



universidad  
de león



# **Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial**

## **GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Trabajo de Fin de Grado

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE UN  
EXOESQUELETO DE LA ARTICULACIÓN DE LA MUÑECA  
LOW COST**

**DEVELOPMENT OF A LOW COST WRIST JOINT  
EXOESKELETON'S PROTOTYPE**

Autor: Jonatan González Miñambres  
Tutor: Francisco Jesús Rodríguez Sedano y Jesús Lozano Arias

**(Septiembre, 2022)**

<b>UNIVERSIDAD DE LEÓN</b> <b>Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial</b>  <b>GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA</b> <b>Trabajo de Fin de Grado</b>	
<b>ALUMNO:</b> Jonatan González Miñambres	
<b>TUTOR:</b> Francisco Jesús Rodríguez Sedano y Jesús Lozano Arias	
<b>TÍTULO:</b> Desarrollo de un prototipo de un exoesqueleto de la articulación de la muñeca low cost	
<b>TITLE:</b> Development of a low cost wrist joint exoskeleton's prototype	
<b>CONVOCATORIA:</b> Septiembre, 2022	
<b>RESUMEN:</b> <p>En este Trabajo Fin de Grado se desarrolla un diseño teórico y una posterior construcción de un prototipo de un exoesqueleto para la articulación de la muñeca low cost. La principal función de este exoesqueleto con dos grados de libertad es que sea capaz de realizar los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la muñeca a partir de reconocer la intencionalidad de movimiento del portador. Para desarrollar este sistema se ha realizado un estudio, de posibles sensores que tengan la capacidad de adquirir esta información. Se han utilizado finalmente cuatro sensores de fuerza resistivos FSR. Se ha realizado un análisis de la señal obtenida por cada sensor y posteriormente se ha creado un algoritmo para su procesamiento.</p>	
<b>ABSTRACT:</b> Within this end of degree project, a theoretical design and a subsequent construction of a low cost wrist joint`s exoskeleton is developed. The main function of this exoskeleton with two degrees of freedom is that is able to perform movements of flexion, extension, abduction and adduction of the wrist by recognizing the holder`s movement. To develope this system, a study about the possible sensors with the capacity of collecting information was carried out. At last, four force resistive sensors FSR were used. An analysis of the signal collected by each sensor was carried out and later on analgorithm for its processing was created. To do it, a platform called Arduino was used	
<b>Palabras clave:</b> exoesqueleto, muñeca, sensor, low cost, arduino.	
<b>Firma del alumno:</b>	<b>VºBº Tutor/es:</b>

# Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se desarrolla un diseño teórico y una posterior construcción de un prototipo de un exoesqueleto para la articulación de la muñeca low cost. Para ello se ha llevado a cabo una breve investigación de los estudios y desarrollos de exoesqueletos, y de la fisiología de la muñeca para poder realizar un diseño conceptual del prototipo a desarrollar.

La principal función de este exoesqueleto con dos grados de libertad es que sea capaz de realizar los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la muñeca a partir de reconocer la intencionalidad de movimiento del portador. El exoesqueleto tiene que ser accesible a cualquier persona, por ello se ha de buscar una solución que permita su construcción a un precio asequible y emplear tecnologías de fácil acceso como software y hardware libre y la impresión 3D.

Para desarrollar este sistema se ha realizado un estudio, de posibles sensores que tengan la capacidad de adquirir esta información. La técnica utilizada para el desarrollo ha sido la de ensayo-error, comprobando así la respuesta de diferentes tipos de sensores. Se han utilizado finalmente cuatro sensores de fuerza resistivos FSR debido a que ofrecen una respuesta válida a los diferentes movimientos, tienen un bajo precio, peso y tamaño.

A partir de los sensores elegidos, se ha realizado un análisis de la señal obtenida por cada sensor y posteriormente se ha creado un algoritmo para su procesamiento. Para ello se ha utilizado la plataforma Arduino por ser una plataforma de código abierto que se basa en hardware y software libre y a un precio económico.

Finalmente se ha obtenido un presupuesto de 213,4 € para el diseño del exoesqueleto capaz de levantar una carga de 1 kg y se ha realizado la construcción de el mismo prototipo con menos prestaciones a partir de componentes que ya se tenían disponibles con un coste de 143,2€. El prototipo cumple su objetivo principal, realizar los 4 tipos de movimientos de la muñeca reconociendo la intención de su portador.

# Abstract

Within this end of degree project, a theoretical design and a subsequent construction of a low cost wrist joint's exoskeleton is developed. In order to make it, a brief investigation of the exoskeleton's studies and developments, as well as the wrist's physiology was carried out to be able to create a conceptual design of the prototype to be developed.

The main function of this exoskeleton with two degrees of freedom is that is able to perform movements of flexion, extension, abduction and adduction of the wrist by recognizing the holder's movement.

The exoskeleton must be affordable for everyone so a solution must be found to allow its construction at affordable prices and also uses accessible technologies like free software and hardware and 3D printing.

To develop this system, a study about the possible sensors with the capacity of collecting information was carried out. The technique used for its development was trial-error, checking this way the response of multiple types of sensors. At last, four force resistive sensors FSR were used as they provide a valid response to multiple movements, are affordable, and got a small size and weight.

An analysis of the signal collected by each sensor was carried out and later on an algorithm for its processing was created. To do it, a platform called Arduino was used due to it is an open source platform based on free hardware and software and has an affordable price.

Finally a €213,4 budgeted was obtained for the design of the exoskeleton, which is capable of lifting a 1kg load. By using own available components, the construction of the exoskeleton took place with fewer features and with a €143,2 cost. The prototype meets its main goal, to perform the four types of wrist movements by recognizing the intention of its carrier.

# Indices de Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>4</b>
<b>Indices de Contenido.....</b>	<b>5</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>9</b>
<b>Índice de cuadros y tablas.....</b>	<b>13</b>
<b>Memoria .....</b>	<b>14</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>16</b>
<b>3. Estado del arte .....</b>	<b>17</b>
3.1.    Introducción Exoesqueletos.....	17
3.2.    Exoesqueletos para fuerza y habilidad .....	17
3.3.    Exoesqueletos Muñeca .....	25
3.3.1.    Productos comerciales para la rehabilitación de la muñeca .....	25
3.3.2.    Patentes de dispositivos de rehabilitación de muñeca .....	26
3.3.3.    Articulos de dispositivos de rehabilitación de la muñeca.....	28
3.3.4.    Dispositivos hápticos paa el movimiento de la muñeca .....	30
<b>4. Fisiología de la muñeca .....</b>	<b>32</b>
4.1.    Movimientos de la muñeca .....	32
<b>5. Diseño conceptual .....</b>	<b>34</b>
5.1.    Función principal.....	34
5.2.    Cinemática .....	34
5.3.    Geometría .....	34
5.4.    Torque.....	35
5.5.    Sistema mecánico .....	35
5.6.    Sistema electrónico.....	35
5.7.    Materiales .....	35
<b>6. Diseño.....</b>	<b>36</b>
6.1.    Geometría .....	36
6.1.1.    Distancia del eje rotación a la correa de sujeción .....	37

6.1.2.	Distancia largo del dorso de la mano .....	38
6.1.3.	Distancia largo de los dedos.....	38
6.1.4.	Distancia ancho de la mano .....	39
6.1.5.	Distancia ancho de la muñeca .....	40
6.1.6.	Distancia grosor de la muñeca.....	40
6.2.	Torque.....	41
6.2.1.	Movimientos flexión y extensión .....	42
6.2.2.	Movimientos aducción y abducción .....	45
6.2.3.	Resultados.....	46
6.3.	Sistema electrónico.....	47
6.3.1.	Entradas .....	47
6.3.1.1	Sensores EMG.....	47
6.3.1.2	Potenciómetros .....	48
6.3.1.3	Galgas extensiométricas.....	49
6.3.1.4	Sensores resistivos de fuerza o FSr .....	50
6.3.2.	Salidas.....	51
6.3.2.1	Fundamentos de los Servomotores.....	51
6.3.2.2	selección de servomotores.....	54
6.3.3.	Control.....	55
6.3.4.	Alimentación .....	57
6.4.	Diseño Mecánico.....	58
6.4.1.	Soporte antebrazo.....	58
6.4.2.	Soporte Mano .....	59
6.4.3.	Soporte Servomotores .....	60
6.4.4.	Codo unión servomotores.....	61
6.5.	Materiales .....	62
6.5.1.	Impresión por adición .....	62
6.5.2.	Ventajas de la impresión 3D .....	63
<b>7.</b>	<b>Prototipos .....</b>	<b>64</b>
7.1.	Prototipo 1 .....	64
7.1.1.	Funcionamiento .....	64
7.1.2.	Problemas y errores .....	64
7.2.	Prototipo 2 .....	65
7.2.1.	Funcionamiento .....	65
7.2.2.	Problemas y errores .....	66
7.3.	Prototipo 3 .....	66
7.3.1.	Funcionamiento .....	67

7.3.2.	Problemas y errores .....	70
7.4.	Prototipo 4 .....	70
7.4.1.	Funcionamiento .....	71
7.4.2.	Problemas y errores .....	71
<b>8.</b>	<b>Prototipo Final.....</b>	<b>72</b>
8.1.	Componentes utilizados .....	74
8.1.1.	Sensor resistivo de fuerza FSR .....	74
8.1.2.	Servomotor .....	74
8.2.	Diseño mecánico.....	75
8.2.1.	Pieza 1, Soporte AnteBrazo.....	77
8.2.2.	Pieza 2 unión soporte-servo antebrazo .....	78
8.2.3.	Unión Mano-Exoesqueleto .....	79
8.2.4.	Carcasa Servomotores .....	79
8.2.5.	Soporte Sensores .....	81
8.2.6.	Codo unión Servomotores .....	82
8.3.	Montaje electrónico.....	84
8.4.	Programación.....	86
8.4.1.	Análisis de la respuesta de los sensores y selección de ángulos de los servomotores .....	86
8.4.1.1	Ángulo 90º - grados 90º .....	89
8.4.1.2	ángulo 90º - grados 20º.....	89
8.4.1.3	Ángulo 90º - Grados 160ª.....	90
8.4.1.4	Ángulo 30º - Grados 90ª.....	91
8.4.1.5	Ángulo 140º - Grados 90ª.....	91
8.4.1.6	Ángulo 30º - Grados 20ª.....	92
8.4.1.7	Ángulo 30º - Grados 140ª.....	93
8.4.1.8	Ángulo 140º - Grados 30ª.....	93
8.4.1.9	Ángulo 140º - Grados 140ª.....	94
8.4.2.	Programa procesamiento señales.....	95
8.4.2.1	Función mover.....	95
8.4.2.2	Programa establecer rangos.....	96
8.4.2.3	Programa final .....	98
<b>9.</b>	<b>Presupuestos.....</b>	<b>100</b>
<b>10.</b>	<b>Cronograma .....</b>	<b>101</b>
<b>11.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>102</b>
<b>12.</b>	<b>Conclusiones y mejoras.....</b>	<b>106</b>

12.1.	Conclusiones .....	106
12.2.	Mejoras .....	109
	<b><i>Bibliografía .....</i></b>	<b>111</b>
	<b><i>Anexo A Documentación Arduino Nano.....</i></b>	<b>115</b>
	<b><i>Anexo B Códigos programación .....</i></b>	<b>129</b>
	Programa Ver gráficas.....	129
	Programa Buscar rangos .....	132
	Programa final.....	139
	<b><i>Anexo C Documentación servo FT5335M.....</i></b>	<b>144</b>
	<b><i>Anexo C Documentación .....</i></b>	<b>145</b>
	<b><i>Anexo D Documentación servo MG995.....</i></b>	<b>148</b>
	<b><i>Anexo E Documentación sensor FSR .....</i></b>	<b>152</b>

