro extremo. Presenta valores demasiado altos y ha dado una incongruencia\* en las mediciones de la tabla. Ha mostrado una resistencia mayor cuando el material medía 2cm y menor cuando medía 4cm. Por último, destacar que durante las pruebas de estos dos materiales, los valores obtenidos con el multímetro fueron muy sensibles y variaban continuamente sin realizar modificaciones de las entradas físicas de presión.

Tanto el *Velostat* como el *Linqstat MVCF* dieron unos resultados acordes con el comportamiento deseado, es decir, su resistencia aumenta con la longitud del material y disminuye al sufrir presión debido a la flexión.

Finalmente se optó por realizar un estudio más completo del *Linqstat MVCF* gracias a su facilidad de obtención en el mercado. En caso de cumplir con los resultados deseados de funcionamiento, *Linqstat MVCF* sería el material utilizado para el desarrollo de este proyecto. Este material, al igual que el *Velostat*, es un material de polímero que permite conductividad a través de él y bajo presión cambia la resistencia. Se diferencia del *Velostat* en que sus valores de resistencia son distintos. Es un material que está resultando ser muy popular cuando hablamos de tecnología *wearable*, ya que es barato y se puede cortar y modificar su forma para adaptarse a cualquier superficie.

Para realizar la prueba se fabricó un sensor completo, compuesto por los siguientes materiales (ver *Figura 31*):

1. Una capa de tejido de neopreno que lo recubre, la cual funciona como base.
2. Una capa de *Linqstat MVCF* sobre la base de neopreno.
3. Una capa superior de tejido de neopreno para cerrar el sensor.
4. Tejido conductor en ambos extremos del sensor.
5. Hilo conductor de fibra de acero inoxidable. Resistencia: 28 Ohms/30cm. [56]
6. Conector simple hembra (pin).



Figura 31 - Materiales utilizados para la fabricación del sensor.

Fuente: elaboración propia.

### **Pasos para la fabricación del sensor**

A continuación se muestran las distintas fases llevadas a cabo para la fabricación del sensor:

1. En primer lugar se cortan las piezas de neopreno para la base y la parte superior del sensor. Cada sensor tiene unas medidas específicas, similares a las medidas reales del dedo sobre el que se va a colocar. Es necesario cortar las capas de neopreno lo más parecidas posible, para ello, se utiliza una plantilla como muestra la *Figura 32*. Una vez se ha cortado el neopreno a la medida indicada, se cortan pequeños cuadrados de tejido conductor y se pegan junto con el conector sobre la parte inferior de la cara interna del neopreno utilizando pegamento de la marca “*Ceys*” especial textiles. El pin del conector debe quedar en contacto con el neopreno. Como se puede ver en la *Figura 32*.

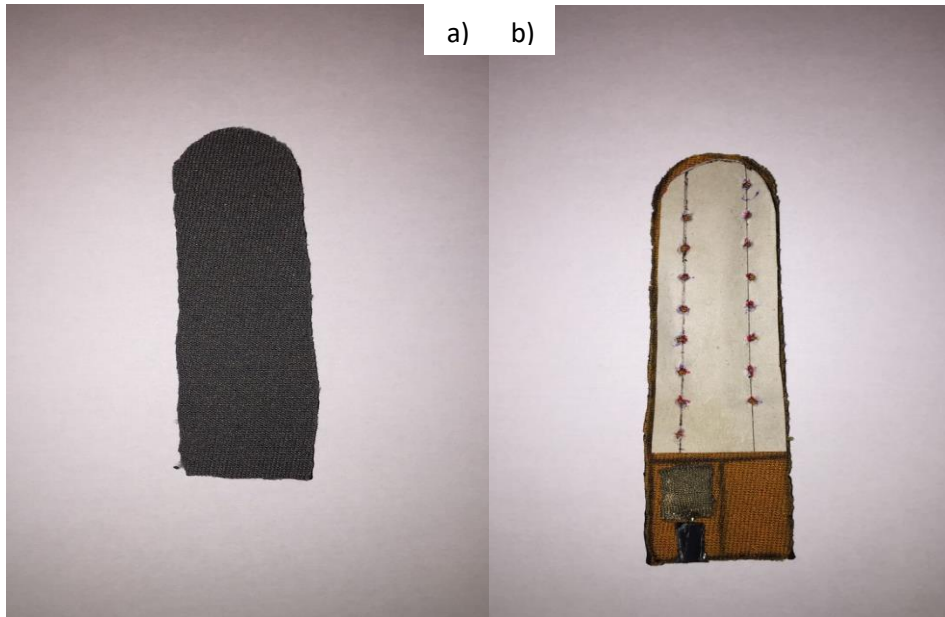


Figura 32 - Paso 1 para la fabricación del sensor. a) Neopreno cortado que se usará como estructura; b) Mismo neopreno al que ya se le ha colocado la tela conductiva y el conector y sobre el que se ha puesto la plantilla que guiará la costura del hilo conductor.

Fuente: elaboración propia.

2. El segundo paso (ver *Figura 33*) consiste en coser el hilo conductor de forma diagonal a lo largo de todo el neopreno, guiándonos por las marcas pintadas en el paso anterior con la plantilla. El hilo se cose comenzando por el lado opuesto al conector, hasta llegar al otro extremo donde se encuentran el tejido conductor y el conector. En esa parte se dan una serie de puntadas de hilo sobre el tejido conductor para lograr hacer un buen contacto. Hay que repetir este proceso en la segunda pieza de neopreno.

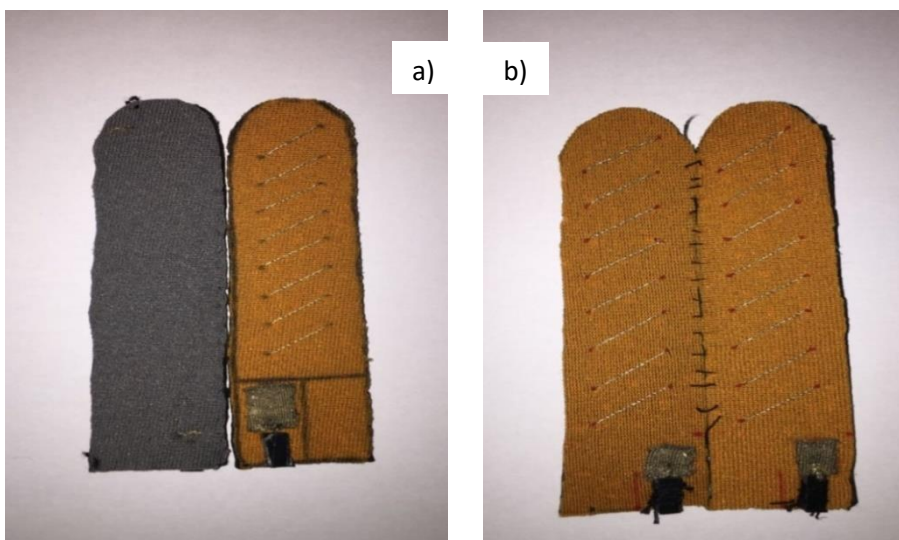


Figura 33 - Paso 2 para la fabricación del sensor. a) y b) En este momento el hilo conductor ya está cosido sobre las caras internas del sensor.

Fuente: elaboración propia.

3. En tercer lugar, se unen las piezas de neopreno de manera que queden las caras con el hilo conductor hacia el interior. De esta manera las puntadas se cruzarán como muestran las Figuras 34 y 35. Después, se corta el MVCF dejando un margen de 0,15 cm a cada lado con relación al neopreno, y se coloca en el interior del sensor para que quede en contacto con ambos planos del neopreno donde se encuentra cosido el hilo conductor.

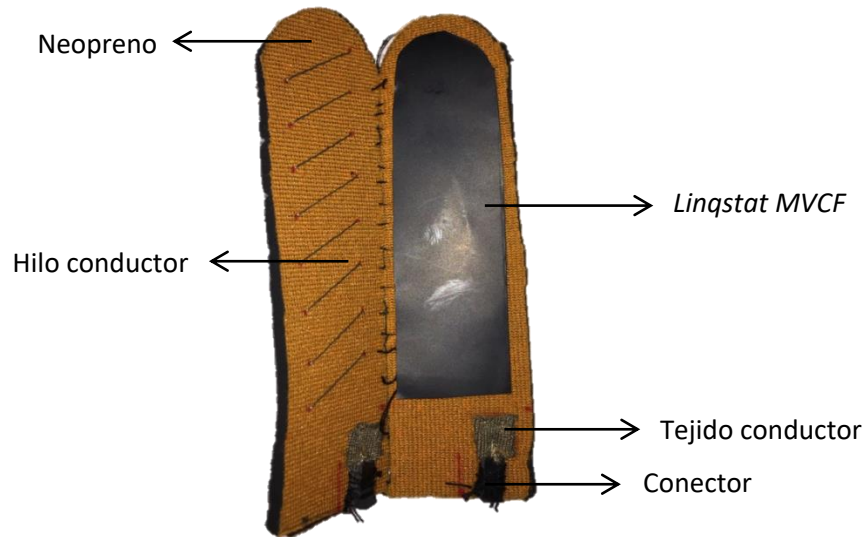


Figura 34 - Paso 3 para la fabricación del sensor.

Fuente: elaboración propia.

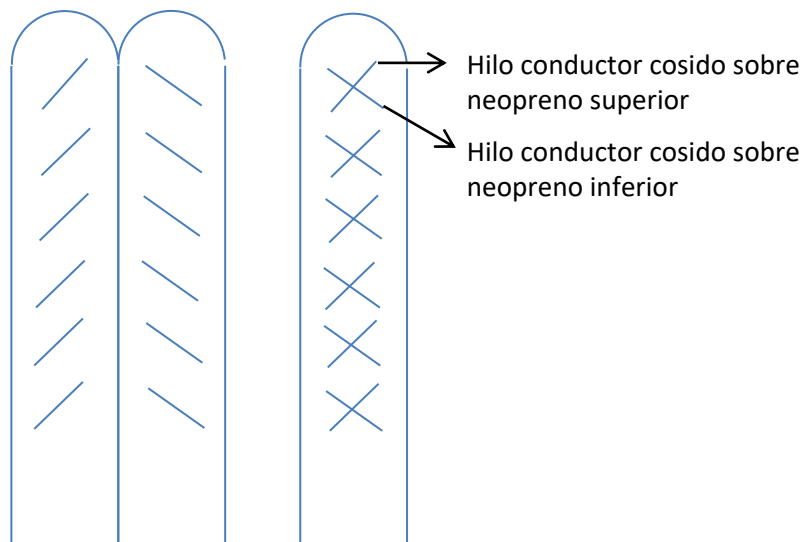


Figura 35 - Paso 3 para la fabricación del sensor.

Fuente: elaboración propia.

4. Por último, se cose el sensor sobre el neopreno alrededor de los bordes y dejando libre los conectores para la conexión de los cables, como se muestra en la *Figura 36*. Se cierra por completo, con cuidado de no coserlo demasiado fuerte y de no perforar la lámina de *MVCF*.

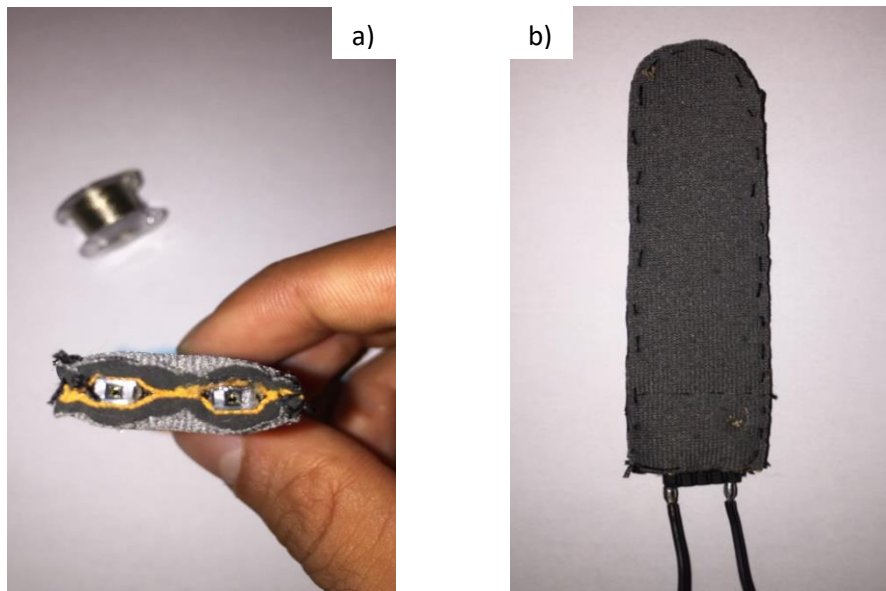


Figura 36 – a) y b) Paso 4 para la fabricación del sensor.

Fuente: elaboración propia.

El neopreno fue usado porque resulta ideal para aislar las puntadas de hilo conductor y también para evitar que el sensor se arrugue al ser doblado tan repetidamente.

#### **Prueba de funcionamiento:**

Finalizado el proceso de fabricación se debe realizar una prueba de funcionamiento para comprobar que el sensor cumple con las condiciones para ser utilizado. Para ello, se conectan ambos conectores a un multímetro en el modo de medición de resistencia. La resistencia del sensor debe disminuir a medida que éste se flexiona, de este modo nos aseguramos el correcto funcionamiento del sensor. Debido a los materiales y a los procesos de fabricación que hemos llevado a cabo se ha establecido que, para que un sensor cumpla con los requisitos de funcionamiento, la resistencia interna del sensor debe ser superior a  $2M\Omega$  en un estado de reposo, e inferior a  $5k\Omega$  cuando el sensor está flexionado al máximo.

Una vez realizada la comprobación, si el sensor ha pasado la prueba, se cose en el guante según el dedo que le corresponda. En la *Figura 37* se muestra el guante con los 4 sensores instalados. Es importante tener en cuenta que durante el funcionamiento del sistema los sensores medirán la flexión de cada dedo de forma individual.



Figura 37 - Guante con los sensores integrados en dedos índice, corazón, anular y pulgar.