# Índice de figuras

Figura 1 Proyecto Hardiman (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019)) .....	18
Figura 2 Traje Robótico LiiFesuit (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019)) .....	19
Figura 3 Traje de apoyo asistido (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019)) .....	20
Figura 4 Exoesqueleto BLEEX (Fuente: (Zoss, et al., 2005)).....	21
Figura 5 Esquema BLEEX (Fuente: (Zoss, et al., 2005)).....	21
Figura 6 Esquema exoesqueleto Tesis Walsh (Fuente: (Walsh, 2006)) .....	22
Figura 7 Traje robótico Hal completo (Fuente: ( <a href="https://tendencias2009.wordpress.com">https://tendencias2009.wordpress.com</a> , s.f.)) .....	23
Figura 8 Traje robótico HAL extremidades inferiores (Fuente: ( <a href="https://www.xataka.com">https://www.xataka.com</a> , s.f.)).....	23
Figura 9 Exoesqueleto Rewalk (Fuente: ( <a href="https://rewalk.com/">https://rewalk.com/</a> , s.f.)).....	24
Figura 10 Exoesqueleto Rex (Fuente: ( <a href="https://www.neoteo.com">https://www.neoteo.com</a> , s.f.)) .....	24
Figura 11 Kinetec Maestra (Fuente: (PRIM Physio, s.f.)).....	25
Figura 12 Dispositivo PICTOR (Fuente: (MEDEN-INMEN, s.f.)) .....	26
Figura 13 Ortesis para rehabilitación de mano y muñeca (Fuente: (Moreno Arango, 2018)) .....	27
Figura 14 Dispositivo rehabilitación muñeca 6 grados de libertad (Fuente: (Li Jianfeng, 2016)).....	27
Figura 15 Dispositivo portátil de rehabilitación de mano y muñeca (Fuente: (Carlson, 2000)) .....	28
Figura 16 Prototipo rehabilitación mano y muñeca (Fuente; (Pezent, et al., 2017)).....	29
Figura 17 Dispositivo háptico para rehabilitación de brazo y muñeca (Fuente (Oblak, et al., 2010)).....	29
Figura 18 Exoesqueleto EXOS Wrist DK2 (Fuente: (Exiii inc., s.f.)) .....	31
Figura 19 Músculos antebrazo (Fuente: ( <a href="https://www.lifeder.com">https://www.lifeder.com</a> , s.f.)) .....	33
Figura 20 Movimientos de la articulación de la muñeca (Fuente:( (Kapadnji, 2006)).....	33
Figura 21 Puntos de referencia de la mano para realizar mediciones (Fuente: elaboración propia).....	36
Figura 22 Distancia eje de rotación a la sujeción de la correa (Fuente: elaboración propia) .....	37

Figura 23 Distancia largo de la mano (Fuente: elaboración propia) .....	38
Figura 24 Distancia largo de los dedos (Fuente: elaboración propia) .....	39
Figura 25 Distancia ancho de la mano (Fuente: elaboración propia) .....	39
Figura 26 Distancia ancho de la muñeca (Fuente: elaboración propia) .....	40
Figura 27 Distancia grosor de la muñeca (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 28 Diagrama del cuerpo libre del prototipo (Fuente: elaboración propia).....	41
Figura 29 Sensor muscular EMG MyoWare (Fuente: (naylampmechatronics, s.f.)).....	47
Figura 30 Circuito equivalente potenciómetro (Fuente: elaboración propia).....	48
Figura 31 Sensor FSR (Fuente: (Amazon, s.f.)) .....	50
Figura 32 Estructura sensor FSR (Fuente: (Corona Ramírez, et al., 2014)).....	51
Figura 33 Componentes de un servomotor (Fuente: (Corona Ramírez, et al., 2014)) .....	52
Figura 34 Tren de pulsos para el control de un servomotor (Fuente: (zonamaker, s.f.)) ....	53
Figura 35 Servomotor FEETECH 40kg FT5335M-FB con feedback (Fuente: (Brico geek, s.f.)).....	54
Figura 36 Servomotor FEETECH 20kg FT5323M (Fuente: (Brico geek, s.f.)) .....	55
Figura 37 Placa de desarrollo Arduino Nano (Fuente: (Arduino, s.f.)).....	56
Figura 38 Asociación baterías en serie (Fuente: (aulafacil, s.f.)) .....	57
Figura 39 ZNTER-batería recargable de 1,5 V y 6000mAh (Fuente: (Aliexpress, s.f.)) ....	57
Figura 40 Boceto diseño soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia) .....	59
Figura 41 Boceto diseño soporte mano (Fuente: elaboración propia).....	60
Figura 42 Ejes para el dimensionado de la pieza codo de unión de los servomotores (Fuente: elaboración propia).....	61
Figura 43 Agarre mano con potenciómetro (Fuente: elaboración propia) .....	65
Figura 44 Potenciómetro encima del servomotor (Fuente: elaboración propia) .....	66
Figura 45 Colocación sensores para movimientos de flexión y extensión (Fuente: elaboración propia).....	67
Figura 46 Pruebas colocación de sensores en el soporte de la mano (Fuente: elaboración propia).....	68
Figura 47 Prueba 3 de soporte de mano (Fuente: elaboración propia) .....	69
Figura 48 Prueba soporte de mano con disminución de carga (Fuente: elaboración propia) .....	69
Figura 49 Colocación de sensores en el soporte del brazo (Fuente: elaboración propia) ...	70
Figura 50 Prototipo final construido (Fuente: elaboración propia) .....	72

Figura 51 Ubicación inicial de los sensores en el prototipo final (Fuente: elaboración propia)	73
Figura 52 Ubicación de los sensores en el prototipo final (Fuente: elaboración propia) ....	73
Figura 53 Servomotor MG995 10kgf.cm (Fuente: (Amazon, s.f.)) .....	74
Figura 54 Diseño conjunto del prototipo. (Fuente: elaboración propia) .....	75
Figura 55 Imagen prototipo final construido (Fuente: elaboración propia) .....	76
Figura 56 Vista 1, Diseño y partes de la pieza 1, soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia).....	77
Figura 57 Vista 2 Diseño y partes de la pieza 1, soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia).....	78
Figura 58 Diseño pieza 2, unión soporte-servo antebrazo (Fuente: elaboración propia) ....	78
Figura 59 Diseño pieza que une la mano con el exoesqueleto (Fuente: elaboración propia)	79
Figura 60 Diseño completo pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia) ..	80
Figura 61 Parte 1 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia) .....	80
Figura 62 Vista superior de la parte 2 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia) .....	81
Figura 63 Vista inferior de la parte 2 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia).....	81
Figura 64 Diseño pieza 5, soporte de sensor mano (Fuente: elaboración propia).....	82
Figura 65 Diseño pieza 5, soporte de sensor antebrazo (Fuente: elaboración propia) .....	82
Figura 66 Diseño pieza 6, codo unión servomotores (Fuente: elaboración propia) .....	83
Figura 67 Diseño pieza 6, codo unión servomotores indicando tornillo de ajuste (Fuente: elaboración propia).....	83
Figura 68 Montaje electrónico diseño final (Fuente: elaboración propia) .....	84
Figura 69 Esquema eléctrico del montaje electrónico del prototipo (Fuente: elaboración propia).....	86
Figura 70 Algoritmo para el análisis de las señales en las distintas posiciones (Fuente: elaboración propia).....	88
Figura 71 Gráfica respuesta sensores posición Ángulo 90° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia).....	89
Figura 72 Gráfica respuesta sensores Ángulo 90° - Grados 20° (Fuente: elaboración propia)	89

Figura 73 Gráfica respuesta sensores Ángulo 90° - Grados 160° (Fuente: elaboración propia)	90
Figura 74 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia)	91
Figura 75 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia)	92
Figura 76 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 20° (Fuente: elaboración propia)	92
Figura 77 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 140° (Fuente: elaboración propia)	93
Figura 78 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 30° (Fuente: elaboración propia)	94
Figura 79 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 140° (Fuente: elaboración propia)	94
Figura 80 Diagrama de flujo algoritmo función mover (Fuente: elaboración propia)	96
Figura 81 Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para la detección de intencionalidad (Fuente: elaboración propia)	97
Figura 82 Datos obtenidos mediante comunicación serial programa "BuscarRangos" (Fuente: elaboración propia)	98
Figura 83 Diagrama de flujo del funcionamiento del programa final (Fuente: elaboración propia)	99
Figura 84 Cronograma inicial (Fuente: elaboración propia)	101
Figura 85 Cronograma final (Fuente: elaboración propia)	101
Figura 86 Resultado construcción prototipo (Fuente: elaboración propia)	102

# Índice de cuadros y tablas

Tabla 1 Rangos de movimiento de Kinetec Maestra (Fuente: (Tribeño Alata, 2021)) .....	25
Tabla 2 Rangos de movimiento dispositivo Pictor (Fuente: elaboración propia) .....	26
Tabla 3Rango de movimientos de la muñeca (Fuente: elaboración propia) .....	34
Tabla 4 Medidas mano y antebrazo (Fuente: elaboración propia) .....	37
Tabla 5 Resultados de los cálculos realizados para el dimensionamiento de los servomotores (Fuente: elaboración propia).....	46
Tabla 6 Medidas empleadas en el diseño del soporte del antebrazo (Fuente: elaboración propia).....	58
Tabla 7 Dimensiones de los servomotores del prototipo (Fuente: elaboración propia) .....	60
Tabla 8 Piezas prototipo y uniones (Fuente: elaboración propia) .....	76
Tabla 9 Presupuesto del prototipo diseñado y del prototipo construido (Fuente: elaboración propia).....	100
Tabla 10 Resultados de la respuesta de los sensores resistivos de fuerza ante la intención de movimiento (Fuente: elaboración propia) .....	103
Tabla 11 Resultados y datos necesarios para la programación (Fuente: elaboración propia) .....	105

# Memoria

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los grandes avances en la tecnología están permitiendo un gran progreso en el desarrollo de los exoesqueletos. Un exoesqueleto es un robot que se adapta al cuerpo humano para ayudar a las articulaciones a realizar sus respectivos movimientos, lo que permite aumentar las capacidades físicas del ser humano, son una herramienta beneficiosa para mejorar la calidad de vida de personas que sufren limitaciones producidas por lesiones o enfermedades.

Las investigaciones más desarrolladas se enfocan en las extremidades inferiores, debido a su importancia para la movilidad de las personas. En las extremidades superiores, necesarias para interactuar con el entorno, también existen numerosos estudios y desarrollos de exoesqueletos que ayuden al movimiento, pero estos se enfocan en los brazos y las manos, dejando de lado su unión, la articulación de la muñeca, en la que los dispositivos más desarrollados son fijos y para rehabilitación.

La mano es una herramienta imprescindible para las funciones que se realizan en la vida cotidiana. Su gran adaptabilidad la produce la muñeca, por tanto, su limitación afecta de una manera considerable en el día a día. Es una articulación débil por lo que son muy frecuentes las lesiones por traumatismos o movimientos repetitivos debido a su continuo uso.

El principal objetivo de este trabajo es diseñar y construir un exoesqueleto para la articulación de la muñeca con dos grados de libertad, se buscará que permita la interacción del portador en su vida cotidiana y sea accesible a cualquier persona, por ello debe de ser ergonómico, portátil, capaz de reconocer la intencionalidad del portador y tener un precio económico. Otro objetivo es tener la posibilidad de una futura ampliación o combinación con otros exoesqueletos de mano y brazo.

Para ello se ha de llevar a cabo una breve investigación de los estudios y desarrollos de exoesqueletos, realizar un diseño del prototipo y su posterior construcción. Con el fin de crear un sistema capaz de reconocer la intención de movimiento se ha de realizar una búsqueda de sensores que sean capaces de ello, analizar sus respuestas y crear un algoritmo para su posterior procesado.

## 2. OBJETIVOS

- El principal objetivo de este proyecto es diseñar un exoesqueleto para la articulación de la muñeca, con dos grados de libertad, capaz de reconocer la intencionalidad de movimiento del portador. Los movimientos que debe realizar son flexión, extensión, abducción y aducción.
- Llevar a cabo una breve investigación de los estudios y desarrollos de exoesqueletos que ayuden a realizar el diseño.
- El exoesqueleto debe aspirar a poder permitir la interacción del portador en su vida cotidiana y se pueda desarrollar posteriormente para incluir más articulaciones. Por ello, se busca diseñar un prototipo que sea ergonómico, portátil y funcional.
- El prototipo debe ser capaz de reconocer la intencionalidad del movimiento que desee realizar el usuario portador. De manera que otro objetivo es comparar diferentes tipos de sensores, analizar las señales adquiridas que puedan proporcionar una información útil y diseñar un algoritmo para procesar las señales y ejecutar los movimientos.
- El exoesqueleto tiene que ser accesible a cualquier persona, por ello se ha de buscar una solución que permita su construcción a un precio asequible y emplear tecnologías de fácil acceso como software y hardware libre y la impresión 3D.
- Y por último construir el exoesqueleto.

### **3. ESTADO DEL ARTE**

#### **3.1. INTRODUCCIÓN EXOESQUELETOS**

A día de hoy encontramos la tecnología en prácticamente todos los campos de trabajo, como, por ejemplo, el militar, el ocio y la salud, siendo este último uno de los más favorecidos. Estos estudios se centran en el desarrollo de herramientas especializadas que facilitan el trabajo del personal sanitario y la recuperación de los pacientes. Los exoesqueletos, por lo tanto, son una de estas tecnologías que ayudan a mejorar la calidad de vida de las personas. Un exoesqueleto se adapta al cuerpo humano, su término en inglés “wearable robots” describe su semejanza a una prenda de vestir, y es una estructura que ayuda a asistir los movimientos del cuerpo humano, es decir, incrementan la funcionalidad de las extremidades, e incluso llegan a aumentar sus capacidades (Chávez Cardona, et al., 2010).

Los exoesqueletos pueden ser activos o pasivos, esto depende de si utilizan actuadores para el movimiento, y por ello, puede ser necesario un sistema de control para dichos actuadores (Chávez Cardona, et al., 2010).