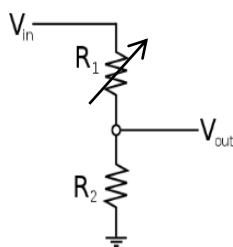
Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos durante la prueba de funcionamiento fueron superiores a 2 M $\Omega$  en estado de reposo del sensor, y de 3,5 k $\Omega$  con el sensor completamente flexionado, por lo que podemos concluir que las pruebas realizadas al sensor fabricado con el material *Linqstat MVCF* dieron buenos resultados según lo establecido. Por tanto, procedemos a realizar la caracterización del sensor para obtener su curva de calibración y modelar su respuesta a diferentes ángulos de flexión.

### Caracterización del sensor:

La curva característica o curva de calibración del sensor de flexión que queremos calcular es una representación gráfica de los resultados medidos (salida) cuando sobre al sensor se aplican diferentes entradas físicas de flexión conocidas. En esta ocasión, para realizar la curva característica del sensor se han registrado los valores digitales que muestra *Arduino* en su *monitor serie*.

Se ha diseñado un programa en *Arduino* específico para esta acción. El código se puede consultar en el *Anexo 2* de la memoria. Como se va a trabajar con valores analógicos del sensor que debe recibir *Arduino* por uno de sus pines de entrada analógicos, es necesario diseñar un circuito de acondicionamiento. El circuito de acondicionamiento consiste en un divisor de tensión y su esquema eléctrico es el siguiente:



Donde  $V_{in}$  es la entrada de 5V de *Arduino*,  $R_1$  es la resistencia variable del sensor,  $R_2$  es una resistencia fija de 22k $\Omega$  y  $V_{out}$  es la salida que lee *Arduino* sobre el pin analógico.  $V_{out} \in [0,5]$  V.

Durante la prueba, la salida  $V_{out}$  se conectó al pin analógico A0 de *Arduino*.

Figura 38 – Divisor de tensión.

La ecuación del divisor de tensión configurado es la siguiente:

$$V_{out} \in [0,5] \text{ V} = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{in} \quad \Rightarrow \quad V_{out} \in [0,5] \text{ V} = \frac{22\text{k}}{R_1+22\text{k}} * 5 \text{ V}$$

$V_{out}$  tiene un valor comprendido entre 0 y 5V dependiendo del valor de la resistencia del material piezorresistivo ( $R_1$ ), la cual a su vez depende del grado de flexión del sensor en ese momento. A mayor flexión del sensor, menor resistencia del material piezorresistivo, por lo que el valor resultante de la ecuación anterior dará valores de salida analógicos mayores. La señal analógica es leída por *Arduino*, que la transforma a digital en el rango de 0 - 1023 mediante su conversor A/D, y este es el valor que registramos para la curva.

El valor de  $R_2$  se ha escogido de forma que  $V_{out}$  sea máxima (5V) cuando la resistencia del sensor sea mínima, para todos los dedos. Después de realizar pruebas, se determinó que con una resistencia de 22k $\Omega$  se obtenía el rango óptimo de  $V_{out}$ .

El funcionamiento del programa de *Arduino* para la toma de valores consiste en introducir por teclado el valor "1" en el *monitor serie* para obtener 10 lecturas analógicas convertidas a digital y consecutivas del sensor. El valor resultado se obtiene realizando la media de todas las mediciones. Éste es el valor que se muestra en el *monitor serie* como resultado final.

En el laboratorio se realizaron las mediciones gracias al instrumento que se puede ver en la *Figura 39*, cedido por el Departamento de Electrónica de la Universidad de Málaga (UMA).

La prueba consistió en realizar mediciones del sensor desde 10° de flexión hasta 140° en pasos de 10°, y en cada uno de ellos se anotaron los resultados obtenidos en el *monitor serie* de *Arduino*.

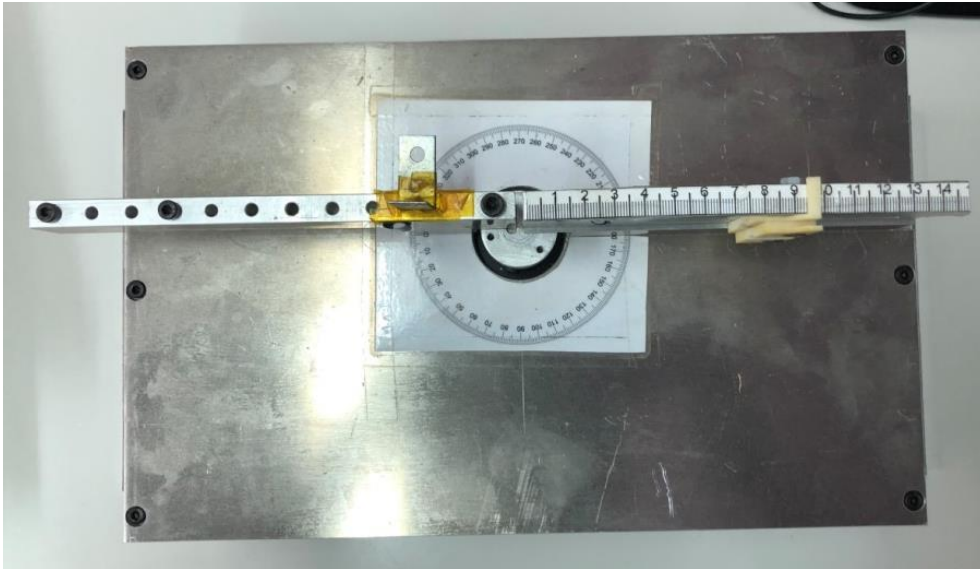


Figura 39 - Transportador de ángulos sobre el que se midió la resistencia del sensor al ser doblado.

Fuente: elaboración propia.

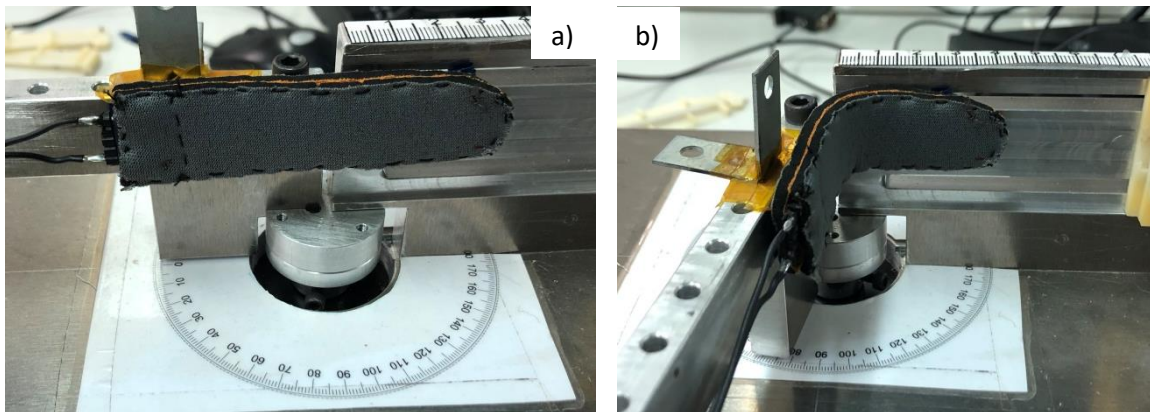


Figura 40 - a) y b) Imágenes obtenidas durante el proceso de obtención de valores para la caracterización del sensor.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados digitales obtenidos se han introducido en el programa *Microsoft Excel* como se muestra en la *Figura 41*, y en ese mismo programa se ha realizado la representación gráfica de la curva de calibración del sensor, ver *Figura 42*:

EjeX (grados)	EjeY (valor digital de monitor serial)
10	30
20	64
30	121
40	286
50	528
60	726
70	799
80	830
90	856
100	876
110	888
120	904
130	909
140	922

Figura 41 - Valores obtenidos para la curva de calibración del sensor.

Fuente: elaboración propia.

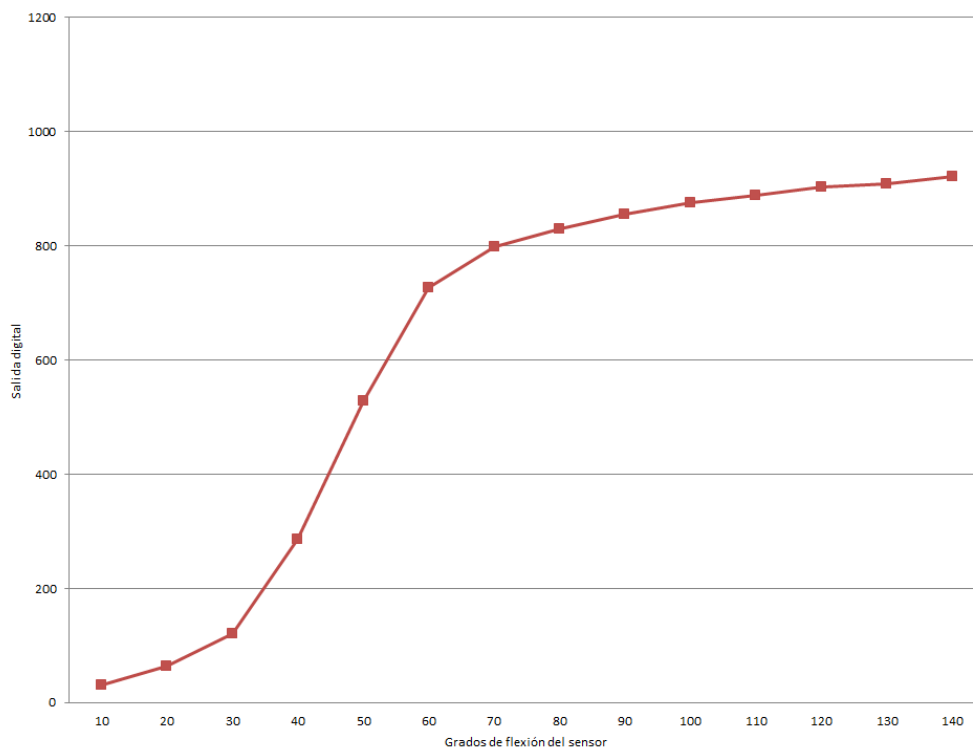


Figura 42 – Representación gráfica de la curva de calibración del sensor.

Fuente: elaboración propia.

La curva de calibración obtenida para *Linqstat MVCF* presenta una forma y un rango de medida aceptable para la aplicación que se propone en este proyecto. En general, el sensor se comporta de forma no lineal, pero pueden identificarse tres regiones de comportamiento casi lineales (lineal a tramos) que tras un procedimiento de calibración apropiado permiten un aprovechamiento razonable de la respuesta del sensor para la aplicación propuesta.

Para comprobar el estado y el comportamiento de cada uno de los sensores que se iban a utilizar en este proyecto, se procedió a la fabricación de los tres sensores restantes. El sensor que ya se había fabricado se cosió sobre el dedo índice del guante, por lo que quedan por fabricar los del dedo anular, corazón y pulgar. Se siguieron los mismos procesos de fabricación, usando exactamente los mismos materiales y realizando la misma prueba de funcionamiento que para el primer sensor fabricado. Una vez finalizados los tres sensores y listos para su funcionamiento, realizamos la caracterización de cada uno de ellos. Los valores se tomaron usando las mismas herramientas y bajo las mismas condiciones que para el sensor del dedo índice. Los valores medidos se almacenaron y se volvió a utilizar *Microsoft Excel* para representarlos, como se muestra en las *Figuras 43 y 44*.

EjeX (grados)	Valor digital monitor serial			
	Índice	Corazón	Anular	Pulgar
10	30	49	60	87
20	64	128	108	196
30	121	196	143	257
40	286	340	243	384
50	528	496	414	590
60	726	770	698	735
70	799	807	759	786
80	830	870	840	853
90	856	884	874	883
100	876	903	890	905
110	888	915	899	920
120	904	924	912	927
130	909	936	916	936
140	922	954	935	940

Figura 43 - Valores obtenidos para la curva de calibración de cada sensor.  
Fuente: elaboración propia.

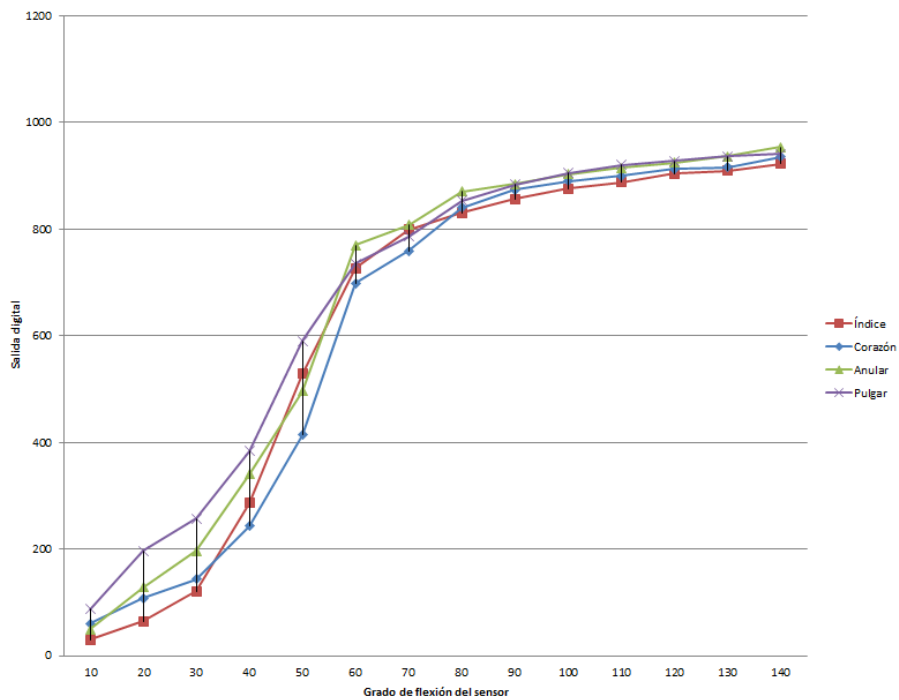


Figura 44 – Representación gráfica de la curva de calibración de cada sensor.  
Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la *Figura 44*, la representación obtenida para los sensores con *Linqstat MVCF* presenta valores similares entre sí. Los resultados se pueden analizar de la misma forma que hemos hecho con el primer sensor del dedo índice. Todos tienen un rango de medida aceptable y son sensores válidos para la aplicación que se propone en este proyecto. En general, se comportan de forma no lineal, pero pueden identificarse tres regiones de comportamiento casi lineal (lineal a tramos). El sensor del dedo pulgar ha presentado valores más altos en el primer tramo que el resto. Esto se puede justificar debido a que este sensor tiene una longitud menor que el resto de los sensores, por lo que al flexionarlo le afecta más la presión ejercida sobre él.

### 3.3 Fabricación de la mano robótica

De la misma forma que se han fabricado los sensores textiles, también se ha llevado a cabo el proceso de fabricación de una mano robótica utilizando materiales *low-cost* y fáciles de encontrar. Antes de comenzar con la fabricación se consultaron diferentes métodos y materiales de fabricación para este tipo de productos en el mercado.

#### Materiales utilizados

1. Pistola de silicona caliente y barras de silicona.
2. Bridas de diferentes tamaños.
3. Servomotor *SG90*.
4. Lana de color rojo.
5. Estructura de madera.
6. Tubos de plástico huecos.
7. Hilo.

#### Características *SG90*:

Pequeño servomotor versátil, comúnmente utilizado en proyectos de robótica junto al microcontrolador *Arduino UNO*. Este servomotor ha sido elegido para este proyecto debido a su bajo coste, pequeñas dimensiones y poco consumo de energía. Antes de elegirlo fue realizada una prueba de funcionamiento para determinar si su movimiento cumplía con los requisitos especificados al inicio del capítulo 3, y los resultados fueron positivos.

- Peso: 9g
- Tamaño: 22,2 x 11,8 x 31 mm
- Torque: 1,8 Kgf·cm
- Velocidad: 0,1s/60°
- Voltaje: ~ 5V
- Ancho: 10µs
- Temperatura 0°C – 55°C

## Proceso de fabricación

1. En primer lugar se fabrica cada dedo por separado. Para ello se corta una brida del tamaño del dedo y se hacen muescas a la altura de las articulaciones para que se pueda doblar. El siguiente paso consiste en recubrir con la lana de color rojo la brida dejando libres las articulaciones. Una vez se han recubierto algunas capas de lana, se le aplica silicona caliente dándole la forma de dedo.
2. A continuación se fija en la punta del dedo el hilo con la silicona, éste servirá de tensor para los servomotores haciendo que se flexione el dedo o que recupere su posición inicial. Una vez se ha fijado el hilo, un extremo se guiará por la cara posterior del dedo y otro por la cara interior, utilizando los tubos de plástico adheridos a cada segmento del dedo con silicona, y asegurándolos con un poco más de lana, como se puede ver en las *Figura 45 y 46*. Es importante no obstruir los orificios de los tubos para que el hilo pueda pasar fácilmente a través de ellos.
3. Una vez se han fabricado los dedos por separado y después de hacer una prueba de flexión manual tirando de los hilos, se procede a unirlos cada uno de los dedos fabricados dando la forma de mano que se busca utilizando barras de silicona entre cada uno de ellos (recubiertas también con lana) y fijando todo con la pistola de silicona caliente.
4. El siguiente paso consiste en anclar la mano a la estructura de madera utilizando bridas y silicona, debe quedar lo más estable y segura posible.
5. Se colocan en la base los 4 servomotores *SG90*, de forma que su funcionamiento no se vea impedido por la propia mano ni por la estructura de madera. Cada motor debe quedar lo más alineado posible con el dedo sobre el que va a actuar.
6. Por último, se sujetan los hilos sobre el motor que a cada uno le corresponda. Esta unión debe quedar tensa, de esta forma nos aseguramos el correcto funcionamiento de la mano robótica.



Figura 45 - Vista de perfil de un dedo terminado.

Fuente: elaboración propia.



Figura 46 - Vista frontal de la mano terminada.

Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Diseño del hardware de control

Para el funcionamiento del sistema se ha diseñado y fabricado un hardware de control. Está formado por un microcontrolador *Arduino UNO*, una *PCB shield* fabricada para este modelo de Arduino, la cual contiene los divisores de tensión y la alimentación de los servomotores, y la carga (mano robótica). A continuación se muestra un diagrama de bloques de cada uno de los componentes del hardware de control.

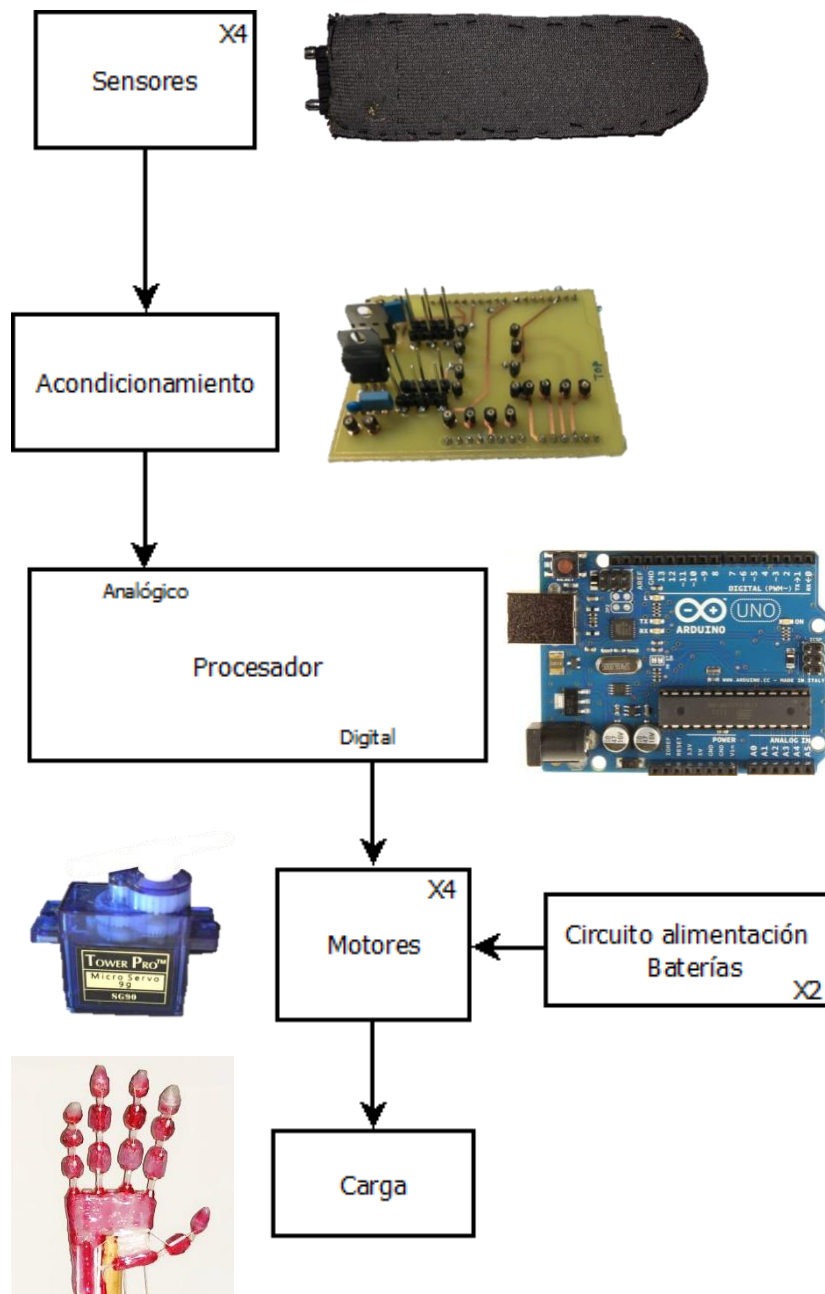


Figura 47 - Diagrama de bloques del hardware del sistema.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se van a describir cada una de las partes que componen la electrónica del sistema mencionado:

- **Unidad de control**

La unidad de control utilizada es *Arduino UNO*. Es un microcontrolador sobre el que se carga el software de control. Las salidas analógicas *Vout* que forman los divisores de tensión se conectan a los pines de entrada analógicos de *Arduino*. Ver *Figura 48* para identificar la posición de cada uno de los pines.

Primero se alimenta a cada sensor con la salida de 5V que posee *Arduino* y, posteriormente, éste capta las señales gracias a la función *AnalogRead* (canal). Cada valor analógico leído lo transforma a digital gracias a su convertor A/D y posteriormente realiza el procesamiento de los datos y los almacena en su memoria interna *EEPROM*. Para finalizar, envía los datos a través de sus pines de salida digitales hasta los servomotores conectados, quienes replican el movimiento medido por el guante con sensores.

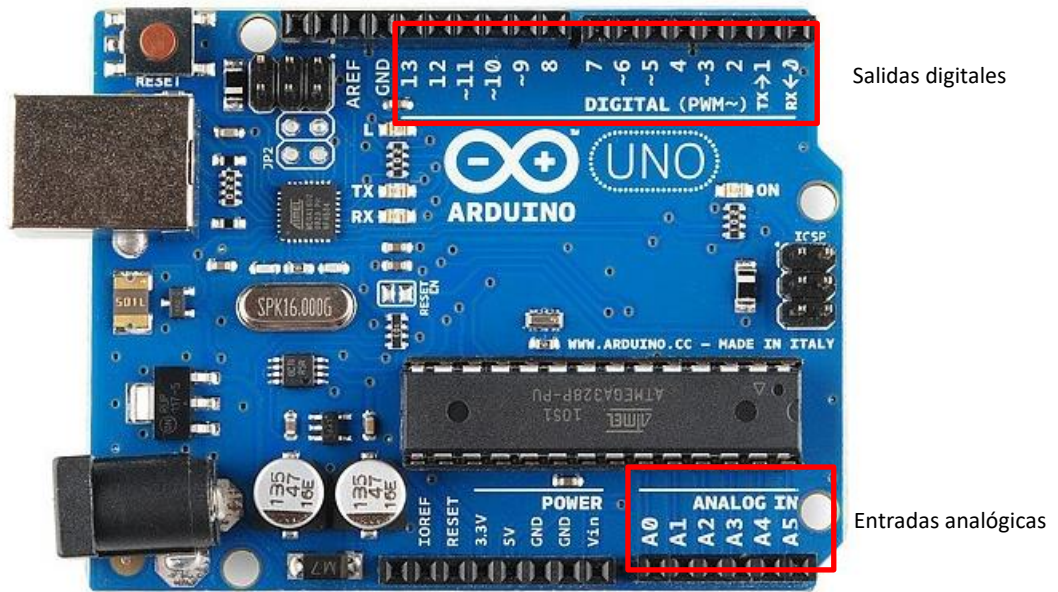


Figura 48 - Microcontrolador *Arduino UNO*.

Fuente: "Arduino UNO R3 Arduino A000066 | BricoGeek.com." [Online]. Available: <https://tienda.bricogeek.com/arduino/305-arduino-uno.html>.

## - Alimentación

Para poder ofrecer la energía necesaria a cada servomotor se realizó una evaluación de consumo de cada uno de ellos.

Fijándonos en las características del servomotor *SG90* citado en el anterior apartado "Fabricación de la mano robótica", se procede a los cálculos de la potencia máxima generada por cada uno de ellos para determinar el consumo necesario:

$$\text{Momento} = 1.8\text{Kg} \cdot \text{cm} \cdot 10\text{N/Kg} \cdot 1\text{m}/100\text{cm} = 0,18\text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Ángulo en rad} = 60^\circ \cdot \text{PI}/180 = 1,047 \text{ rad}$$

$$\text{Velocidad angular} = \text{ángulo de recorrido}/\text{tiempo} = 1,047\text{rad}/0.1\text{s} = 10,47 \text{ rad/s}$$

$$\text{Potencia} = \text{momento} \cdot \text{vel. angular} = 0.18 \cdot 10,47 \text{ rad/s} = 1,88\text{W}$$

$$\text{Potencia} = \text{voltaje} \cdot \text{intensidad} \Rightarrow I = P/V \Rightarrow 1.88/5\text{V} = I \Rightarrow I = \mathbf{0.38A}$$

0.38A es la intensidad en caso de ser un servomotor “perfecto”. Los servomotores no lo son, así que lo normal es decir que ese valor es el 50% de la intensidad real necesaria. En este caso, al ser un pequeño servomotor, además hay que tener en cuenta otros factores como pueden ser el polvo acumulado en su interior, o la falta de grasa en los engranajes con el tiempo. Por todo esto, decimos que el valor obtenido es el 40% de la intensidad necesaria para alimentar 1 servomotor *SG90*. **Intensidad total: 0.6A** por cada servomotor.

Se determinó que, como máximo, en las peores condiciones de trabajo y en su momento “pico” de consumo, cada servomotor necesita 0.6A a 5V constantes. Mientras que en condiciones estables y en un consumo medio de trabajo, cada servomotor debe estar alimentado por 0.45A a 5V constantes. Debido a estos valores se optó por utilizar una fuente regulada utilizando un regulador de voltaje lineal *L7805CV* (*Datasheet* [58]) de 5V + 1 pila de 9V por cada 2 servomotores.

#### - **PCB (shield de Arduino UNO)**

Se ha diseñado y fabricado una *PCB* para utilizar como *shield* de *Arduino*. En un primer momento se utilizó una protoboard a la que se le instalaron los componentes necesarios (resistencias, condensadores, reguladores de corriente...). Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento sobre la protoboard y los ajustes necesarios para la disposición y enrutado final de cada uno de los componentes, se procedió a la fabricación de la *PCB* impresa y definitiva.

#### **Pasos llevados a cabo para la fabricación de la PCB:**

1. Diseño en el programa *Eagle* de la *PCB* y sus componentes (dimensiones, distribución de los componentes y enrutado).
2. Impresión del diseño sobre placa física.
3. Apertura de orificios en *PCB* con taladro de precisión.
4. Soldadura de cada uno de los componentes siguiendo el diseño establecido.
5. Prueba de funcionamiento.