A partir de la obtención y procesamiento de señales, el exoesqueleto realiza una toma de decisiones para ejecutar las funciones de movimiento a través de los actuadores.

En el desarrollo de esta tecnología se combinan distintas ciencias como la física, la medicina, la mecánica y la electrónica. En la electrónica un papel esencial en el desarrollo de estas tecnologías son la instrumentación electrónica, que recoge la información necesaria y la envía a un procesador, y el control que realiza el procesador codificando la información obtenida para desarrollar la acción a realizar (Chávez Cardona, et al., 2010).

Existen muchos tipos de exoesqueletos, a continuación, vamos a ver los más representativos y algunos ejemplos de cada tipo.

#### **3.2. EXOESQUELETOS PARA FUERZA Y HABILIDAD**

La función de estos exoesqueletos es encontrar el aumento de las capacidades y habilidades físicas del cuerpo humano. Su diseño y construcción son muy complejos y han ayudado mucho en el desarrollo de tecnologías aplicables a otro tipo de exoesqueletos.

- **Proyecto Hardiman**

Fue desarrollado por el ingeniero Ralph Mosher de “*General Electric*” en la década de los 60. El proyecto consistía en el diseño de un traje robótico capaz de potenciar la fuerza humana, dándole al portador la capacidad de cargar hasta 1500 kilogramos sin mayor dificultad, fue digno de admiración para la época que fue creado (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019).

Había grandes expectativas para este proyecto ya que se pensaba en aplicaciones relacionadas con la construcción submarina, cargado de bombas en portaaviones, centrales nucleares, y en el espacio exterior. Al final el proyecto fracaso por la incontrolable violencia de sus movimientos y la ineficiencia de sus piernas (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019). Para aprovechar lo desarrollado, se intentó reducir medidas y se creó un brazo robótico que era capaz de levantar hasta 340 kilogramos de peso. Pero finalmente el estudio se canceló debido a que el peso del brazo era el doble de lo que podía levantar, siendo bastante absurdo y nada útil (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019).

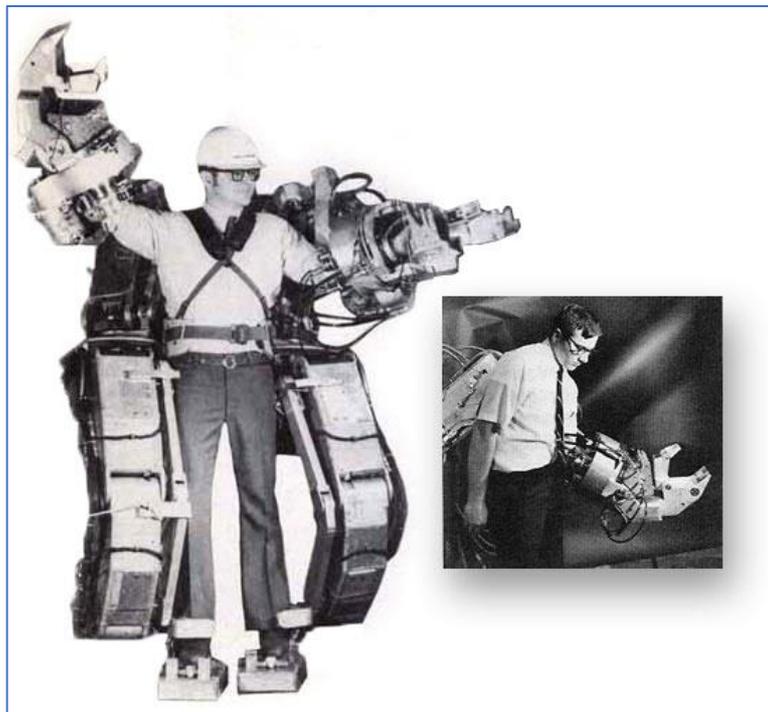


Figura 1 Proyecto Hardiman (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019))

- **Lifesuit**

En 1986 Monty Reed, comenzó a desarrollar un traje robótico utilizado como un medio de rehabilitación. Su función era devolver la habilidad de caminar a personas incluso con cuadriplejía. Una de las últimas versiones es le *Lifesuit 14*, que tiene la capacidad de caminar 1,5 kilómetros llevando un peso de 92 kilogramos (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019).



Figura 2 Traje Robótico LiiFesuit (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019))

- **Traje de apoyo asistido**

Los científicos del instituto de tecnología de Kanagawa de Japón, en 1990 diseñaron un traje robótico de asistencia destinado a simplificar la labor de las enfermeras. Su función era minimizar el esfuerzo de las enfermeras en el tronco, hombros y cintura mientras trasladaban enfermos. Mediante unos sensores de esfuerzo un ordenador controlaba unos tensores de aire comprimido que se encontraban en las extremidades. Con esta tecnología una enfermera de aproximadamente 70 kilogramos era capaz de levantar a un paciente de su mismo peso sin ningún esfuerzo, así se evitaban las lesiones de espalda que sufre el personal médico al tratar pacientes con movilidad limitada (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019).



Figura 3 Traje de apoyo asistido (Fuente: (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019))

- **BLEEX**

El exoesqueleto “Berkeley Lower Extremity Exoskeleton” (*BLEEX*) es uno de los más desarrollados en la actualidad (Chu, et al., 2005) proponen un exoesqueleto formado por dos piernas motorizadas, una unidad de potencia y una mochila para portar cargas pesadas. Debido a los problemas de transportar material en terrenos irregulares y la dificultad de sincronización de sistemas tan complejos, buscan que a través de la mejora de las capacidades físicas del cuerpo humano sea capaz de llevar estas cargas durante un largo periodo de tiempo con un mínimo esfuerzo. En este artículo se realiza un análisis de marcha para cada articulación determinando los ángulos, torques y potencia necesaria. El *BLEEX* permite a soldados, trabajadores de rescates, bomberos y personal de emergencia cargar con 74 kilogramos de peso (Zoss, et al., 2005), en este último artículo se encuentra el diseño de cada articulación.



Figura 4 Exoesqueleto BLEEX (Fuente: (Zoss, et al., 2005))

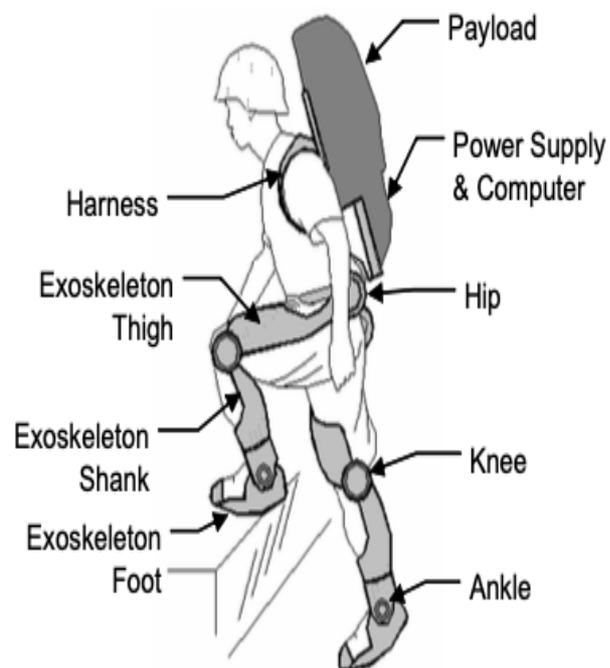


Figura 5 Esquema BLEEX (Fuente: (Zoss, et al., 2005))

- **Exoesqueleto tesis Conor James Walsh**

Otro tipo de exoesqueleto para aumentar las capacidades físicas del cuerpo humano es el desarrollado por Conor James Walsh en su tesis (Walsh, 2006) y en el artículo (Walsh, et al., 2006).

Para reducir peso y eficiencia energética diseña un exoesqueleto ligero y subactuado que trabaja en paralelo con los movimientos del portador para soportar una carga útil. Está formado por un actuador regulable en la cadera, un sistema de amortiguamiento regulable en la rodilla y muelles en el tobillo, transmitiendo de forma efectiva fuerzas de carga útil al suelo durante la marcha.

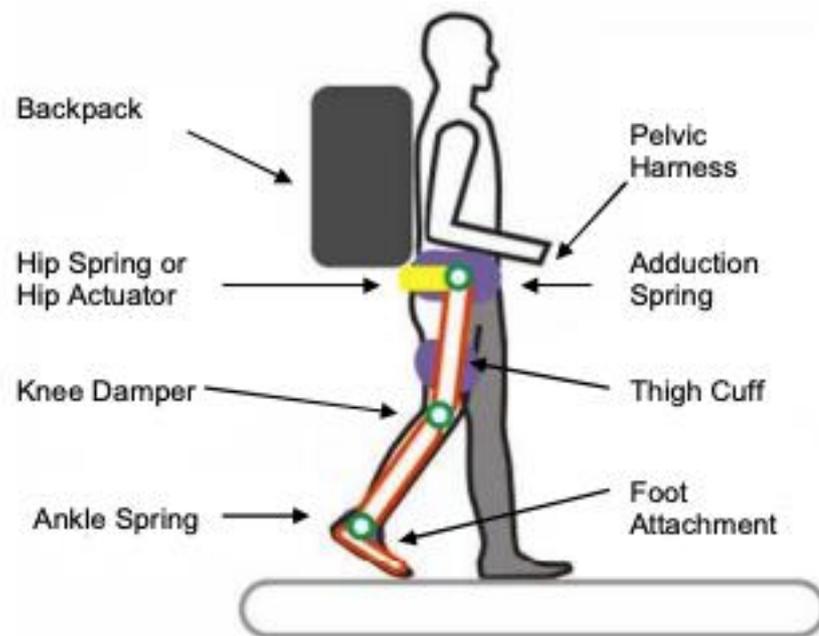


Figura 6 Esquema exoesqueleto Tesis Walsh (Fuente: (Walsh, 2006))

- **HAL**

Yoshiyuki Sankai, investigador de robótica de la Universidad de Tsukuba en Japón y fundador de la empresa Cyberdyne, desde el año 2002 ha trabajado en un traje robótico diseñado para ayudar a ancianos y a personas con discapacidades motoras, conocido como el traje HAL (Hybrid Assiting Limb). Actualmente es un traje de solo 25 kilogramos y es capaz de multiplicar la fuerza del usuario de dos a diez veces. Se trata de un exoesqueleto motorizado capaz de detectar las señales nerviosas que envía el cerebro a los músculos y así realiza el movimiento que la persona desea efectuar. En el año 2009 se anunció la fabricación en masa del HAL para ser comercializado, ofreciendo la opción de traje completo y otra solo para miembros inferiores. En un inicio se pensó para ayudar en labores donde la fuerza es un requisito prioritario, pero con el paso del tiempo el enfoque se cambió al ver que podría

resultar bastante útil en pacientes con lesiones de medula espinal. Existen dos versiones una para las extremidades inferiores y otra para todo el cuerpo (Cheng-Barrantes & Rojas Vega, 2019).



Figura 7 Traje robótico Hal completo (Fuente: (<https://tendencias2009.wordpress.com>, s.f.))



Figura 8 Traje robótico HAL extremidades inferiores (Fuente: (<https://www.xataka.com>, s.f.))

- **Rewalk**

Este exoesqueleto está desarrollado por la empresa ARGO Medical Technologies para permitir andar a personas con parálisis en las extremidades inferiores. Utiliza una tecnología similar a la de HAL y también está comercializado (Espejo Quezada, s.f.).



Figura 9 Exoesqueleto Rewalk (Fuente: (<https://rewalk.com/>, s.f.))

- **Rex**

Este exoesqueleto fue desarrollado en Nueva Zelanda por la empresa creada por los ingenieros Richard Little y Robert Irving de Rex Bionics. Se trata de unas piernas mecánicas controladas por un joystick que permite caminar a personas con parálisis en el tren inferior. Incluso puede subir y bajar escaleras, pero no puede caminar sobre suelos irregulares o resbaladizos. Tiene una autonomía de uso ininterrumpido de dos horas (Espejo Quezada, s.f.).



Figura 10 Exoesqueleto Rex (Fuente: (<https://www.neoteo.com/>, s.f.))

### 3.3. EXOESQUELETOS MUÑECA

#### 3.3.1. PRODUCTOS COMERCIALES PARA LA REHABILITACIÓN DE LA MUÑECA

- **Kinetec Maestra**

Es un dispositivo CPM, movimiento pasivo continuo, creado por la empresa PRIM Fhysio que trabaja para patologías de la mano y de la muñeca. Es capaz de realizar hasta 9 movimientos anatómicos que movilizan 14 articulaciones. En la “Tabla 1” podemos ver los movimientos que puede realizar en la articulación de la muñeca.



Figura 11 Kinetec Maestra (Fuente: (PRIM Physio, s.f.))