El diseño esquemático y de *PCB* del proceso de fabricación se pueden ver a continuación en las *Figuras 49, 50 y 51*:

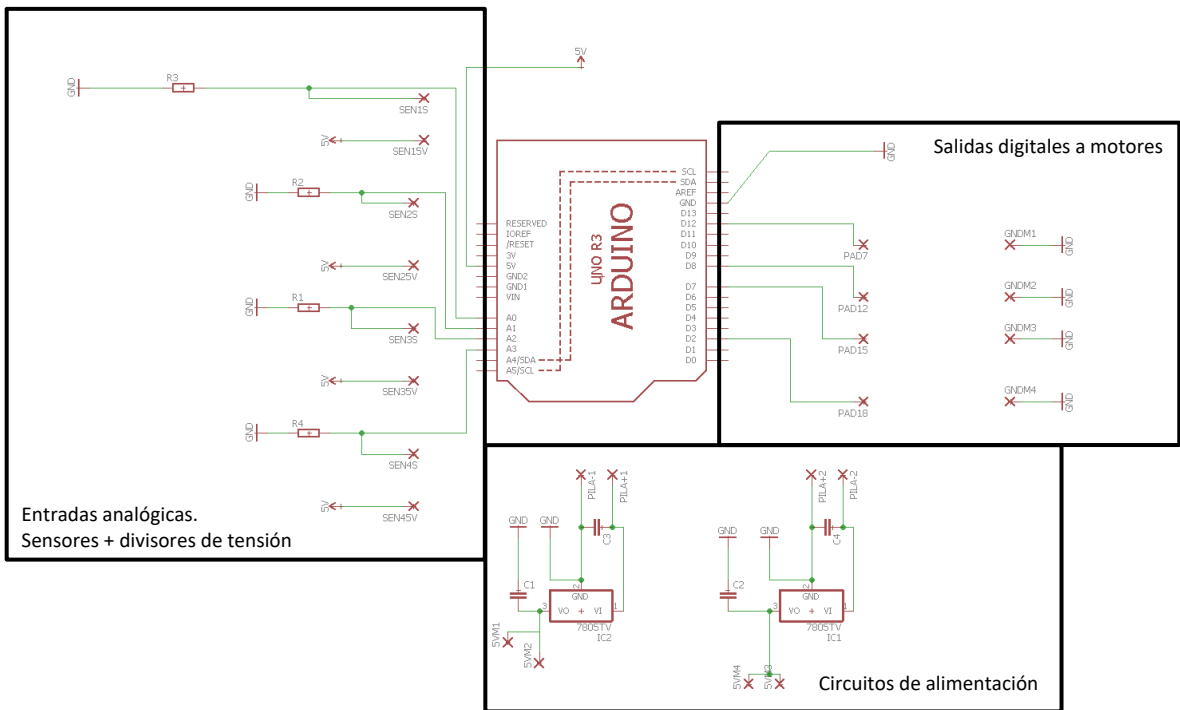


Figura 49 - Diseño esquemático.

Fuente: elaboración propia.

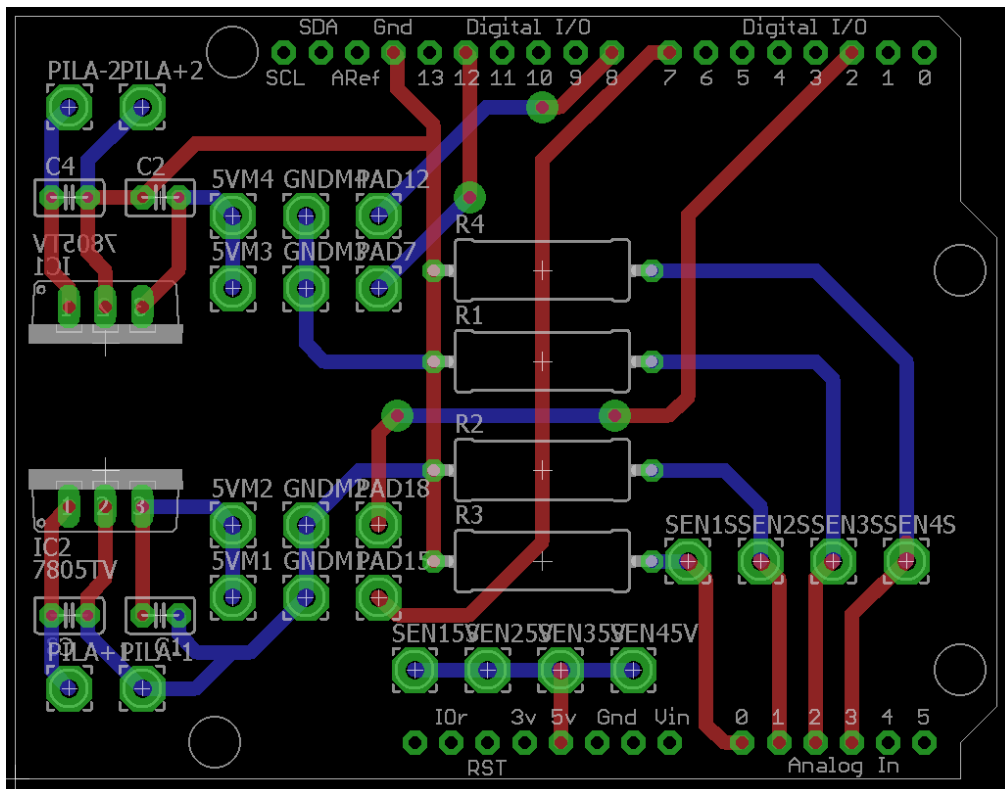


Figura 50 - Diseño board.

Fuente: elaboración propia.

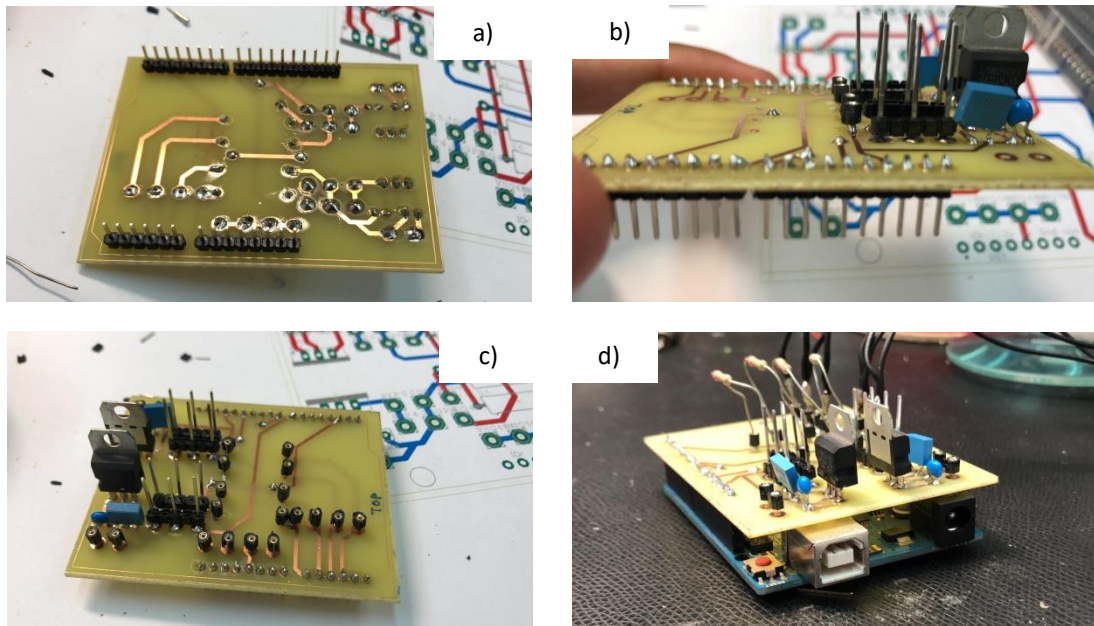


Figura 51 - a), b), c) y d) - Últimos pasos de la fabricación de la PCB.

Fuente: elaboración propia.

Una vez fabricada la *PCB* con cada uno de los componentes soldados, se realizaron pruebas para comprobar su correcto funcionamiento.

En primer lugar, se comprobó con un multímetro la continuidad de ciertos puntos en la *PCB* buscando posibles cortos. Por ejemplo, se comprobó el recorrido de tierra, la alimentación de 5V procedente de las pilas y el propio *Arduino*, y también se comprobaron las señales analógicas y digitales de entrada y salida de *Arduino*. El test dio resultados positivos por lo que se procedió a realizar una prueba de funcionamiento del sistema completo.

Para ello, la *PCB shield* se colocó sobre *Arduino*, se alimentó *Arduino* con el cable USB al ordenador, y el software de control, que se explica en el siguiente punto, se cargó sobre el microcontrolador. Se conectaron las pilas de 9V en la *PCB* y se realizaron las conexiones de cada uno de los pines de los sensores y los motores. Con todo el sistema instalado se procedió a realizar el test con resultados nuevamente positivos, por lo que se determinó que la *PCB* fabricada estaba lista para el funcionamiento.

### 3.5 Software

El programa de control desarrollado en *Arduino* es el cerebro que junto con el músculo (hardware) hacen mover y funcionar cada una de las piezas del sistema. En la *Figura 52* se muestra en un diagrama de flujo el funcionamiento general del programa:

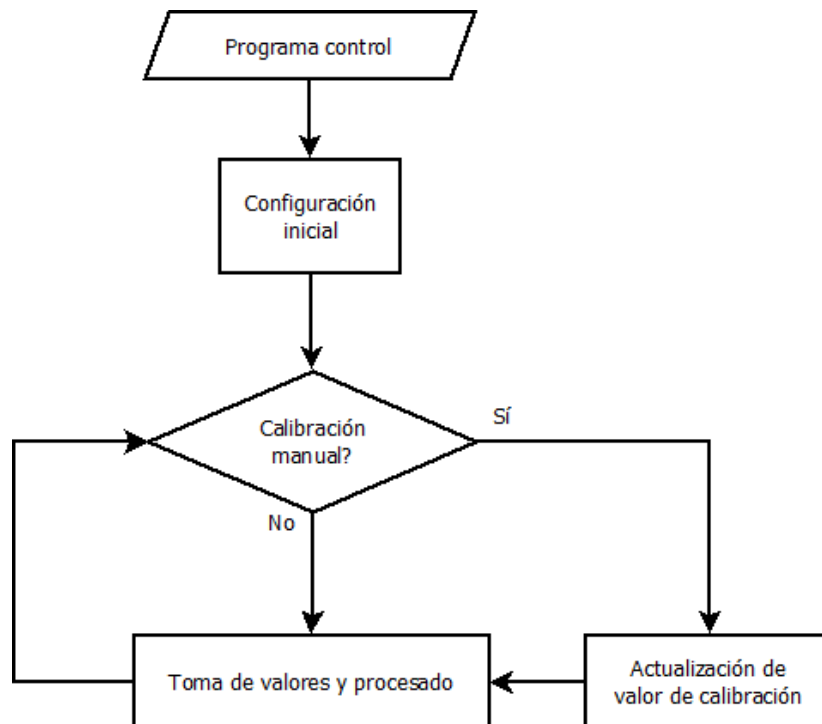


Figura 52 – Diagrama de flujo del programa desarrollado en *Arduino*.

Fuente: elaboración propia.

El software realiza un proceso de calibración, recoge los valores analógicos procedentes de los sensores y una vez transformados de analógicos a digital por el conversor A/D de *Arduino UNO*, procesa los valores obtenidos y los mapea a ángulos de 0 a 180 grados. Finalmente, genera las señales digitales necesarias para el movimiento de los servomotores de la mano robótica.

El programa, en una primera versión, se creó utilizando variables de tipo entero y arrays de enteros. En esta segunda versión se ha optimizado y se han utilizado estructuras y punteros. Cada “*struct*” es un dedo (en total hay 4) y contiene las variables necesarias para el desarrollo del programa.

Una vez explicada la función general del programa *Arduino*, se van a detallar cada uno de los bloques mostrados en el diagrama que lo componen:

- **Configuración inicial:** lo primero a destacar en este apartado es la incorporación al programa de las librerías “<*servo.h*>” y “<*EEPROM.h*>”.

“<*servo.h*>”, como su propio nombre indica, es la librería que permite controlar cada uno de los 4 servomotores incluidos en este proyecto. Por otro lado, “<*EEPROM.h*>” permite utilizar los comandos de la memoria de *Arduino UNO* llamada *EEPROM*. Esta memoria se utiliza para registrar y mantener los datos de

calibración del guante, aun cuando el dispositivo está apagado (memoria no volátil).

Posteriormente se definen los 4 pines analógicos de entrada del sensor, se declaran las variables constantes y se define el *struct Finger*. Cada *Finger* está compuesto por:

- Variable tipo entero llamada **pin** en la que se guarda el pin analógico sobre el que se lee la tensión  $\in [0,5]$  V obtenida de *Vout* de cada divisor de tensión.
- Variable **servo** a la que se le asigna un pin de salida de *Arduino*.
- *Array* de enteros llamado **readings []** de tamaño 10. Es la variable que se va a utilizar para almacenar las lecturas del sensor.
- *Array* de enteros llamado **totals []** de tamaño 6. Se utiliza para guardar los sumatorios de las lecturas de los sensores de cada dedo.
- *Array* de enteros llamado **calibrations []** de tamaño 5. En este *array* se almacena la media realizada de las diferentes lecturas y, posteriormente, se divide el valor obtenido entre 4 para poder almacenarlo en la memoria *EEPROM*. Al tratarse de entrada de valores analógicos convertidos a digital, estos números pueden oscilar entre 0 y 1023 y en la memoria *EEPROM* se puede almacenar como máximo el valor 255.
- *Array* de enteros llamado **averages []** de tamaño 5. En esta variable se guardan los grados de curvatura obtenidos por la lectura del sensor después de realizar un mapeo y conversión de valores digitales (0-1023) a grados (0-180°) del valor original obtenido de *calibrations []*, es decir, *calibrations []*\*4.
- *Array* de enteros llamado **directions []** de tamaño 5. Guarda la dirección de la memoria *EEPROM* donde se guardan los datos de calibración de cada dedo.
- *Array* de enteros llamado **values []** de tamaño 5. Contiene los valores almacenados en *EEPROM*.

Seguidamente se crean tantos *structs Fingers* como sensores con los que trabajamos. Es decir, se crean *finger\_I*, *finger\_C*, *finger\_A* y *finger\_P*, que corresponden al dedo índice, corazón, anular y pulgar respectivamente.

El siguiente paso consiste en crear las funciones que se van a utilizar durante el funcionamiento del programa. Estas funciones son:

- ***finger\_setup ()***:

Inicializador de todas las variables que vamos a utilizar para cada dedo.

- **Save\_EEPROM ():**

Función utilizada para guardar una variable específica en una dirección específica de la memoria *EEPROM*. En la función, se pasa por referencia el *struct Finger* y la posición tanto del *array directions*, que indica la dirección de memoria, como del *array calibrations*, indicando cuál es el valor que se debe almacenar. El valor *calibrations*, cuando se pasa por referencia en esta función, viene dividido entre 4, ya que proviene de los valores digitales obtenidos de la conversión A/D realizada por *Arduino*, y la memoria *EEPROM* sólo puede almacenar hasta el valor 255.

- **calibration ():**

Esta función realiza el proceso de la calibración de los sensores. Lo primero que hace es una conversión de tipo *char* a tipo *int* de la variable “*d*” que recibe por teclado del usuario. Cada uno de los 5 pasos del proceso de calibración se pueden repetir y reescribir por el usuario en el momento que desee durante el uso del guante.

En esta función se guarda sobre cada variable *totals []*, correspondientes a cada dedo, 10 mediciones consecutivas de los sensores utilizando el comando *analogRead (inputpin)* de *Arduino*. Una vez tomadas las 10 mediciones de cada dedo y sumadas en sus variables, el programa deja de tomar mediciones. Es importante mencionar que la adquisición de datos de cada uno de los sensores se realiza de forma multiplexada, es decir, sobre el mismo bucle “*for*” se realiza sistemáticamente, primero la adquisición del valor del sensor del dedo índice, después la de corazón, anular...Y así sucesivamente hasta llegar al total de 10 rondas completas de mediciones.

En una versión anterior de la aplicación este tipo de mediciones no se hacían de forma multiplexada, y con la modificación realizada en la programación se ha notado la mejora en el movimiento de los servomotores. De ahora en adelante, todas las mediciones tomadas en el programa se realizan utilizando esta metodología de adquisición de datos.

A cada uno de los datos almacenados en el *array totals []* que contiene el sumatorio de las 10 mediciones de cada sensor, se les hace la media dividiendo su valor por el número de mediciones tomadas y se almacenan en *calibrations []*. Este será el valor de calibración definitivo para cada sensor. A continuación, *calibrations []* se divide entre 4, ya que vamos a almacenar estos valores en la memoria *EEPROM* de *Arduino*, como se ha comentado anteriormente.

Finalmente se llama a la función *save\_EEPROM ()* pasando por referencia el *struct Finger* y el valor dato obtenido por teclado del usuario.

- **calibration\_memory ():**

Guarda en el *array values []* los valores de calibración almacenados en la memoria *EEPROM*. Se usa el recurso *sizeof* para calcular la longitud del *array*, ya que en *Arduino* no existe el comando “*length*”.

- **read ():**

Función utilizada para realizar las mediciones con *analogRead (inputpin)* del sensor y almacenarlas en *totals []*.

- **calculate\_degrees ():**

```
void calculate_degrees(struct Finger * finger){  
    finger->averages[0] = finger->totals[0] / NUM;  
    finger->averages[1] = map (finger->averages[0], finger->values[0] * 4, finger->values[1] * 4, 10, 45);  
    finger->averages[2] = map (finger->averages[0], finger->values[1] * 4, finger->values[2] * 4, 45, 90);  
    finger->averages[3] = map (finger->averages[0], finger->values[2] * 4, finger->values[3] * 4, 90, 135);  
    finger->averages[4] = map (finger->averages[0], finger->values[3] * 4, finger->values[4] * 4, 135, 180);  
}
```

Esta función es muy importante para el correcto funcionamiento de la mano robótica, ya que ayuda en la precisión del movimiento del servomotor. Esta operación es la diferencia entre tener un mano robótica que funciona como un simple on/off, es decir, sólo se abre y se cierra, o una mano robótica capaz de mantener la posición en grados determinados gracias a la precisión del envío de ángulos al servomotor.

*calculate\_degrees ()* se utiliza para realizar el mapeo de los valores digitales que se obtienen de la lectura de valores obtenida por la función *read ()*. En este momento, para cada dedo se diferencian 4 grupos de ángulos diferentes: *averages [1, 2, 3, 4]* que, como se puede ver señalado en el extracto de código anterior, corresponden a intervalos de 10°-45°, 45°-90°, 90°-135° y 135°-180° respectivamente. Como resultado del mapeo tendremos el valor en grados de movimiento, obtenido utilizando los valores fijados de calibración que tiene que ejecutar el motor para realizar el mismo movimiento que está realizando el usuario con el guante.

- **update\_motor ():**

Dependiendo del valor en grados obtenido por cada dedo, se utiliza el comando “*write*” para enviar al servomotor el valor en grados al que debe desplazarse, seguido de un “*delay*” en milisegundos. Este “*delay*” varía según el rango de grados al que deba desplazarse el motor, lo cual le ayudará a mantener la estabilidad y a mover la mano robótica con mayor realismo.

Una vez definidas cada una de las funciones, se construye el *setup ()*. En él se abre el puerto serie para que el usuario pueda introducir valores por teclado en el *monitor serie* de *Arduino* y se llama a la función *finger\_setup ()*, a la que se pasa por referencia el *struct Finger*, el pin asignado a la entrada analógica del sensor, el pin de salida al servo y la dirección de la memoria *EEPROM* en la que se guardarán los valores de calibración para ese dedo.

A continuación comienza el *loop ()* del programa. Esta es la parte de código que se ejecutará en bucle mientras estemos haciendo uso del sistema. Se divide en dos bloques principales:

- **Proceso de calibración:** el proceso de calibración consiste en obtener los valores de medición de los sensores en los instantes en que los dedos de la mano de la persona que lo lleva puesto están a 0, 45, 90, 135 y 180 grados.

En la práctica, el usuario debe acceder al *monitor serie* del programa de *Arduino*. Una vez ahí, tiene que colocar la mano en posiciones determinadas para comenzar la obtención de valores. Estas posiciones tienen en cuenta los grados de inclinación a los que tienen que flexionarse los dedos, y se especifican en la tabla siguiente:

Introducir por pantalla en el <i>monitor serie</i> (#)	Ángulo de inclinación (°)
1	0
2	45
3	90
4	135
5	180
"n"	Restaura los valores de la última calibración

Por ejemplo, el usuario que quiera comenzar una calibración deberá ir a su pantalla de *monitor serie* de *Arduino*, colocar el guante con todos sus dedos a 0° (rectos) y, en esa posición, introducir por teclado el número 0. De esta forma la calibración queda registrada. Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 53:

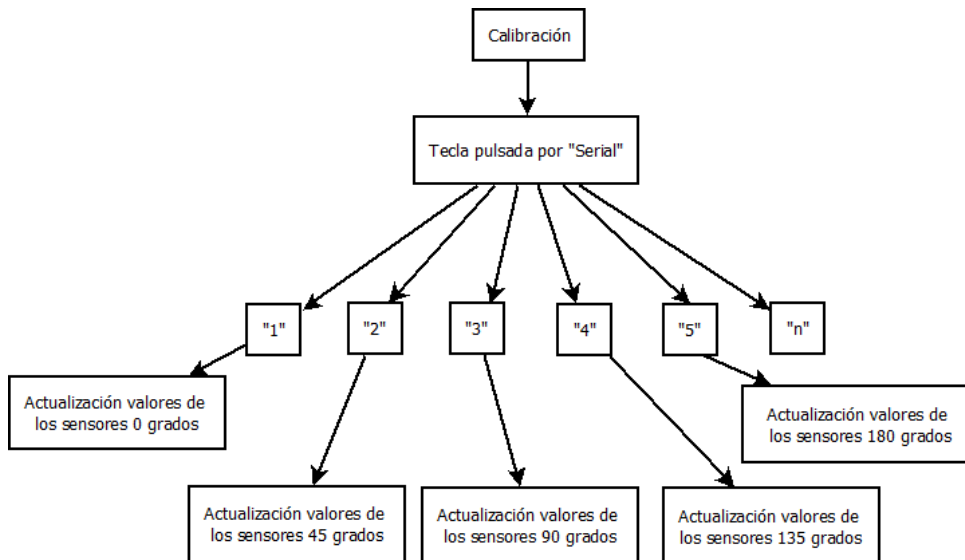


Figura 53 – Diagrama de flujo del software durante el proceso de calibración.

Fuente: elaboración propia.

El programa funciona de la siguiente forma: el *loop* () principal del código comienza con el proceso de calibración de los sensores de cada uno de los dedos. La calibración es lo primero que se debe hacer una vez el guante está colocado en la mano y *Arduino* está arrancado con el programa cargado. En cuanto se ejecuta está constantemente con el puerto serie de comunicación abierto, a la espera de recibir uno de los siguientes números o letra por teclado: 1, 2, 3, 4, 5 o "n". Es decir, pulsando una de estas teclas desde el *monitor serie* de *Arduino* se realizará una actualización sobre la calibración. En caso de no pulsar ninguna de estas teclas, el programa pasará directamente al siguiente bloque de toma de valores y procesado.

Los números del 1 al 5 indican a qué "case" se va a acceder, por ejemplo:

Al pulsar sobre la tecla 1 (calibración cuando los sensores están a 0°), se actualizan y sobrescriben automáticamente los valores guardados para las calibraciones en 0°. Esto se produce llamando a la función *calibration* () y pasándole como "dato" la tecla 1 que se ha pulsado para que, sobre esa variable, se actualicen los valores en cada dedo. Es importante destacar que en cualquier momento del programa se puede pulsar cualquiera de las teclas de calibración para actualizar el/los datos de esa/s variables.

La estructura de programación que siguen los procesos de calibración de las teclas 1, 2, 3, 4 y 5 son los mismos, cambiando únicamente el nombre de las variables donde se guardan los datos. Sin embargo, el proceso cuando pulsamos sobre la tecla "n" cambia. En ese caso se llama a la función *calibration\_memory* () pasando por referencia el *struct Finger*, y se procede al uso de las calibraciones almacenadas en la memoria *EEPROM* de *Arduino*.

- **Toma de valores y procesado:** como su propio nombre indica, en esta fase de la programación es donde se leen continuamente los valores obtenidos de los sensores. Estos valores se procesan y se envían a los motores para que realicen las acciones de movimiento sobre la mano robótica.

Si no se ha escrito nada en el *monitor serie* o si ya se ha ejecutado alguna de las calibraciones del paso anterior, lo siguiente es llamar a la función *read ()* para cada uno de los sensores de los dedos que se pasan por referencia. Se leerán un total de 10 veces y a continuación se ejecutan las funciones *calculate\_degrees ()* y *update\_motor ()* respectivamente.

Terminado este bloque se volverá a iniciar el *loop ()*, esperando una nueva actualización de los valores de calibración en caso de que el usuario teclee uno de los números, y después realizará la toma de valores y procesado.

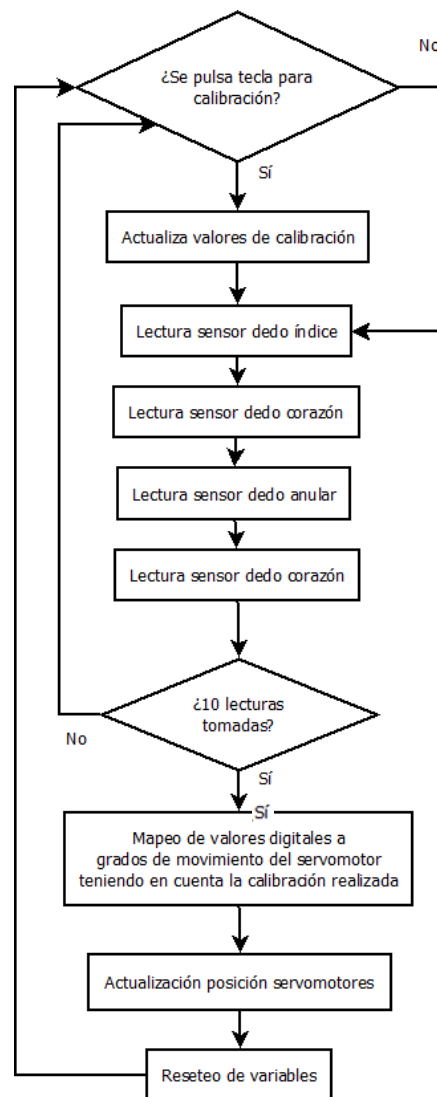


Figura 54 – Diagrama de flujo del software durante *void loop()*.

Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Pruebas de funcionamiento

Una vez finalizado el proceso de diseño y fabricación de cada uno de los componentes del sistema *wearable*, se iniciaron las pruebas de funcionamiento. Consistieron en una validación completa del sistema, el objetivo era cumplir con los requisitos previamente establecidos de funcionamiento, citados en el apartado Introducción de este mismo capítulo. Durante la fabricación, se fueron validando cada una de las partes que componen el sistema, pero aquí se recoge una validación global, en la que se van a mostrar imágenes del funcionamiento del guante con sensores textiles para el movimiento de la mano robótica.

- 1) Puesta en marcha del sistema, la *PCB shield* se conecta con el microcontrolador *Arduino*, se realizan las conexiones de los sensores en las entradas analógicas de *Arduino* en la *PCB* y los motores en las salidas digitales. *Arduino* se conecta al ordenador por medio de conexión USB y se alimenta a los motores con las pilas 9V. **Resultado:** positivo. El sistema se ha iniciado, *Arduino* ha arrancado y los servomotores dan respuesta a la alimentación.
- 2) Se carga el programa en *Arduino* y se realiza la calibración de valores. **Resultado:** positivo. *Arduino* ha compilado y subido el programa y la calibración de valores se ha realizado correctamente.
- 3) Se comprueba que los dedos índice, corazón, anular y pulgar tienen respuesta a los movimientos del guante. **Resultado:** positivo. Como se puede ver en las siguientes imágenes, los motores responden a los movimientos del guante con sensores textiles.

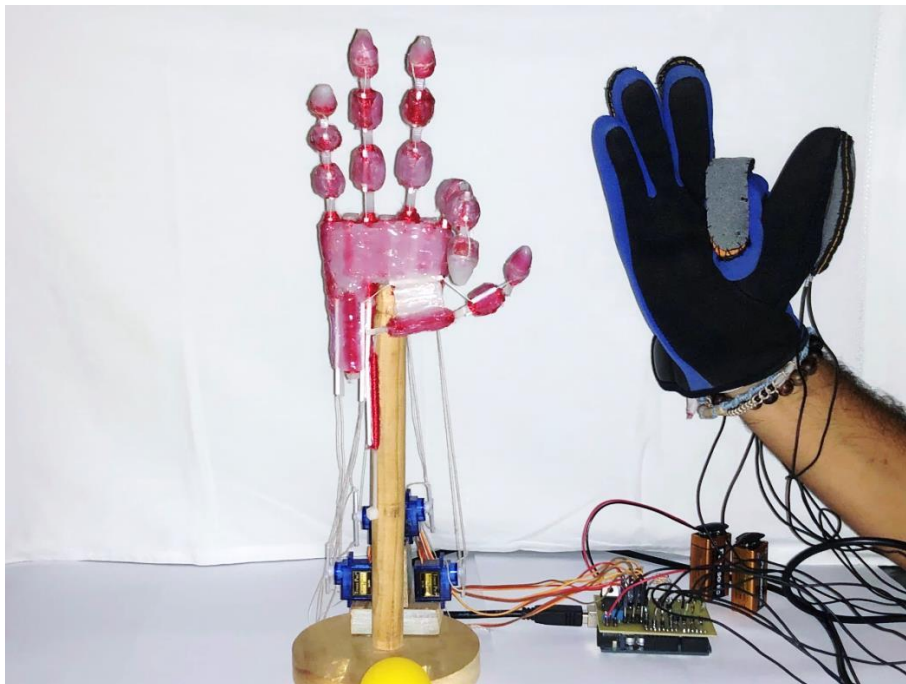


Figura 55 – Comprobación del movimiento del dedo índice del sistema.