Tabla 1 Rangos de movimiento de Kinetec Maestra (Fuente: (Tribeño Alata, 2021))

Tipo de movimiento	Rango de Movimientos
Extensión/Flexión de la muñeca	-30° - 60°
Extensión/Flexión de la muñeca	-50° - 140°
Pronación/Supinación	-90° - 90°

- **Pictor**

En la “Figura 13” se presenta Pictor, un dispositivo únicamente mecánico, que permite al paciente realizar una rehabilitación de la articulación de la muñeca mediante ejercicios

activos, autoasistidos y de resistencia, en los que el paciente configura el dispositivo en consecuencia del umbral de dolor para garantizar la seguridad y comodidad. Sirve para rehabilitar varios tipos de lesiones de la muñeca, trastornos neurológicos o distrofia muscular (MEDEN-INMEN, s.f.). En la “Tabla 2” podemos ver los rangos de movimientos del dispositivo.



Figura 12 Dispositivo PICTOR (Fuente: (MEDEN-INMEN, s.f.))

Tabla 2 Rangos de movimiento dispositivo Pictor (Fuente: elaboración propia)

Tipo de movimiento	Rango de movimiento
Flexión/Extensión	0°-90°
Aducción en el plano sagital	0°-72°
Abducción en el plano sagital	0°-90°
Supinación/Pronación	0°-90°

### 3.3.2. PATENTES DE DISPOSITIVOS DE REHABILITACIÓN DE MUÑECA

- **Órtesis robótica para la rehabilitación de mano y muñeca**

Es un dispositivo para complementar la terapia física convencional en pacientes con discapacidad motriz de mano y muñeca, facilitando la movilización pasiva temprana en caso de lesiones traumáticas y ayudando a la movilidad activa en caso de enfermedades crónicas.

Se trata de una órtesis con 7 grados de libertad al movimiento de la mano y la muñeca “Figura 13”. Este movimiento se reproduce mediante servomotores. Se diferencia de los exoesqueletos de mano y muñeca existentes en la interface órtesis-piel, interface órtesis pasiva, interface órtesis activa y el módulo de control electrónico (Moreno Arango, 2018).

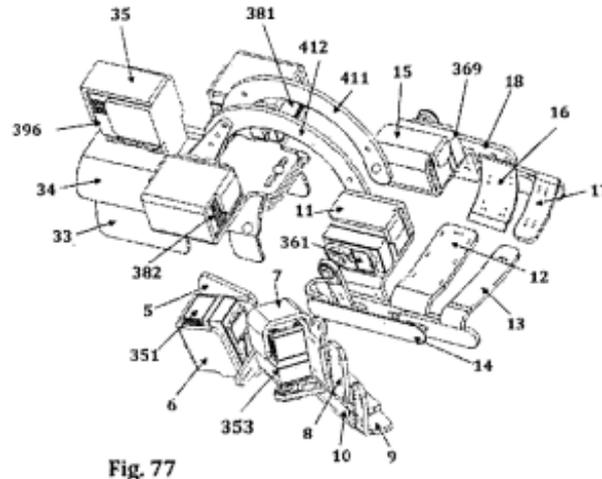


Figura 13 Ortesis para rehabilitación de mano y muñeca (Fuente: (Moreno Arango, 2018))

- **Dispositivo de rehabilitación de muñeca adaptativo de 6 grados de libertad**

Es un dispositivo con 6 grados de libertad que funciona mediante mecanismos paralelos guiados por rodamientos y servomotores. Permite la rehabilitación de los movimientos de flexión/extension, pronación/supinación y abducción/aducción (Tribeño Alata, 2021).

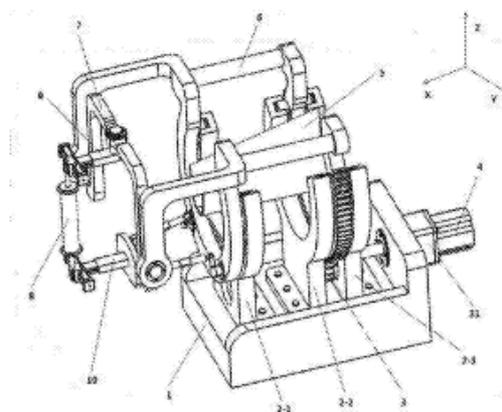


Figura 14 Dispositivo rehabilitación muñeca 6 grados de libertad (Fuente: (Li Jianfeng, 2016))

- **Dispositivo portátil de rehabilitación de mano y muñeca**

Este dispositivo de rehabilitación está formado por una pequeña caja donde se encuentra un freno cuya resistencia varia con un flujo magnético, lo que proporciona un control preciso de este y así el paciente puede variar la fuerza empleada en los ejercicios. El dispositivo posee elementos de agarre desmontables para variar los ejercicios tanto de la mano como de la muñeca (Carlson, 2000).

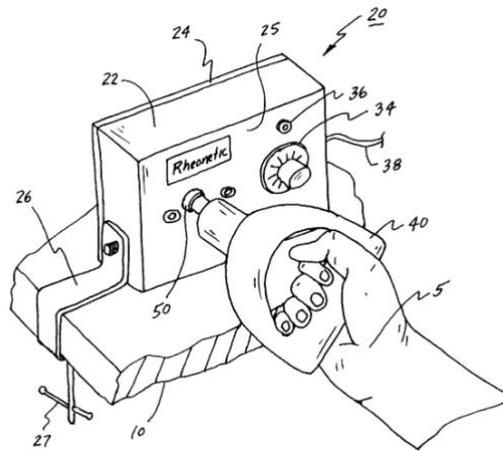


Figura 15 Dispositivo portátil de rehabilitación de mano y muñeca (Fuente: (Carlson, 2000))

### 3.3.3. ARTICULOS DE DISPOSITIVOS DE REHABILITACIÓN DE LA MUÑECA

(Pezent, et al., 2017) en su artículo propone un prototipo que combina la rehabilitación de la muñeca y la mano utilizando motores DC y encoders.

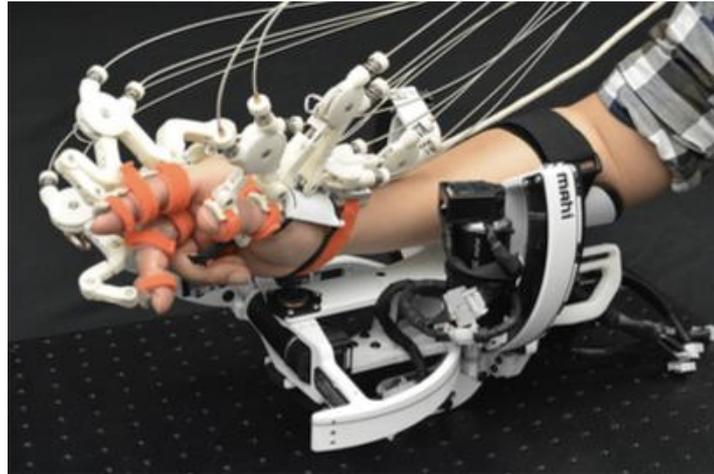


Figura 16 Prototipo rehabilitación mano y muñeca (Fuente; (Pezent, et al., 2017))

Otro ejemplo es el propuesto por (Oblak, et al., 2010) que podemos ver en las “Figura 17” en el que encontramos un dispositivo háptico para la rehabilitación del brazo y de la muñeca.

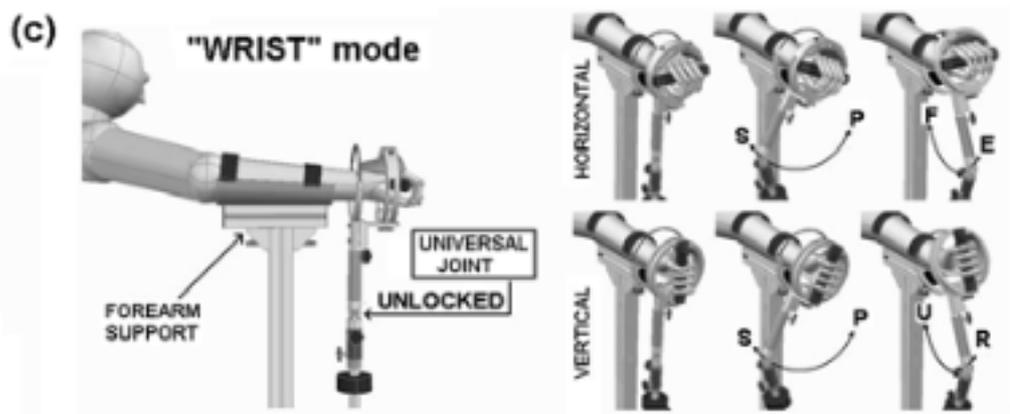


Figura 17 Dispositivo háptico para rehabilitación de brazo y muñeca (Fuente (Oblak, et al., 2010))

Otro ejemplo de dispositivo para la rehabilitación de la muñeca con dos grados de libertad es el presentado por (Copaci, et al., 2016) que utilizando actuadores SMA (Shape Memory Allow), sin motores presentan un exoesqueleto extremadamente ligero, silencioso y con una estructura muy simple.

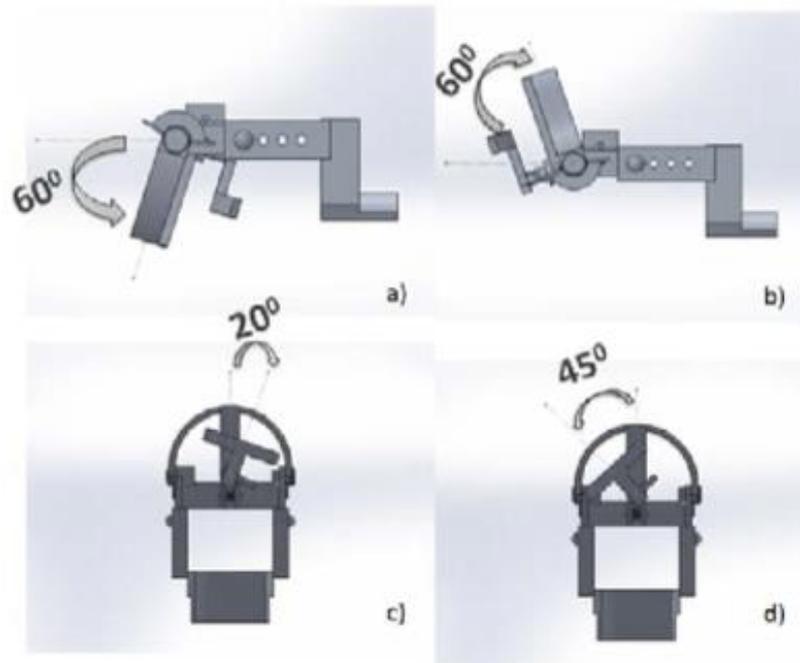


Figura 18 Dispositivo rehabilitación muñeca con actuadores SMA (Fuente: (Copaci, et al., 2016))

### 3.3.4. DISPOSITIVOS HÁPTICOS PAA EL MOVIMIENTO DE LA MUÑECA

- **EXOS Wrist DK2**

Se trata de un dispositivo háptico, que realiza la realimentación de fuerza al sujeto que interactúa con entornos virtuales o remotos. Estas fuerzas las aplica para los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la muñeca. Tiene un peso de 350 g y no presenta obstrucción en la palma de la mano. Su par motor es de 20N.cm y contiene una batería de 11,1V/980 mAh con un tiempo de uso continuo de 2,5 horas (Exiii inc., s.f.).



Figura 19 Exoesqueleto EXOS Wrist DK2 (Fuente: (Exiii inc., s.f.))

## 4. FISIOLÓGÍA DE LA MUÑECA

La muñeca, articulación distal del miembro superior, permite a la mano aportar la posición ideal para realizar una función (Kapadnji, 2006).

El complejo articular de la muñeca posee dos grados de libertad que junto a la rotación del antebrazo sobre su eje longitudinal se le añade un tercer grado de libertad a la muñeca.

El núcleo central de la muñeca es el carpo, conjunto compuesto por ocho pequeños huesos.

El complejo articular de la muñeca está formado por dos articulaciones:

- La articulación radiocarpiana.
- La articulación mediocarpiana.

### 4.1. MOVIMIENTOS DE LA MUÑECA

Los movimientos de la muñeca actúan en torno a dos ejes (Kapadnji, 2006):

- **Movimiento de flexión**

La cara anterior o palmar de la mano se aproxima a la cara anterior del antebrazo. Ángulo flexión activa 85°, flexión pasiva 100°. Interviene el músculo flexor cubital del carpo, el músculo flexor radial del carpo y el palmar largo.

- **Movimiento de extensión**

La cara posterior o dorsal de la mano se aproxima a la cara posterior del antebrazo. Ángulo extensión activa 85°, extensión pasiva 95°. Interviene el músculo extensor cubital del carpo y los músculos extensores radial largo y corto del carpo.