Fuente: elaboración propia.

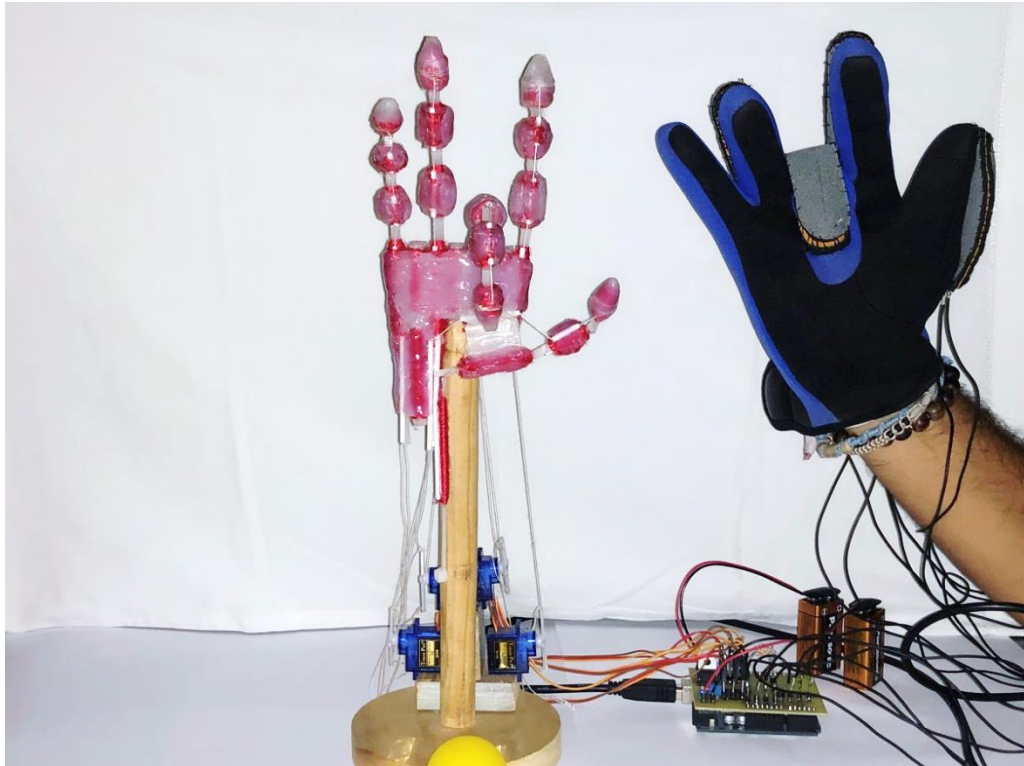


Figura 56 – Comprobación del movimiento del dedo corazón del sistema.

Fuente: elaboración propia.

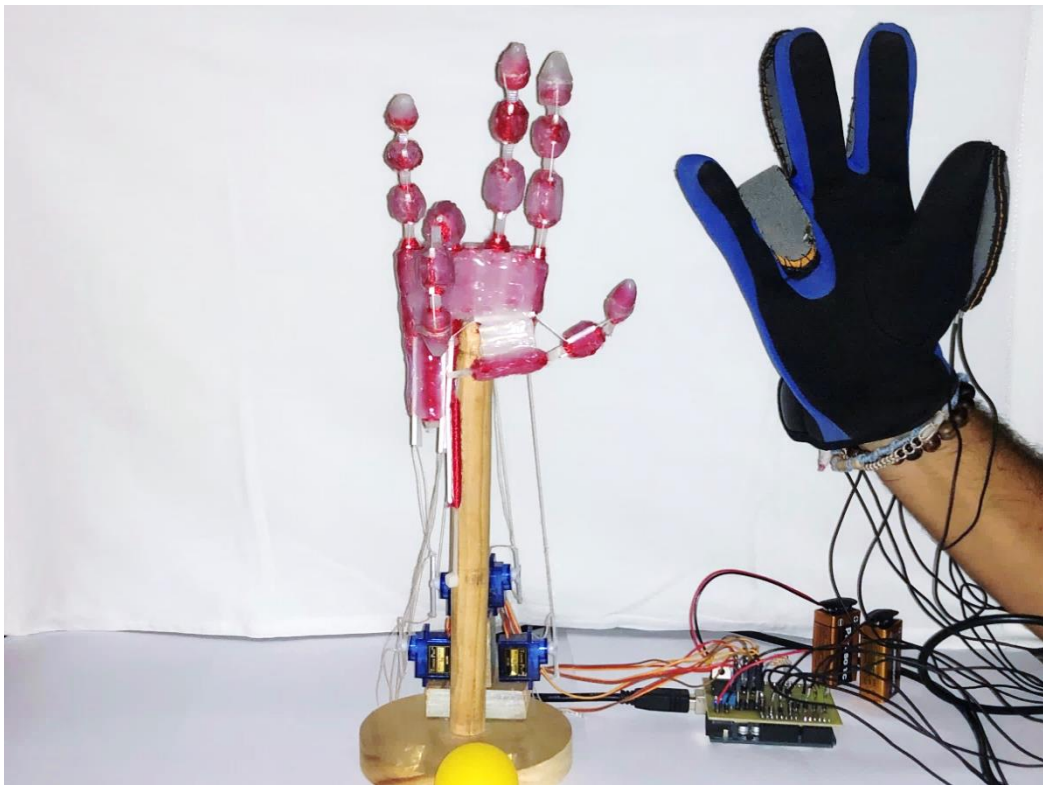


Figura 57 – Comprobación del movimiento del dedo anular del sistema.

Fuente: elaboración propia.

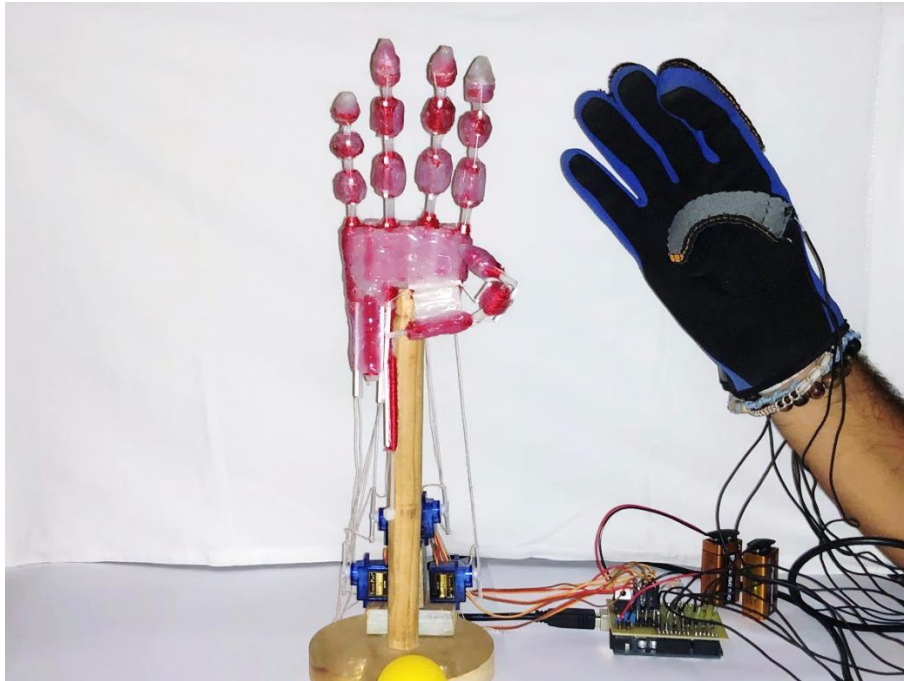


Figura 58 – Comprobación del movimiento del dedo pulgar del sistema.

Fuente: elaboración propia.

- 4) Se comprueba que el sistema tiene precisión en un ejemplo de coger una pelota de goma con dos de los dedos. Resultado: positivo. El sistema es capaz de coger la pelota.

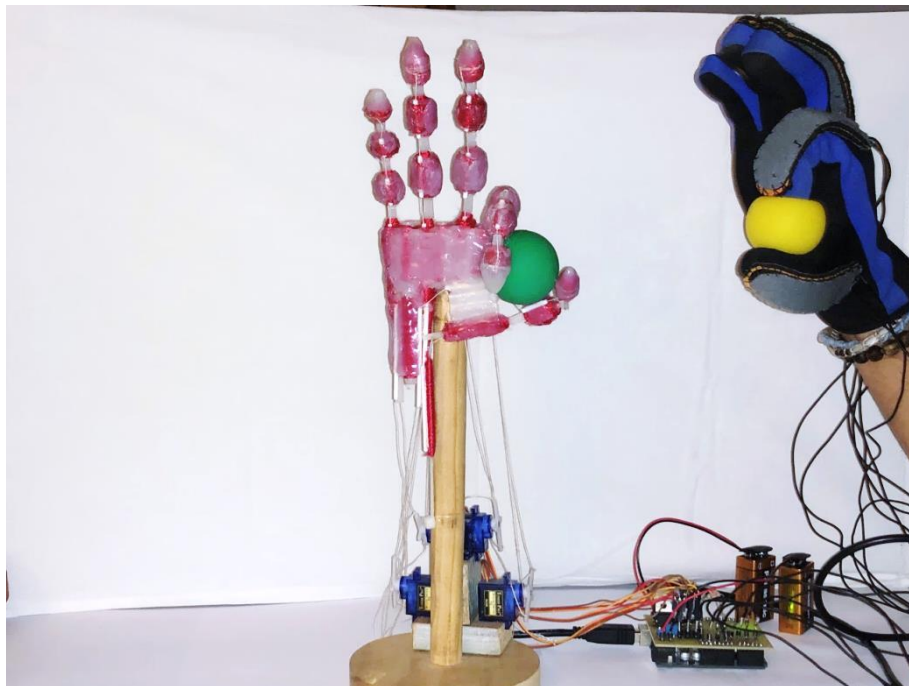


Figura 59 – Comprobación del movimiento durante agarre de pelota.

Fuente: elaboración propia.

5) Finalmente se realiza una prueba de precisión que consiste en la inclinación del dedo índice a ciertos grados de flexión para probar que el sistema es capaz de replicarlo. **Resultado:** positivo. El sistema es capaz de inclinarse ciertos grados, por lo que no se comporta como un interruptor, es decir, tiene sensibilidad y es capaz de replicar el movimiento de la mano del usuario.

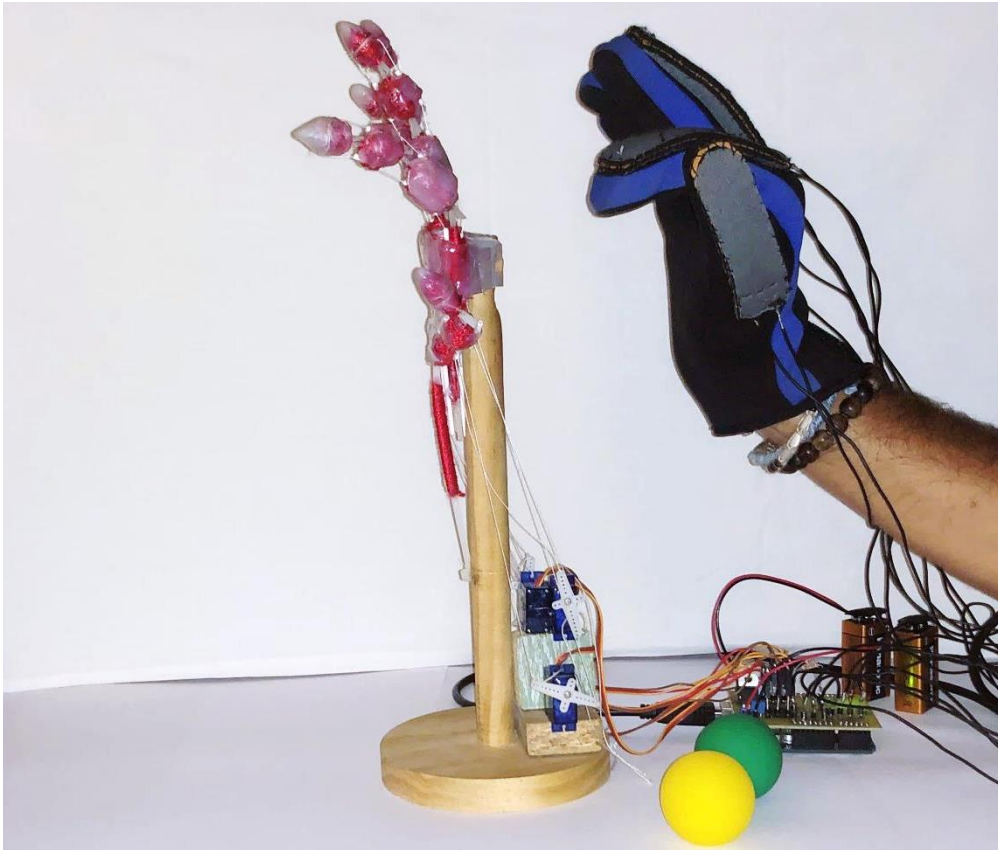


Figura 60 – Comprobación de la precisión de movimiento del dedo índice del sistema.

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran fotogramas seleccionados de un vídeo en el que se puede observar el movimiento de precisión del sistema:



Figura 61 - Comprobación de la precisión de movimiento del dedo índice del sistema.

Fuente: elaboración propia.



## CONCLUSIONES



La finalidad del TFG titulado “Sensores textiles: aplicación en el campo de la Ingeniería de la Salud” ha sido adentrarnos en el mundo de la tecnología *wearable* y de los sensores textiles y proponer y desarrollar una aplicación.