- **Movimiento de aducción o inclinación cubital**

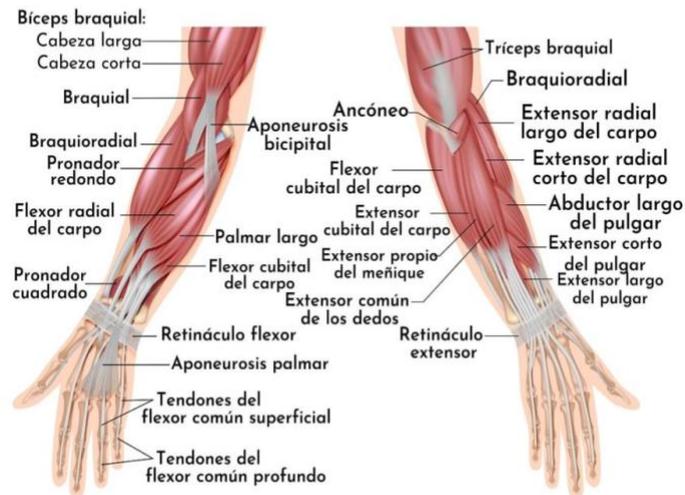
La mano se aproxima al eje del cuerpo y su borde interno o borde cubital, forma con el borde interno del antebrazo, un ángulo obtuso. Con el eje de la mano 30°. Interviene el músculo flexor cubital del carpo y el músculo extensor cubital del carpo.

- **Movimiento de abducción o inclinación radial**

La mano se aleja del eje del cuerpo y su borde externo o borde radial forma con el borde externo del antebrazo un ángulo obtuso. No sobrepasa los 15°. Intervienen el músculo flexor radial del carpo, el palmar largo y los extensores radial largo y corto del carpo.

## Músculos del antebrazo (brazo derecho)

Cara anterior Cara posterior



**lifeder**.com

Figura 20 Músculos antebrazo (Fuente: (<https://www.lifeder.com>, s.f.))

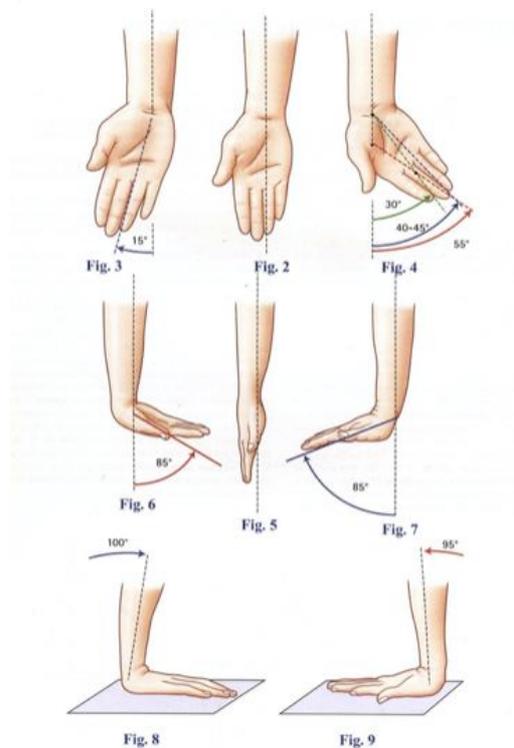


Figura 21 Movimientos de la articulación de la muñeca (Fuente:( (Kapadnji, 2006))

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL

### 5.1. FUNCIÓN PRINCIPAL

La función principal del prototipo es ser capaz de reconocer la intención de los movimientos de la articulación de la muñeca del usuario y la posterior actuación para realizar dicho movimiento.

Requisitos:

- Reconocer intencionalidad del usuario
- Ser capaz de mover la mano con una carga 1 kg de peso
- Bajo coste de sus componentes.
- Ergonómico
- Portátil

### 5.2. CINEMÁTICA

Nuestro prototipo debe contener dos grados de libertad para realizar los movimientos de flexión y extensión, por un lado, y aducción y abducción por el otro. Los rangos máximos de cada movimiento se encuentran en la “Tabla 3” se han establecido según el apartado 4.1.

Tabla 3 Rango de movimientos de la muñeca (Fuente: elaboración propia)

Movimiento	Rango
Flexión	0 - 85°
Extensión	0 - 85°
Aducción	0 - 30°
Abducción	0 - 15°

### 5.3. GEOMETRÍA

Para dimensionar el exoesqueleto se utilizarán las medidas del antebrazo y de la mano del autor, para su posterior uso.

## **5.4. TORQUE**

Para calcular el torque necesario que deben tener los actuadores, es necesario sumar el kilogramo que debe ser capaz de levantar el prototipo con el peso de la mano, según el artículo (Ciaffaroni Castro, et al., 2011) el peso de la mano corresponde al 0,8% del peso corporal. En este caso el peso corporal es 76 kg, por lo tanto, el peso de la mano sería de 0,6 kg.

## **5.5. SISTEMA MECÁNICO**

El diseño mecánico del prototipo dependerá de las ubicaciones y de los tipos de sensores seleccionados para el exoesqueleto.

## **5.6. SISTEMA ELECTRÓNICO**

- **Entradas**

El prototipo debe captar señales para reconocer la intencionalidad del usuario mediante sensores.

- **Salidas**

Para realizar los movimientos se utilizarán servomotores debido a su ergonomía, gran precisión, fácil programación y un coste asequible.

- **Control**

El sistema de control se va a realizar mediante Arduino por ser una plataforma de código abierto que se basa en hardware y software libre y su bajo coste.

- **Alimentación**

El exoesqueleto debe ser portátil por lo tanto se alimentará con unas baterías recargables.

## **5.7. MATERIALES**

Para reducir peso, su bajo coste, gran versatilidad y fácil acceso los elementos del dispositivo se fabricarán mediante la impresión 3D.

## 6. DISEÑO

Para el diseño del prototipo se utilizó la técnica de ensayo-error, gracias a la disposición de una impresora 3D esta técnica es viable. La simulación de la respuesta de los sensores en la realidad no es factible por la cantidad de factores que varían el valor y dirección de las fuerzas aplicadas, por lo tanto, se fueron probando distintos tipos de sensores y distintas formas de ubicarlos para realizar el diseño.

Un problema de diseño del exoesqueleto es la combinación de los dos grados de libertad debido a las pocas alternativas de ubicación que contiene la articulación de la muñeca y la limitación del tamaño para incluir un sistema de transmisión. Se ha tomado como referencia el exoesqueleto EXO Wrist DK2 visto en el apartado 3.3.4 debido a su simplicidad y su ergonomía.

### 6.1. GEOMETRÍA

Para realizar el diseño mecánico y realizar los cálculos para el dimensionamiento de los servomotores, se han tomado como referencia las medidas de la mano izquierda del autor del proyecto. En la “Figura 22” podemos ver los puntos tomados como referencia.

- 1) Eje de rotación de la muñeca
- 2) Inicio dorso de la mano
- 3) Inicio nudillos

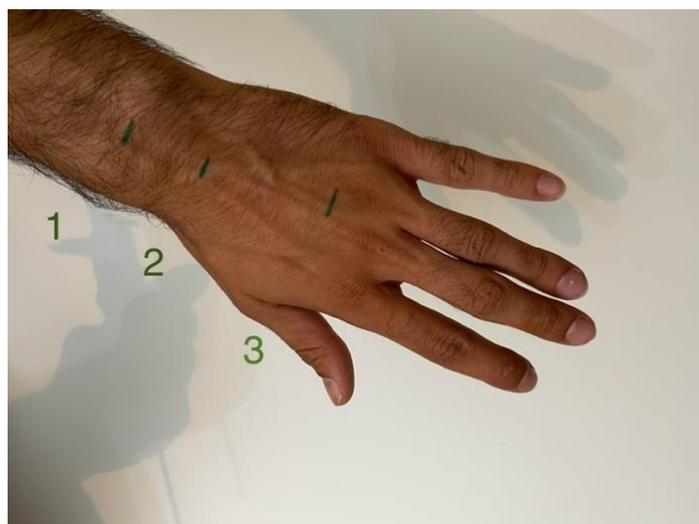


Figura 22 Puntos de referencia de la mano para realizar mediciones (Fuente: elaboración propia)

En la “Tabla 4” se recogen los valores obtenidos en las mediciones y a continuación se explica cómo se han realizado y su razón.

Tabla 4 Medidas mano y antebrazo (Fuente: elaboración propia)

Distancia	Medida (m)
Eje de rotación – correa sujeción	0,083
Largo dorso de la mano	0,055
Largo de los dedos	0,135
Ancho de la mano	0,081
Ancho de la muñeca	0,057
Grosor de la muñeca	0,041

### 6.1.1. DISTANCIA DEL EJE ROTACIÓN A LA CORREA DE SUJECIÓN

- **Motivo**

Esta medida es necesaria para calcular el torque realizado por el servomotor ubicado en el antebrazo (movimientos flexión y extensión) y diseñar la unión entre los dos servomotores.

- **Medida**

En la “Figura 23” se puede observar cómo se ha tomado esta medida desde el eje de rotación de la muñeca (1), hasta el inicio de los nudillos (3), donde se encuentra la ubicación de la correa de sujeción que unirá la mano con el prototipo. La medida obtenida es de **0,083 m**.



Figura 23 Distancia eje de rotación a la sujeción de la correa (Fuente: elaboración propia)

### 6.1.2. DISTANCIA LARGO DEL DORSO DE LA MANO

- **Motivo**

Esta medida es necesaria para calcular el torque ejercido por el servomotor ubicado en la mano (movimientos de abducción y aducción) y diseñar la pieza que unirá este servomotor con la mano.

- **Medida**

En la “Figura 24” se muestra cómo se tomó la medida desde el inicio del dorso de la mano (2), hasta el inicio de los nudillos (3). La medida obtenida fue de **0,055 m**.



Figura 24 Distancia largo de la mano (Fuente: elaboración propia)

### 6.1.3. DISTANCIA LARGO DE LOS DEDOS

- **Motivo**

Esta medida se utilizará para el cálculo de ambos torques.

- **Medida**

En la “Figura 25” se muestra como se ha tomado la medida desde el inicio de los nudillos (3) hasta el final de los dedos. La medida obtenida es **0,135m**.



Figura 25 Distancia largo de los dedos (Fuente: elaboración propia)

#### 6.1.4. DISTANCIA ANCHO DE LA MANO

- **Motivo**

Esta medida es necesaria para el diseño de la pieza que une el servomotor con la mano.

- **Medida**

En la “Figura 26” se observa cómo se realizó la medida. La medida obtenida es de **0,081m**.



Figura 26 Distancia ancho de la mano (Fuente: elaboración propia)

### 6.1.5. DISTANCIA ANCHO DE LA MUÑECA

- **Motivo**

Esta medida se utilizará para el diseño del soporte del antebrazo que sujetará el exoesqueleto y diseñar la unión entre los dos servomotores.

- **Medida**

En la “Figura 27” se muestra cómo se realizó esta medida. La medida obtenida es de **0,057m**.



Figura 27 Distancia ancho de la muñeca (Fuente: elaboración propia)

### 6.1.6. DISTANCIA GROSOR DE LA MUÑECA

- **Motivo**

Esta medida como la anterior será utilizada para el diseño del soporte del antebrazo y diseñar la unión de los dos servomotores.

- **Medida**

En la “Figura 28” se observa cómo se obtuvo la medida. La medida obtenida es de **0,041 m**.



Figura 28 Distancia grosor de la muñeca (Fuente: elaboración propia)

## 6.2. TORQUE

Conociendo el peso que debe mover el exoesqueleto y las distancias obtenidas en las mediciones se realizaron los siguientes cálculos: Los resultados se pueden ver en la “Tabla 5”, a continuación, se encuentra su desarrollo. Para visualizar las fuerzas que actúan en el mecanismo y calcular el valor del torque necesario del servomotor, se realiza el diagrama de cuerpo libre. “Figura 29”. En este caso debido a que el material utilizado es muy ligero, despreciamos la fuerza ejercida por su peso.