Los principales resultados son:

- Se presenta una visión de conjunto de la tecnología *wearable* en general, y de los sensores textiles en particular.
- Se presenta un ejemplo de aplicación que consiste en el diseño y la fabricación de un dispositivo *wearable* compuesto por sensores textiles de flexión, un microcontrolador (*Arduino*), una PCB de interfaz y una mano robótica. Esta mano replica en tiempo real los movimientos del usuario que porta un guante donde se ubican los sensores de flexión. Se ha diseñado el software que permite la adquisición de los datos de los sensores del guante y el software de control de la mano robótica.

Para la realización de este ejemplo se hizo un estudio de los sensores textiles de flexión existentes, y se establecieron los requisitos que debía cumplir el sistema.

El diseño del software se ha optimizado para conseguir un movimiento de los dedos lo más natural posible.

Como información complementaria se ha incluido también una guía de uso con detalles del funcionamiento del sistema, para servir de apoyo al usuario portador del mismo.

Para finalizar, dada la importancia que tiene esta tecnología y los avances aún necesarios en el campo de la salud, un aspecto interesante a considerar sería hacer de este sistema un dispositivo que permita la manipulación a distancia de objetos peligrosos, un dispositivo diseñado para fines de rehabilitación, o un desarrollo más exhaustivo para la aplicación en prótesis robóticas para personas, entre otros. Todos ellos orientados al campo de la salud.



## REFERENCIAS



- [1] "Sensors | Free Full-Text | Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology | HTML." [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11734/htm>.
- [2] "Apple Watch Series 4," *Apple (España)*. [Online]. Available: <https://www.apple.com/es/apple-watch-series-4/>.
- [3] "Salvino D'Armate - Inventor de gafas." [Online]. Available: <http://www.glasseshistory.com/glasses-inventor/salvino-d-armate/>.
- [4] "About Time: A First Look at Time and Clocks - Bruce Koscielniak - Google Libros." [Online]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qZ4hV9vqKHIC&oi=fnd&pg=PT13&dq=peter+henlein+clock&ots=-2DVxYKgKt&sig=XNRLF9YxGjHOGmwteHo15711z0g#v=onepage&q=henlein&f=false>.
- [5] "Computer, February 1997 - Cybersquare." [Online]. Available: <http://wearcam.org/ieeecomputer/r2025.htm>.
- [6] M. D. Jenkins and J. Schwartz, "75 Inventors: Edward G. Newman, Fairfax Station,," p. 16.
- [7] "The Quartz Watch," 2011. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110323064128/http://invention.smithsonian.org/centerpieces/quartz/coolwatches/pulsar.html>.
- [8] "Banda Pulsómetro Polar H10® - Análisis - PulsómetroSinBanda.com." [Online]. Available: <https://www.pulsometrosinbanda.com/polar-h10-pulsometro-analisis/>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [9] "Valencell | Technology," *Valencell*. [Online]. Available: <https://valencell.com/ppgsensors/>.
- [10] "Philips IP&S." [Online]. Available: <http://www.ip.philips.com/about/>.
- [11] "Product Portfolio | OSRAM." [Online]. Available: <https://www.osram.com/os/products/index.jsp>.
- [12] "IJERPH | Free Full-Text | Opportunities of Wearable Technology to Increase Physical Activity in Individuals with Chronic Disease: An Editorial | HTML." [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/17/3124/htm>.
- [13] J. Gacén, "FIBRAS QUÍMICAS. PRODUCTOS DE ALTA ESTÉTICA .)," p. 8.
- [14] M. Mirafteb and A. R. Horrocks, *Ecotextiles: The Way Forward for Sustainable Development in Textiles*. Elsevier, 2007.
- [15] "Textiles nano." .
- [16] P. P. Dattilo, M. W. King, N. L. Cassill, and J. C. Leung, "Medical Textiles: Application of an Absorbable Barbed Bi-directional Surgical Suture," p. 6.

- [17] Y. Dong, J. Kong, C. Mu, C. Zhao, N. L. Thomas, and X. Lu, "Materials design towards sport textiles with low-friction and moisture-wicking dual functions," *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 82–87, 2015.
- [18] "Tejidos inteligentes: La tecnología detrás de las prendas," *Desnivel.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.desnivel.com/material/material-noticias/tejidos-inteligentes-la-tecnologia-detras-de-las-prendas/>.
- [19] APTT, "TEXTILES INTELIGENTES," APTT. 2018.
- [20] "Flora y LilyPad cómo crear proyectos para Wearables con Arduino," *Programar fácil con Arduino*, 2017. [Online]. Available: <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/flora-lilypad-wereables-arduino/>.
- [21] "Techtextil – Leading international trade fair for technical textiles and nonwovens." [Online]. Available: <https://techtextil.messefrankfurt.com/frankfurt/en.html>.
- [22] "Startseite." [Online]. Available: <https://flt-licht.de/index.php/en/>.
- [23] "ANTELOPE Sportswear: Muscle Activating Smartsuit," *Indiegogo*. [Online]. Available: <https://www.indiegogo.com/projects/1386380>.
- [24] "About Nonwovens." [Online]. Available: <http://www.inda.org/about-nonwovens/>.
- [25] J. M. Pevnick, K. Birkeland, R. Zimmer, Y. Elad, and I. Kedan, "Wearable technology for cardiology: An update and framework for the future," *Trends in Cardiovascular Medicine*, vol. 28, no. 2. Elsevier Inc., pp. 144–150, 01-Feb-2018.
- [26] "Mejores Smartwatch y Wearables | Samsung España." [Online]. Available: <https://www.samsung.com/es/wearables/all-wearables/?smart-watch>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [27] "Polar Team Pro | Wearable GPS athlete tracking and performance analysis | Polar Global." [Online]. Available: [https://www.polar.com/en/b2b\\_products/team-pro](https://www.polar.com/en/b2b_products/team-pro). [Accessed: 18-Sep-2019].
- [28] "AerBetic." [Online]. Available: <https://www.aerbetic.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [29] "Sitio oficial de Fitbit para smartwatches, pulseras de actividad, monitores deportivos y mucho más." [Online]. Available: <https://www.fitbit.com/es/home#>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [30] "Mi Global Home." [Online]. Available: <https://www.mi.com/global/miband#09>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [31] "Soluciones para su Convergencia Digital - Zerintia Technologies." [Online]. Available: <https://zerintia.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [32] "Los tejidos inteligentes y el desarrollo tecnológico de la industria textil - Javier

- Ramón Sánchez Martín - tecnicaindustrial.es.” [Online]. Available: <http://www.tecnicaindustrial.es/tifrontal/a-687-los-tejidos-inteligentes-desarrollo-tecnologico-industria-textil.aspx>.
- [33] S. Coyle, D. Morris, K.-T. Lau, D. Diamond, and N. Moyna, “Textile-Based Wearable Sensors for Assisting Sports Performance,” in *2009 Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2009, pp. 307–311.
- [34] “Sensing Tex - Think it Sensitive, Make it Smart.” [Online]. Available: <http://sensingtex.com/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [35] “How To Measure Joint Angle With Stretch Sensors.” [Online]. Available: <https://stretchsense.com/article-resources/case-study/how-to-measure-joint-angle-with-stretch-sensors/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [36] J. M. Pevnick, K. Birkeland, R. Zimmer, Y. Elad, and I. Kedan, “Wearable Technology for Cardiology: An Update and Framework for the Future,” *Trends Cardiovasc. Med.*, vol. 28, no. 2, pp. 144–150, 2018.
- [37] M. Haghi, K. Thurow, and R. Stoll, “Wearable Devices in Medical Internet of Things: Scientific Research and Commercially Available Devices,” *Healthc. Inform. Res.*, vol. 23, no. 1, p. 4, 2017.
- [38] “Visuomotor adaptation in head-mounted virtual reality versus conventional training | Scientific Reports.” [Online]. Available: <https://www.nature.com/articles/srep45469>.
- [39] “Cómo cambiarán las tecnologías wearable los próximos Estudios Clínicos.” [Online]. Available: <https://www.fundanet.es/blog/como-cambiaran-las-tecnologias-wearable-los-proximos-estudios-clinicos/>. [Accessed: 17-Sep-2019].
- [40] “Graphene Info | The Graphene Experts.” [Online]. Available: <https://www.graphene-info.com/>.
- [41] “El grafeno: propiedades y aplicaciones,” 2017.
- [42] “Graphenano | Graphenano Nanotechnologies - Grupo Graphenano.” [Online]. Available: <https://www.graphenano.com/>.
- [43] S. Talwar, D. Choudhury, K. Dimou, E. Aryafar, B. Bangerter, and K. Stewart, “Enabling technologies and architectures for 5G wireless,” in *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014, pp. 1–4.
- [44] B. Vargas, R. Dionisio, and O. Almeida, “ANÁLISIS DE CAMBIOS TELEFONÍA CELULAR 2 Análisis de cambios en características fundamentales de la Telefonía Celular desde 1G hasta 5G,” 2017.
- [45] C. Sereni, “Formación ética escolar: Buscando el camino hacia una ciudadanía responsable,” 2015.
- [46] “Podoactiva participa en la jornada sobre ‘Wearables’ organizada en el Global

- Sport Innovation Center de Microsoft | Podoactiva. Líderes en Podología. Podólogos expertos en biomecánica.” [Online]. Available: [https://www.podoactiva.com/es/blog/podoactiva-participa-en-la-jornada-sobre-wearables-organizada-en-el-global-sport-innovation?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F&utm\\_referer=https%3A%2F%2Fwww.podoactiva.com%2Fes%2Fblog%2Fpodoactiva-participa-en-la-jornada-sobre-wearables-organizada-en-el-global-sport-innovation](https://www.podoactiva.com/es/blog/podoactiva-participa-en-la-jornada-sobre-wearables-organizada-en-el-global-sport-innovation?utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F&utm_referer=https%3A%2F%2Fwww.podoactiva.com%2Fes%2Fblog%2Fpodoactiva-participa-en-la-jornada-sobre-wearables-organizada-en-el-global-sport-innovation). [Accessed: 22-Sep-2019].
- [47] M. Maksimović, “Improving computing issues in Internet of Things driven e-health systems,” 2017.
- [48] “SEN-10264 Sparkfun Sensor Flex Sparkfun.” [Online]. Available: <https://www.electan.com/sensor-flexion-sparkfun-p-3135.html>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [49] “Como Hacer Un Guante Con Sensores Flex Y Conexión Para Android: 9 Steps.” [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Como-Hacer-Un-Guante-Con-Sensores-Flex-Y-Conexión-/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [50] A. Atalay *et al.*, “Batch Fabrication of Customizable Silicone-Textile Composite Capacitive Strain Sensors for Human Motion Tracking,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 2, no. 9, 2017.
- [51] “MoCap Pro Glove (Pair) - StretchSense.” [Online]. Available: <https://stretchensed.wordpress.com/product/multi-knuckle-splay-glove-pair/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [52] “StretchFABRIC Sensing Element (SSD18) StretchFABRIC Sensing Element.”
- [53] “Fabric Bend Sensor: 8 Steps (with Pictures).” [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Fabric-bend-sensor/>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [54] “HOW TO GET WHAT YOU WANT.” [Online]. Available: <https://www.kobakant.at/DIY/?p=5615>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [55] “Pattern creations by sensing body motion 3 | one-o-one.” [Online]. Available: <http://nerding.at/course/101/?p=1522>. [Accessed: 18-Sep-2019].
- [56] “Hilo conductor - Bobina 9 metros Sparkfun DEV-10867 | BricoGeek.com.” [Online]. Available: <https://tienda.bricogeek.com/lilypad-wearables/747-hilo-conductor-bobina-9-metros.html>. [Accessed: 20-Sep-2019].
- [57] “Arduino UNO R3 Arduino A000066 | BricoGeek.com.” [Online]. Available: <https://tienda.bricogeek.com/arduino/305-arduino-uno.html>. [Accessed: 23-Sep-2019].
- [58] “Diagram Figure 2. Block diagram.”

## Anexo 1: Guía de uso. ¿Cómo funciona?



GUANTE CON SENSORES TEXTILES DE FLEXIÓN PARA EL CONTROL DE MOVIMIENTO DE UNA MANO ROBÓTICA.

## ÍNDICE GUÍA DE USUARIO

1. Introducción
2. Instalación y configuración
3. Funciones básicas
4. Solución de problemas
5. Preguntas frecuentes

## 1. Introducción

El sistema consiste en la utilización de un guante de neopreno para monitorizar el ángulo de movimiento de los dedos de la persona que lo está usando. Los valores son registrados y procesados para enviarlos sobre los servomotores que controlan la actuación de la mano robótica, los cuales replicarán en tiempo real el movimiento que realiza el usuario.

Los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema son los siguientes:

- Guante de control fabricado con 4 sensores textiles de flexión (Índice, Corazón, Anular y Pulgar).
- Microcontrolador *Arduino UNO*.
- Cable *USB Arduino UNO*.
- Ordenador con software *.INO* para poder ejecutar los programas de *Arduino UNO*.
- *PCB shield* fabricada para *Arduino UNO*.
- Mano Robótica con servomotores.
- 2x pilas 9V para alimentar los servomotores.

Por favor, siga las instrucciones de uso detalladas en este documento para el correcto funcionamiento del sistema.

## 2. Instalación y configuración

- En primer lugar, el ordenador debe estar conectado a la corriente AC. De esta manera se evita que pueda quedarse sin batería durante el uso del sistema.
- Posteriormente se debe conectar el ordenador con *Arduino UNO* mediante el cable USB.
- Una vez realizada la conexión, se conecta la shield fabricada sobre los pines superiores de la *PCB de Arduino*.
- Se inicia el programa *.INO* en el ordenador y se localiza el puerto de conexión en el que se ha conectado *Arduino*.
- Sobre ese puerto se carga el programa y se debe esperar hasta que haya finalizado la compilación.
- Se conectan las pilas de 9V sobre los conectores de la *PCB shield*.
- Una vez el programa está cargado sobre el microcontrolador y los motores están alimentados, se procede a colocar el guante en la mano.

Nota: el guante es talla única y debe quedar ajustado en la mano del usuario. Si el guante quedase demasiado grande o pequeño no funcionará de la forma esperada.

- Una vez finalizados cada uno de estos pasos, el sistema está listo para ser utilizado.

### 3. Funciones básicas

Una vez realizado el set-up del sistema, se procede a la calibración de los sensores. Según la morfología de la mano del usuario, los sensores tendrán unos valores iniciales u otros, por lo que es necesario realizar este paso inicial. De esta forma, las funciones básicas se dividen en dos bloques: calibración y movimiento de la mano robótica, los cuales se explican a continuación.

**1. Calibración:** existen dos métodos para realizar esta primera función de uso: calibración manual o calibración almacenada.

- Calibración manual: como su propio nombre indica, esta forma de calibración consiste en realizar una obtención de valores completa. Suele utilizarse cuando es la primera vez que un usuario utiliza el sistema y el proceso se lleva a cabo en el “*monitor serie*” localizado en la parte superior derecha del programa .INO.

El usuario calibrará su mano colocando los dedos del guante en 0, 45, 90, 135 y 180 grados en diferentes pasos, y pulsará respectivamente la tecla 1 + “*enter*”, 2 + “*enter*”, 3 + “*enter*”, 4 + “*enter*” y 5 + “*enter*”, para guardar los valores en ese instante de tiempo. Por ejemplo, en uso normal de la calibración manual, el usuario entrará en el “*monitor serie*” del programa, colocará sus dedos a 0 grados y pulsará 1 + “*enter*”. En ese momento el programa guardará los valores registrados y los mostrará por pantalla además de una breve explicación del siguiente paso que debe hacer el usuario para continuar con la calibración manual. El proceso terminará cuando todos los valores hayan quedado guardados y la calibración esté completa.

- Calibración almacenada: consiste en utilizar los valores guardados en la memoria del sistema obtenidos durante la última calibración manual realizada. Para ello se debe acceder al “*monitor serie*” y pulsar la tecla “*n*” + “*enter*”. De esta forma queda completado el proceso y el sistema está listo para ser utilizado para mover la mano robótica.

Nota: en cualquier momento durante el proceso de calibración o durante el movimiento de la mano robótica se puede acceder al “*monitor serie*” del programa y sobrescribir los valores guardados de calibración pulsando sobre la tecla 1, 2, 3, 4, 5 ó “*n*”.

**2. Movimiento de la mano robótica:** es el funcionamiento principal del sistema. Se deben mover los dedos de la mano portadora del guante para que la mano robótica replique los movimientos realizados.

## Solución de problemas

Durante el uso del sistema se pueden presentar algunos problemas de funcionamiento. En la siguiente tabla se detallan posibles errores y cómo se deben solucionar para el correcto funcionamiento:

<b>Problema</b>	<b>Causa</b>	<b>Posible solución</b>
La mano robótica se mueve de forma imprecisa.	1) La calibración no se ha realizado correctamente.  2) El guante no es de la talla del usuario.	1) Reiniciar el proceso de calibración automática para restablecer valores. 2) Si el guante queda grande, realizar la calibración ajustando el guante con la otra mano. En caso de que el guante quede pequeño, realizar la calibración de forma precisa sin hacer exceso de presión sobre los sensores.
Durante la calibración, sólo se guarda y muestra por pantalla el valor "0" en uno o varios dedos.	No se está realizando la medición del sensor de forma correcta.	1) Comprobar que los cables que conectan los sensores no se han soltado. 2) El sensor puede haberse dañado. En este caso, sustituir por un nuevo sensor.
Muevo un dedo con el guante y no se corresponde con el dedo que se mueve en la mano robótica.	No se han conectado correctamente los cables en los sensores.	Volver a conectar los cables de los sensores en el orden correcto.

#### 4. Preguntas frecuentes

- **¿En qué mano se utiliza el guante?**  
El guante que se ha fabricado es para la mano derecha. Los sensores deben quedar en la parte exterior de los dedos.
  
- **¿Por qué se utilizan pilas de 9V para servomotores?**  
Las pilas están conectadas a un circuito que regula la carga a 5V, por lo que la tensión de entrada de los servomotores es de 5V a 1A.
  
- **¿Puedo utilizar el sistema sin que esté conectado al ordenador?**  
Sí, si ya está cargado el programa en *Arduino* y se ha cargado la calibración, se puede desconectar el cable USB del ordenador y utilizarlo de forma autónoma.
  
- **¿Qué puede pasar si 2 motores han dejado de moverse a la vez?**  
Cada pila ofrece energía a 2 de los motores de la mano robótica, por lo que si 2 motores han dejado de funcionar a la vez el diagnóstico más rápido que podemos hacer es comprobar la carga de las pilas.



## Anexo 2: Programa *Arduino* creado para realizar la curva de calibración de los sensores

```
#define inputPin A0
const int num = 10;
const int numReadings = 10;
int readings[numReadings];
int total = 0;
int index = 0;
int valor = 0;

void setup() {

  Serial.begin (9600);
  for (int thisReading = 0; thisReading < num; thisReading++)
    readings[thisReading] = 0;
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {
    char dato = Serial.read();
    if (dato == '1' ) {
      valor = 0;
      total = 0;
      index = 0;
      for (int numero = 0; numero < 10; numero ++){
        readings[index] = analogRead(inputPin);
        valor= valor + readings[index];
      }
      total = valor / numReadings;
      index = 0;
      Serial.println(total);
    }
  }
}
```



### Anexo 3: Programa *Arduino* del sistema

```
#include <Servo.h>
#include <EEPROM.h>

#define PIN_I A0 // Pines de entrada
analógicos para la lectura del sensor de cada dedo
#define PIN_C A1
#define PIN_A A2
#define PIN_P A3

const int NUM = 10;
const int NUM_READINGS = 10;
const int LENGTH = 5;

struct Finger { // Estructura finger que contiene todas las variables necesarias para 1
dedo

    int pin;
    Servo servo;
    int readings [NUM_READINGS];
    int totals [LENGTH+1];
    int calibrations [LENGTH];
    int eeprom [LENGTH];
    int averages [LENGTH];
    int directions [LENGTH];
    byte values [LENGTH];
};

struct Finger finger_I, finger_C, finger_A, finger_P; // Se crea un struct por cada dedo
que vamos a utilizar

int index;

// Definición de las funciones utilizadas en el programa

void finger_setup (struct Finger * finger , int p, int num_servo, int begin_direction) {
// Funcion para inicializar las variables

    finger->pin = p;
    (finger->servo).attach(num_servo);

    for (int i = 0; i < LENGTH; i++){

        finger->averages[i] = 0;
        finger->calibrations[i] = 0;
        finger->values[i] = 0;
    }
}
```

```

}

for (int i = 0; i < LENGTH+1; i++){

    finger->totals[i] = 0;
}

for (int i = begin_direction; i < begin_direction + LENGTH; i++){

    finger->directions[i] = begin_direction;
}

for (int i = 0; i < NUM; i++){

    finger->readings[i] = 0;
}
}

void save_EEPROM (struct Finger * finger, int dato) { // Función que
guarda en la memoria eeprom el resultado de las lecturas y lo muestra por pantalla.

    finger->eeprom[dato-1] =finger->calibrations[dato-1] /4;
    EEPROM.write(finger->directions[dato-1], finger->eeprom[dato-1]);
    finger->values[dato-1] = EEPROM.read(finger->directions[dato-1]);
    Serial.print(finger->values[dato-1] * 4);
    Serial.print(" ");
}

void calibration (char d) { // Función de
calibración. Resetea las variables y guarda en ellas el nuevo valor leído de calibración.
Llama a la función save_EEPROM y accede a la dirección de memoria para guardar el
valor.
    int dato = String(d).toInt();

    finger_I.calibrations[dato-1] = 0;
    finger_C.calibrations[dato-1] = 0;
    finger_A.calibrations[dato-1] = 0;
    finger_P.calibrations[dato-1] = 0;

    finger_I.totals[dato] = 0;
    finger_C.totals[dato] = 0;
    finger_A.totals[dato] = 0;
    finger_P.totals[dato] = 0;

    index = 0;

    for (int i = 0; i < 10; i ++ ) {

```

```

finger_I.readings[i] = analogRead(finger_I.pin);
finger_I.totals[dato] = finger_I.totals[dato] + finger_I.readings[i];
finger_C.readings[i] = analogRead(finger_C.pin);
finger_C.totals[dato] = finger_C.totals[dato] + finger_C.readings[i];
finger_A.readings[i] = analogRead(finger_A.pin);
finger_A.totals[dato] = finger_A.totals[dato] + finger_A.readings[i];
finger_P.readings[i] = analogRead(finger_P.pin);
finger_P.totals[dato] = finger_P.totals[dato] + finger_P.readings[i];
}

finger_I.calibrations[dato-1] = finger_I.totals[dato] / NUM_READINGS;
finger_C.calibrations[dato-1] = finger_C.totals[dato] / NUM_READINGS;
finger_A.calibrations[dato-1] = finger_A.totals[dato] / NUM_READINGS;
finger_P.calibrations[dato-1] = finger_P.totals[dato] / NUM_READINGS;

save_EEPROM(&finger_I, dato);
save_EEPROM(&finger_C, dato);
save_EEPROM(&finger_A, dato);
save_EEPROM(&finger_P, dato);

Serial.println("coloca los dedos en la siguiente posición y pulsa sobre el botón +
enter  ");
}

void calibration_memory(struct Finger * finger){

for (int i = 0; i < (sizeof(finger->values) / sizeof(finger->values[0])); i++) { // salta
cuando i supera la longitud del array values

finger->values[i] = EEPROM.read(finger->directions[i]);
}

}

void calculate_degrees(struct Finger * finger){

finger->averages[0] = finger->totals[0] / NUM;
finger->averages[1] = map (finger->averages[0], finger->values[0] * 4, finger-
>values[1] * 4, 10, 45);
finger->averages[2] = map (finger->averages[0], finger->values[1] * 4, finger-
>values[2] * 4, 45, 90);
finger->averages[3] = map (finger->averages[0], finger->values[2] * 4, finger-
>values[3] * 4, 90, 135);
finger->averages[4] = map (finger->averages[0], finger->values[3] * 4, finger-
>values[4] * 4, 135, 180);
}

```

```

void update_motor(struct Finger * finger){

    if(finger->averages[1] <= 45){
        (finger->servo).write(finger->averages[1]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS1: ");
        //Serial.println(finger->averages[1]);
    }else if (finger->averages[2] > 45 && finger->averages[2] < 90){
        (finger->servo).write(finger->averages[2]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS2: ");
        //Serial.println(finger->averages[2]);
    }else if (finger->averages[3] >= 90 && finger->averages[3] <= 135){
        (finger->servo).write(finger->averages[3]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS3: ");
        //Serial.println(finger->averages[3]);
    }else if (finger->averages[4] > 135){
        (finger->servo).write(finger->averages[4]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS4: ");
        //Serial.println(finger->averages[4]);
    }
}

void update_motor2(struct Finger * finger){

    if(finger->averages[4] >= 135){
        (finger->servo).write(180-finger->averages[4]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS1: ");
        //Serial.println(finger->averages[1]);
    }else if (finger->averages[3] > 90 && finger->averages[3] < 135){
        (finger->servo).write(180-finger->averages[3]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS2: ");
        //Serial.println(finger->averages[2]);
    }else if (finger->averages[2] >= 45 && finger->averages[2] <= 90){
        (finger->servo).write(180-finger->averages[2]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS3: ");
        //Serial.println(finger->averages[3]);
    }else if (finger->averages[1] <= 45){
        (finger->servo).write(180-finger->averages[1]);
        delay(12);
        //Serial.print(" GRADOS4: ");
        //Serial.println(finger->averages[4]);
    }
}

```

```

}

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  index = 0;

  finger_setup(&finger_I, PIN_I, 12, 1);
  finger_setup(&finger_C, PIN_C, 7, 6);
  finger_setup(&finger_A, PIN_A, 2, 11);
  finger_setup(&finger_P, PIN_P, 8, 16);
}

void loop() {
  if (Serial.available()) {

    char dato = Serial.read();
    index = 0;

    switch (dato) {          //acceso a cada apartado de la calibración
      case '1': calibration(dato); break;
      case '2': calibration(dato); break;
      case '3': calibration(dato); break;
      case '4': calibration(dato); break;
      case '5': calibration(dato); break;
      case 'n':
        calibration_memory(&finger_I);
        calibration_memory(&finger_C);
        calibration_memory(&finger_A);
        calibration_memory(&finger_P);
        break;
      default:
        break;
    }
  }
}

// Proceso de lectura de los sensores de forma multiplexada (10 lecturas)

finger_I.totals[0] = finger_I.totals[0] - finger_I.readings[index];
finger_I.readings[index] = analogRead(finger_I.pin);
finger_I.totals[0] = finger_I.totals[0] + finger_I.readings[index];

finger_C.totals[0] = finger_C.totals[0] - finger_C.readings[index];
finger_C.readings[index] = analogRead(finger_C.pin);
finger_C.totals[0] = finger_C.totals[0] + finger_C.readings[index];

finger_A.totals[0] = finger_A.totals[0] - finger_A.readings[index];

```

```

finger_A.readings[index] = analogRead(finger_A.pin);
finger_A.totals[0] = finger_A.totals[0] + finger_A.readings[index];

finger_P.totals[0] = finger_P.totals[0] - finger_P.readings[index];
finger_P.readings[index] = analogRead(finger_P.pin);
finger_P.totals[0] = finger_P.totals[0] + finger_P.readings[index];
index ++;

if (index >= NUM){
    index = 0;
    calculate_degrees(&finger_I); //Cuando se terminan las lecturas, se mapean los
valores obtenidos transformándolos a ángulos de 10 a 180 grados
    calculate_degrees(&finger_C);
    calculate_degrees(&finger_A);
    calculate_degrees(&finger_P);

    update_motor(&finger_I); //Se envían las señales digitales a los
servomotores para que actualicen su posición. Los dedos índice y pulgar se moverán
de 0 a 180 grados, mientras que los dedos anular y pulgar se moverán a la inversa
debido a la posición física de los motores ( de 170 a 0 grados).
    update_motor(&finger_C);
    update_motor2(&finger_A);
    update_motor2(&finger_P);

    index = 0;

    for (int j = 0; j < NUM; j++){ //reseteo de las variables de lectura
        finger_I.readings[j] = 0;
        finger_C.readings[j] = 0;
        finger_A.readings[j] = 0;
        finger_P.readings[j] = 0;
    }
    finger_I.totals[0]=0;
    finger_C.totals[0]=0;
    finger_A.totals[0] =0;
    finger_P.totals[0]=0;
}
}

```