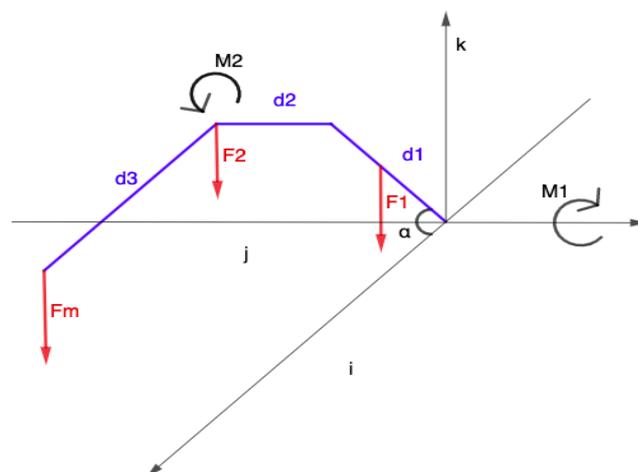


Figura 29 Diagrama del cuerpo libre del prototipo (Fuente: elaboración propia)

### 6.2.1. MOVIMIENTOS FLEXIÓN Y EXTENSIÓN

El torque necesario del servomotor para realizar los movimientos de flexión y extensión  $M_1$  es el momento total en el eje  $j$ , que a su vez es la suma de los momentos ejercidos por cada fuerza:

$$M_1 = M_{jm} + M_{j1} + M_{j2} \quad (6.2.1.1)$$

El momento es el producto vectorial entre la fuerza existente y el vector de posición, por el vector unitario del eje, en este caso el eje  $j$ .

$$M_1 = \hat{u}_j \cdot (\vec{r} \times \vec{F}) \quad (6.2.1.2)$$

$$\hat{u}_j = j \quad (6.2.1.3)$$

Se calcula el momento generado por el peso de la mano y el peso que debe manipular:

$$\vec{r}_m = (d_1 \cdot \cos \alpha + d_3)i + 0j + (d_1 \cdot \sin \alpha)k \quad (6.2.1.4)$$

$$\vec{F}_M = -F_M k \quad (6.2.1.5)$$

$$M_{jm} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ (d_1 \cdot \cos \alpha + d_3) & 0 & (d_1 \cdot \sin \alpha) \\ 0 & 0 & -F_M \end{vmatrix} \quad (6.2.1.6)$$

$$M_{jm} = F_M \cdot (d_1 \cdot \cos \alpha + d_3) \quad (6.2.1.7)$$

Cálculo del momento ejercido en  $j$  por el peso del servomotor 2:

$$\vec{r}_2 = (d_1 \cdot \cos \alpha)i + 0j + (d_1 \cdot \sin \alpha)k \quad (6.2.1.8)$$

$$\vec{F}_2 = -F_2 k \quad (6.2.1.9)$$

$$M_{j2} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ (d_1 \cdot \cos \alpha) & 0 & (d_1 \cdot \sin \alpha) \\ 0 & 0 & -F_2 \end{vmatrix} \quad (6.2.1.10)$$

$$M_{j2} = F_2 \cdot (d_1 \cdot \cos \alpha) \quad (6.2.1.11)$$

Cálculo del momento generado por el peso del servomotor 1:

$$\vec{r}_1 = \left(\frac{d_1}{2} \cdot \cos \alpha\right) i + 0j + \left(\frac{d_1}{2} \cdot \sin \alpha\right) k \quad (6.2.1.12)$$

$$\vec{F}_1 = -F_1 k \quad (6.2.1.13)$$

$$M_{j1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \left(\frac{d_1}{2} \cdot \cos \alpha\right) & 0 & \left(\frac{d_1}{2} \cdot \sin \alpha\right) \\ 0 & 0 & -F_1 \end{vmatrix} \quad (6.2.1.14)$$

$$M_{j1} = F_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} \cdot \cos \alpha\right) \quad (6.2.1.15)$$

El momento total lo encontramos en la siguiente ecuación:

$$M_1 = (F_M \cdot (d_1 \cdot \cos \alpha + d_3)) + (F_2 \cdot (d_1 \cdot \cos \alpha)) + \left(F_1 \cdot \left(\frac{d_1}{2} \cdot \cos \alpha\right)\right) \quad (6.2.1.16)$$

Como el peso de los servomotores y sus medidas son desconocidos se van a despreciar las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$ , dando un factor de compensación de 1,25.

Se calcula la fuerza de la mano  $F_M$  sumando el peso de la mano 0,6 Kg y el peso requerido a levantar 1 Kg y multiplicándolo por la gravedad:

$$F_M = (0,6 + 1)Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = \mathbf{15,68 N} \quad (6.2.1.17)$$

La distancia  $d_t$  es la distancia desde del eje de rotación de la muñeca hasta la mitad de la longitud de los dedos, se ha determinado este punto debido a que es el más lejano donde se puede aplicar una fuerza por lo tanto es donde podemos encontrar un torque más alto. En la “tabla 6.1.1” están definidas estas distancias.

$$d_t = d_1 \cdot \cos \alpha + d_3 \quad (6.2.1.18)$$

$$d_t = Punto1|Punto3 + \frac{\text{largo de los dedos}}{2} = 0,083 m + \frac{0,135}{2} m = \mathbf{0,151 m} \quad (6.2.1.19)$$

$$M_1 = F_M \cdot d_t \quad (6.2.1.20)$$

$$M_1 = 15,68 N \cdot 0,151m = \mathbf{2,37 N \cdot m} \quad (6.2.1.21)$$

Aplicándole el margen de compensación de 1,25:

$$M_{1T} = 2,37 N \cdot m \cdot 1,25 = \mathbf{2,96 N \cdot m} \quad (6.2.1.22)$$

$$M_{1T} = \mathbf{2,96 N \cdot m} \quad (6.2.1.23)$$

Debido a la posibilidad de construir el prototipo con un servomotor de menor torque para realizar las pruebas. Realizamos el mismo cálculo, pero en este caso sin tener en cuenta el peso de 1 kg que debería ser capaz de levantar ( $M_{1alt}$ ).

$$F_M = 0,6Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = \mathbf{5,88 N} \quad (6.2.1.24)$$

La distancia  $d_t$  es la misma, por lo tanto:

$$M_{1alt} = F_M \cdot d_t \quad (6.2.1.25)$$

$$M_{1alt} = 5,88 \text{ N} \cdot 0,151\text{m} = \mathbf{0,89 \text{ N} \cdot \text{m}} \quad (6.2.1.26)$$

Aplicándole el margen de compensación de 1,25:

$$M_{1altT} = 0,89 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 1,25 = \mathbf{1,11 \text{ N} \cdot \text{m}} \quad (6.2.1.27)$$

$$M_{1altT} = \mathbf{1,11 \text{ N} \cdot \text{m}} \quad (6.2.1.28)$$

## 6.2.2. MOVIMIENTOS ADUCCIÓN Y ABDUCCIÓN

Para este eje el momento se calcula directamente con la “ecuación 6.2.2.1”, siendo  $F_M$  la fuerza ejercida por el peso de la mano “ecuación 6.2.1.17” y el peso a levantar,  $d_3$  la distancia desde del eje del servomotor al centro del largo de los dedos.

$$M_2 = F_M \cdot d_3 \cdot \sin \alpha \quad (6.2.2.1)$$

La distancia  $d_3$  la obtenemos desde  $\frac{1}{3}$  del largo del dorso de la mano, donde se encuentra el eje del servomotor, hasta la mitad de la longitud de los dedos.

$$d_3 = \frac{2 \cdot \text{largo dorso mano}}{3} + \frac{\text{largo de los dedos}}{2} = \frac{2 \cdot 0,055}{3} \text{ m} + \frac{0,135}{2} = \mathbf{0,104 \text{ m}} \quad (6.2.2.2)$$

$$M_2 = 15,68 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,104\text{m} \cdot \sin 90 \quad (6.2.2.3)$$

$$M_2 = \mathbf{1,63 \text{ N} \cdot \text{m}} \quad (6.2.2.4)$$

Aplicando el factor de compensación:

$$M_{2T} = 1,63 \text{ N.m} \cdot 1,25 = \mathbf{2,04 \text{ N.m}} \quad (6.2.2.5)$$

$$M_{2T} = \mathbf{2,04 \text{ N.m}} \quad (6.2.2.6)$$

Como en el caso anterior calculamos el momento sin el peso de 1 kg, la fuerza la encontramos en la “ecuación 6.2.1.24”:

$$M_{2alt} = 5,88 \text{ N.m} \cdot 0,104\text{m} \cdot \sin 90 \quad (6.2.2.7)$$

$$M_{2alt} = \mathbf{0,61 \text{ N.m}} \quad (6.2.2.8)$$

Aplicando el factor de compensación:

$$M_{2Talt} = 0,61 \text{ N.m} \cdot 1,25 = \mathbf{0,76 \text{ N.m}} \quad (6.2.2.9)$$

$$M_{2Talt} = \mathbf{0,76 \text{ N.m}} \quad (6.2.2.10)$$

### 6.2.3. RESULTADOS

Tabla 5 Resultados de los cálculos realizados para el dimensionamiento de los servomotores (Fuente: elaboración propia)

Servomotor	Mano + carga		Mano	
	Torque (N.m)	Torque (Kgf.cm)	Torque (N.m)	Torque (Kgf.cm)
Antebrazo	2,96	30,18	1,11	11,32
Mano	2,04	20,8	0,76	7,75

En su estudio (Pando & Charles, 2013) determinan que el torque máximo que puede ejercer la muñeca es de 12N.m, el más frecuente es de 0,3 N.m, y la media es de 2N.m. Comparando estos valores a los cálculos obtenidos se puede observar que el prototipo tiene un par suficiente para realizar las tareas más comunes.

## 6.3. SISTEMA ELECTRÓNICO

### 6.3.1. ENTRADAS

Se realizaron prototipos con diferentes tipos de sensores para conocer la intencionalidad del usuario. En el apartado 7 se explica detalladamente como se utilizaron y su funcionamiento. A continuación, se explica el funcionamiento de los sensores utilizados o tenidos en cuenta.

#### 6.3.1.1 SENSORES EMG

Las señales EMG son los impulsos eléctricos producidos por los músculos durante los procesos de contracción y relajación muscular. Estas señales bioeléctricas se producen fisiológicamente y llevan información de la actividad muscular del ser humano al sistema nervioso central (Salamea Palacios & Luna Romero, 2019).

Normalmente, estas señales se obtienen mediante electrodos superficiales colocados sobre la piel en el lugar en donde se pretende medir la actividad muscular. La información obtenida a partir de señales EMG tiene una amplia variedad de aplicaciones. Sin embargo, estas señales suelen verse perturbadas por varios tipos de ruidos en el proceso de adquisición (Salamea Palacios & Luna Romero, 2019).

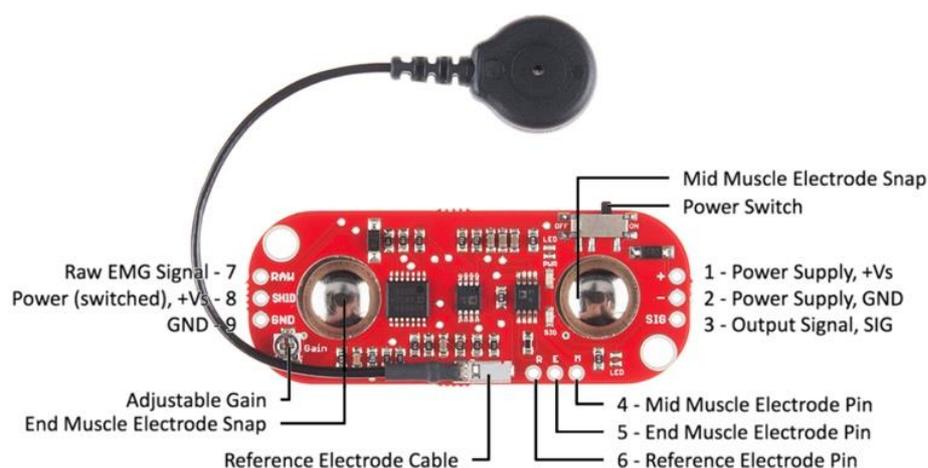


Figura 30 Sensor muscular EMG MyoWare (Fuente: (naylampmechatronics, s.f.))

Este sensor se utilizó en el prototipo 1, se desarrolla su empleo en el apartado 7.1.

### 6.3.1.2 POTENCIÓMETROS

Un potenciómetro es un transductor entre la posición de un objeto, ya sea lineal o angular, y un cambio de resistencia. Están formados por tres terminales, uno en cada extremo del material, y un tercer terminal que varía su posición a lo largo del elemento resistivo, de tal forma que la resistencia entre el terminal móvil y los terminales fijos varía cuando el elemento móvil cambia de posición, así, cuando una resistencia disminuye, la otra necesariamente aumenta. Su circuito equivalente lo podemos ver en la “Figura 31” (Corona Ramírez, et al., 2014).

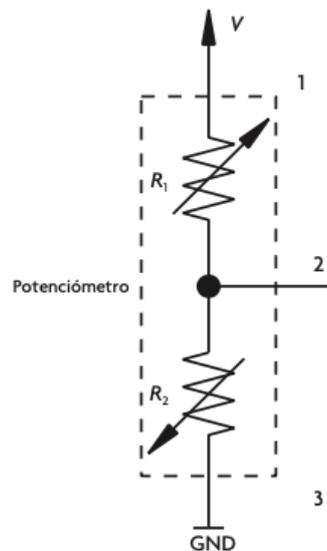


Figura 31 Circuito equivalente potenciómetro (Fuente: elaboración propia)

Para conocer la posición del elemento móvil se hace uso de un divisor de tensión. Esta correlación entre el voltaje y la posición se puede calcular mediante la fórmula:

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (6.3.2.1)$$

Siendo  $V_{in}$  el voltaje de entrada,  $V_{out}$  el voltaje de salida,  $R_1$  la resistencia conectada entre el nodo de tierra y el nodo de  $V_{out}$ , mientras que la resistencia  $R_2$  está conectada entre los nodos  $V_{in}$  y  $V_{out}$ .

Podemos encontrar varios tipos de potenciómetros. Según su tipo de movimiento:

- Rotacional
- Lineal

O según su fabricación:

- Potenciómetros de bobina
- Películas de carbono
- Elementos plásticos conductores
- Películas metálicas
- Cermet

Este sensor se utilizó en los prototipos 2 y 5, se desarrolla en los apartados 7.2 y 7.5.

### **6.3.1.3 GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS**

Son el instrumento más utilizado para la medición de esfuerzos y deformaciones. Las galgas se basan en el principio piezoresistivo descubierto por Lord Kelvin en 1856, el cual establece que la resistencia eléctrica de un metal o semiconductor varía cuando este es deformado por la aplicación de una fuerza externa o gradiente de temperatura. Pero hasta la década de 1930 el principio piezoresistivo no fue utilizado para la medición experimental de esfuerzos y deformaciones por Simmons y Ruge (Corona Ramírez, et al., 2014).

Tipos de galgas extensométricas:

- Celdas de carga: sistemas de medición de peso
- Celdas de columna
- Celdas de viga
- Celdas de viga doble
- Celda de viga en S
- Celda de viga en cantiléver
- Celdas de plataforma

Se descarto el uso de este sensor debido a la dificultad de adaptabilidad al diseño y su dificultad de instalación.

#### 6.3.1.4      **SENSORES RESISTIVOS DE FUERZA O FSR**

Son sensores basados en el efecto piezoresistivo, pero a diferencia de las galgas extensiométricas, su resistencia eléctrica no varía ante una deformación. Para obtener un cambio en la resistencia eléctrica del sensor se necesita aplicar una fuerza sobre el extremo circular del sensor. La resistencia inicial es aproximadamente del orden de  $10\text{ M}\Omega$ , y al ser aplicada una fuerza la resistencia empieza a disminuir aproximadamente hasta  $10\text{ k}\Omega$ . Cuando la resistencia deja de disminuir, aunque siga aumentando la fuerza aplicada, se dice que se ha saturado el sensor; es decir, se ha alcanzado la fuerza máxima que es capaz de medir (Corona Ramírez, et al., 2014).



Figura 32 Sensor FSR (Fuente: (Amazon, s.f.))

Un sensor resistivo de fuerza o FSR está formado por una o dos hojas de polímero que sirven de sustrato, sobre las cuales se deposita un estrato conductor, seguido de una tinta sensitiva a la presión aplicada. En caso de existir dos sustratos, estos son unidos con un adhesivo para obtener la estructura final del dispositivo. El área de detección es considerada como un solo punto; por tanto, para obtener mediciones adecuadas es necesario que la fuerza se distribuya de manera uniforme sobre el área de detección (Corona Ramírez, et al., 2014).

Al tratarse de un sensor resistivo, la señal de salida del sensor será un voltaje que cambiará según se modifique la resistencia del sensor. Para ello se puede hacer con un con un divisor de voltaje (Corona Ramírez, et al., 2014).

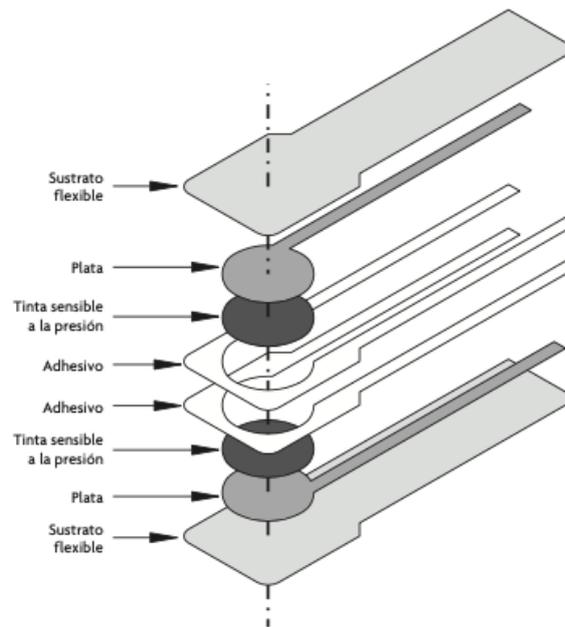


Figura 33 Estructura sensor FSR (Fuente: (Corona Ramírez, et al., 2014))

## 6.3.2. SALIDAS

### 6.3.2.1 FUNDAMENTOS DE LOS SERVOMOTORES

El servomotor es uno de los actuadores más utilizados en la integración de sistemas. Se trata de un dispositivo que en su interior se compone de un motor con un reductor de velocidad y multiplicador de fuerza, y además cuenta con un circuito de control (Corona Ramírez, et al., 2014). Los componentes de un servomotor los podemos encontrar en la “Figura 34”

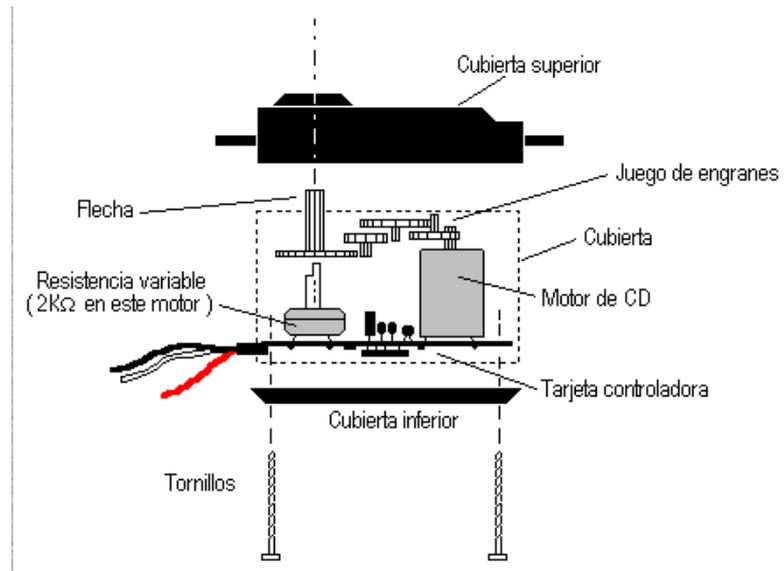


Figura 34 Componentes de un servomotor (Fuente: (Corona Ramírez, et al., 2014))

La conexión de este dispositivo se realiza mediante tres cables:

- VCC (cable rojo). Voltaje de alimentación
- GND (cable negro). Voltaje de referencia.
- Signal (cable naranja). Entrada para señal de control (PWM).

El control de un servomotor se realiza mediante pulsos PWM (Pulse Width Modulation), es decir, debe aplicarse un pulso de duración y frecuencia específico. Depende del ancho del pulso, el circuito interno de control diferencial lleva al servomotor a la posición indicada (Corona Ramírez, et al., 2014).

En la “Figura 35” podemos ver que dependiendo del ancho de pulso, se obtienen 0°, 90° y 180° con anchos de pulso de 0.5, 1.5 y 2.5 ms, respectivamente.

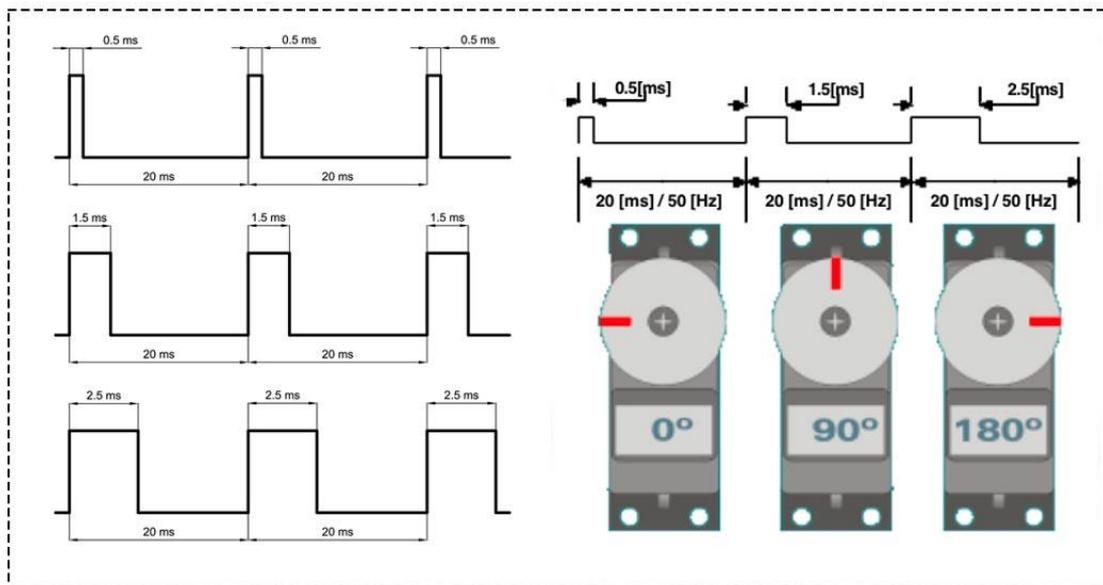


Figura 35 Tren de pulsos para el control de un servomotor (Fuente: (zonamaker, s.f.))

La modulación por ancho de pulso es una de las técnicas más utilizadas para el control de servomotores. Consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está a nivel alto, manteniendo el mismo periodo, con el objetivo de modificar la posición del eje según se desee (Corona Ramírez, et al., 2014).

Para la generación de este tipo de onda en el controlador que se utiliza Arduino, se dispone de un software “Librería Servo”.

Otro tipo de servomotor que podemos encontrar y podría ser útil en este dispositivo, serían los servomotores con salida analógica. Estos incluyen un tercer cable que envía una señal analógica con la posición en la que se encuentra el servomotor. Esta retroalimentación puede ser de gran ayuda para el software del dispositivo, pero en este caso no ha sido necesario este tipo de señal.

Se ha elegido este actuador por las siguientes ventajas que presenta:

- Facilidad de programación.
- Repetibilidad de movimiento casi perfecta.
- Excelente precisión.
- Son más confiables y livianos que los motores paso a paso.

### 6.3.2.2 SELECCIÓN DE SERVOMOTORES

Según los cálculos obtenidos en el apartado 6.2 se han elegido los siguientes servomotores:

- El servomotor FEETECH 40kg FT5335M-FB con feedback “Figura 36” ha sido elegido para su ubicación en el antebrazo.



Figura 36 Servomotor FEETECH 40kg FT5335M-FB con feedback (Fuente: (Brico geek, s.f.))

Sus principales características son (Brico geek, s.f.):

- Dimensiones: 62.8 x 32.5 x 55.9 mm
- Peso: 180 gramos
- Alimentación: 6 a 7.4 V
- Corriente máxima: 4 A
- Velocidad (6V): 0.2 s/60° (7.4V: 0.18 s/60°)
- torque 6V: 35.0 Kgf.cm ,7.4V: 40.0 Kgf.cm
- Piñones interiores y eje de salida en metal
- Precio: 29,95 €

Para el servomotor ubicado en el antebrazo se ha elegido FEETECH 20kg FT5323M que podemos ver en la “Figura 37”.



Figura 37 Servomotor FEETECH 20kg FT5323M (Fuente: (Brico geek, s.f.))

Sus principales características son (Brico geek, s.f.):

- Dimensiones: 40 x 20 x 40.4 mm
- Peso: 67 gramos
- Alimentación: 4.8 a 6V
- Corriente máxima: 1500 mA
- Velocidad 6V:0.22s/60 , 4,8V:0.16s/60
- torque 6V: 21.5 kgf.cm, 4.8V: 19 kgf.cm
- Carcasa de aluminio
- Piñones interiores metálicos
- Precio: 17,50 €

### 6.3.3. CONTROL

El sistema para la lectura de señales, procesamiento de estas y posterior actuación lo realizaremos mediante la placa de desarrollo Arduino NANO debido a su pequeño tamaño.

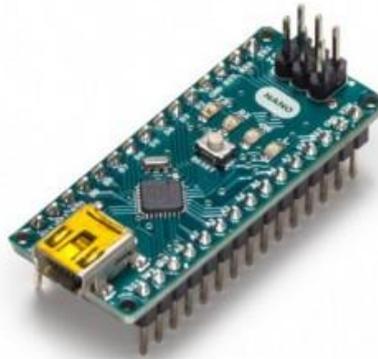


Figura 38 Placa de desarrollo Arduino Nano (Fuente: (Arduino, s.f.))

Arduino NANO “Figura 38” es una pequeña placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328. Sus principales características técnicas son (arduino, s.f.):

- **Microcontrolador: ATmega328.**
  - Tensión de Operación (nivel lógico): 5 V.
  - Tensión de Entrada (recomendado): 7-12 V.
  - Tensión de Entrada (limites): 6-20 V.
  - Terminales E/S Digitales: 14 (de los cuales 6 proveen de salida PWM).
  - Entradas Analógicas: 8.
  - Corriente máxima por cada terminal de Entrada/Salida: 40mA.
  - Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 2KB son usados por el bootloader.
  - SRAM: 2 KB (ATmega328).
  - EEPROM: 1 KB (ATmega328).
  - Frecuencia de reloj: 16 MHz.
  - Dimensiones: 18.5mm x 43.2mm
- **Alimentación:**
  - Una conexión Mini-B USB.
  - Una fuente de alimentación no regulada de 6-20V.
  - Una fuente de alimentación regulada de 5V.

- **Comunicación:**
  - UART recepción y transmisión
  - I2C
  - SPI

### 6.3.4. ALIMENTACIÓN

Para el prototipo capaz de cargar 1 kg, el voltaje necesario para el correcto funcionamiento del dispositivo es de 6V y el consumo máximo de corriente es de los servomotores es de 5,2 A se ha elegido 4 baterías ZNTER-batería recargable de 1,5 V y 6000mAh conectadas en serie, obteniendo 6V como se muestra en la “Figura 39”.



Figura 39 Asociación baterías en serie (Fuente: (aulafacil, s.f.))



Figura 40 ZNTER-batería recargable de 1,5 V y 6000mAh (Fuente: (Aliexpress, s.f.))

El prototipo de pruebas sin carga para su correcto funcionamiento tiene que ser alimentado con un voltaje de 6V y permitir consumo máximo de 3500 mAh. Como para realizar las pruebas de intencionalidad del usuario no se va a llegar al torque máximo el consumo de corriente no va a ser tan grande y por su bajo precio se utilizarán 4 pilas AA de 1,5 V 2500 mAh.

## 6.4. DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico se realizó mediante el software Fusión 360 de Autodesk. A partir de las medidas obtenidas en el Apartado 6.1 y usando como referencia el exoesqueleto “EXO Wrist DK2” visto en el apartado 3.3.4 se diseñaron las diferentes partes que se describen a continuación.

### 6.4.1. SOPORTE ANTEBRAZO

Esta pieza es la base del exoesqueleto, se ubica en el antebrazo y mediante dos correas se une a este. Realiza la función de soporte del dispositivo. En ella se encuentran la protoboard con la placa de desarrollo, la alimentación y el interruptor. En la “Tabla 6” se recogen las medidas vistas en el apartado 6.1 y las medidas del boceto utilizado en el diseño.

Tabla 6 Medidas empleadas en el diseño del soporte del antebrazo (Fuente: elaboración propia)

Medición	Medida mínima	Medida diseño
Ancho de la muñeca	0,057m	0,04m
Grosor de la muñeca	0,041m	0,05m

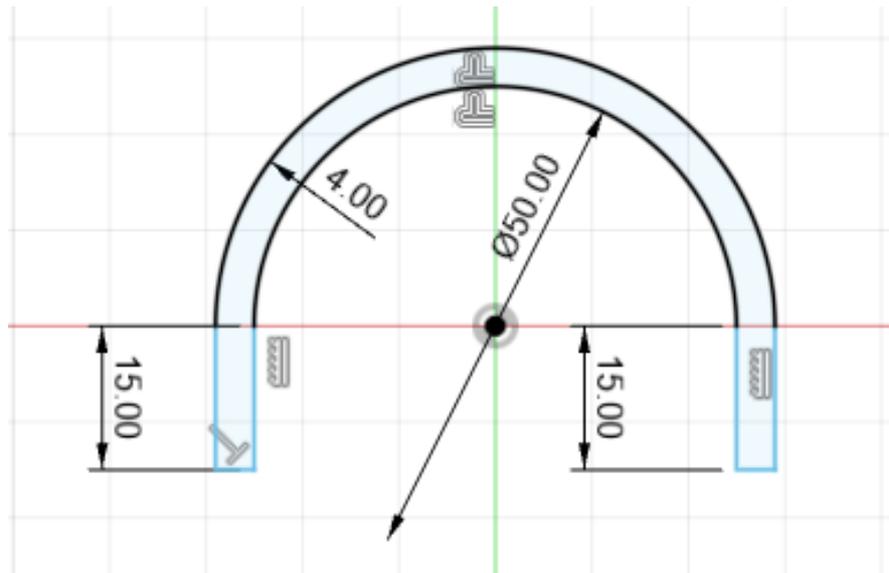


Figura 41 Boceto diseño soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia)

En la “Figura 41” se representa el boceto sobre el cual se diseña la pieza. El ancho total de la pieza es de 0,04 m menor al ancho de la muñeca para permitir que la correa se adapte a esta. Y el grosor es de 0,05 m ligeramente superior al grosor de la muñeca. A partir de este boceto se realiza una extrusión para darle volumen, con una inclinación del 5% para ir aumentando sus dimensiones como las del antebrazo según se alejan de la muñeca.

#### 6.4.2. SOPORTE MANO

Esta pieza es la encargada de unir la mano con el servomotor utilizando una correa. Las medidas como referencia son las vistas en el apartado 6.1 ancho de la mano 0,081m y largo del dorso de la mano 0,055m, la pieza no debe superar estos valores.

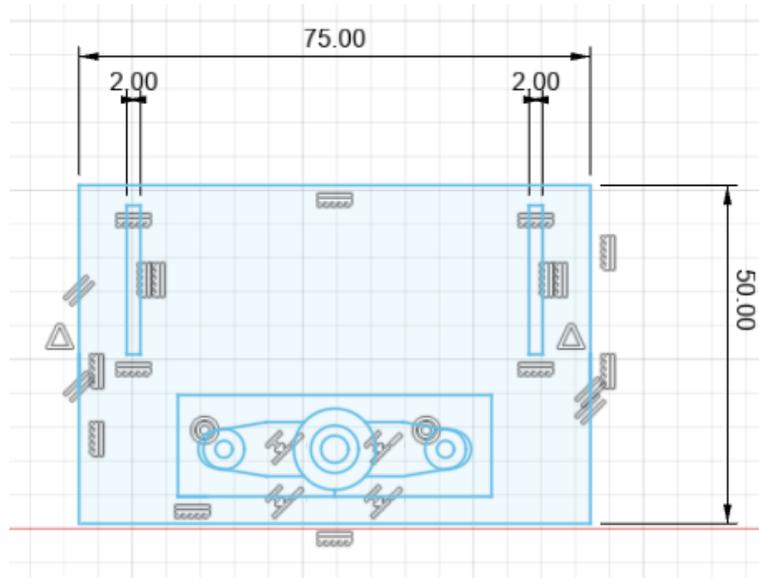


Figura 42 Boceto diseño soporte mano (Fuente: elaboración propia)

En la “Figura 42” se muestra el ejemplo de un boceto utilizado en el que se encuentran los agujeros por donde se ubica la correa y la conexión entre la pieza y el brazo del servomotor.

### 6.4.3. SOPORTE SERVOMOTORES

En la “Tabla 7” se muestran las dimensiones de los distintos servomotores y se diseñara a partir de estas una carcasa que permita la unión de los servomotores en el dispositivo. El diseño final dependerá de esta unión.

Tabla 7 Dimensiones de los servomotores del prototipo (Fuente: elaboración propia)

Servomotor	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)
FEETECH 40kg FT5335M-FB	0,063	0,0325	0,559
FEETECH 20kg FT5323M	0,04	0,02	0,0404
MG995	0,0407	0,0197	0,0429

#### 6.4.4. CODO UNIÓN SERVOMOTORES

Esta pieza es la que más dependencia de distintos factores tiene y es fundamental para el buen diseño del exoesqueleto. Para su correcto diseño se va a obtener las medidas como referencia en la posición neutral y las medidas obtenidas en el apartado 6.1. En la “Figura 43” se muestran los ejes a tener en cuenta.

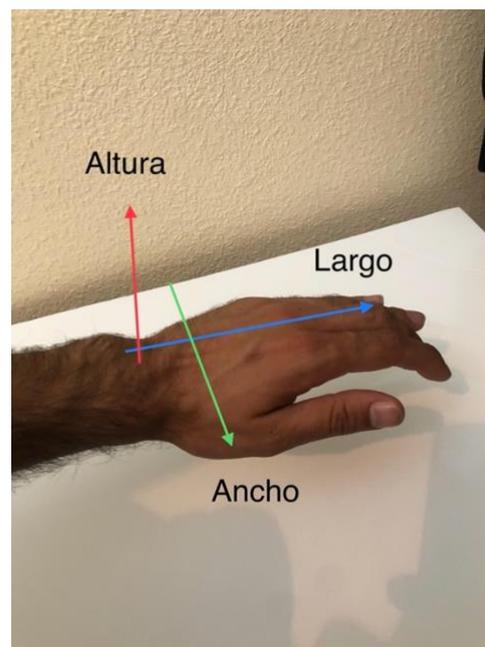


Figura 43 Ejes para el dimensionado de la pieza codo de unión de los servomotores  
(Fuente: elaboración propia)

Para conocer la distancia del largo del codo, se debe de restar a la medida de la distancia del eje de rotación a la correa (0,083m),  $\frac{2}{3}$  de la medida del largo del dorso de la mano (0,037m). Por lo tanto, la distancia entre los dos ejes de rotación de los servomotores debe ser 0,046m respecto al mismo eje que dibuja el brazo.

En cuanto al eje que determina el ancho del codo. La distancia se debe calcular teniendo en cuenta las dimensiones del soporte del brazo, de los servomotores y sus carcasas. La distancia entre los dos ejes debe ser la suma de  $\frac{1}{2}$  del ancho de la muñeca más el ancho de la unión entre el soporte del antebrazo y el servomotor del antebrazo.

La distancia en cuanto al eje que determina la altura del codo, se debe tener en cuenta la altura de los servomotores y sus carcasas, y la altura del soporte que une la mano al exoesqueleto. La distancia entre los dos ejes rotación debe ser  $\frac{1}{2}$  de el grosor de la muñeca.

## 6.5. MATERIALES

Una de las tecnologías de creciente incorporación en la industria como en estudios de diseño es el de las impresiones 3D utilizadas por los diseñadores para materializar diseños virtuales creados en un software de CAD (Computer Aided Design) (Ortiz Chimbo, et al., 2016).

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante (ahí radica la principal diferencia con los sistemas de producción tradicionales) adición de material. Los métodos de producción tradicionales son sustractivos, es decir, generan formas a partir de la eliminación de exceso de material. Las impresoras 3D se basan en modelos 3D para definir que se va a imprimir. Estos modelos son la representación digital de lo que vamos a imprimir y son creados mediante softwares de modelado (Ortiz Chimbo, et al., 2016).

En la actualidad existen 3 tipos de impresiones en 3D:

- Por compactación, en que una masa de polvo se compacta por estratos.
- Por adición, o de inyección de polímeros, en las que el propio material se añade por capas.
- Por estereolitografía, donde un láser ultravioleta solidifica por estratos una resina líquida.

### 6.5.1. IMPRESIÓN POR ADICION

En estos sistemas se crean los objetos superponiendo capas de abajo a arriba. El software divide el gráfico 3D en capas tan finas como el diámetro del plástico de salida. Para cada capa, la impresora se desplaza sobre el plano para soltar el plástico sobre las coordenadas adecuadas, formando así una figura en 3 dimensiones. La impresora 3D es básicamente una máquina de control numérico (CNC), de tres ejes y un extrusor. El extrusor es el componente que calienta y presiona el cable del material, para que salga en forma de hilo fino y quede con la forma deseada (Ortiz Chimbo, et al., 2016).

Los materiales utilizados en este tipo de impresoras generalmente son plásticos. Los más utilizados son el ABS y el PLA. En este caso hemos utilizado PLA por su mayor facilidad para la impresión y porque era el que se encontraba disponible, pero lo más adecuado hubiera sido escoger el ABS por sus mejores características, sobre todo mayor resistencia.

### **6.5.2. VENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D**

- No requiere moldes
- Es un proceso muy rápido
- Bajo coste al tratarse de pocas unidades
- Gran precisión
- No utiliza aditivos ni requiere procesados posteriores
- EL límite es la imaginación

## 7. PROTOTIPOS

Para realizar el diseño se utilizó la técnica ensayo-error. A partir de los sensores elegidos, se realizaron diseños básicos de las distintas piezas que forman el prototipo para que realizaran su función. Según se avanzaba se iba mejorando el diseño de cada una.

### 7.1. PROTOTIPO 1

La idea inicial en este proyecto era el uso de este tipo de sensores.

#### 7.1.1. FUNCIONAMIENTO

Se realizaron pequeñas pruebas con el sensor Myoware Muscle Sensor de Sparfunk colocándolo en los 4 principales músculos que intervienen en los movimientos de la muñeca:

- Extensor radial del carpo
- Extensor cubital del carpo
- Flexor radial del carpo
- Flexor cubital del carpo

#### 7.1.2. PROBLEMAS Y ERRORES

- **No se obtuvo ninguna señal estable**, el electrodo que utiliza este sensor es superficial y está pensado para el músculo del bíceps, el de aguja sería el idóneo para obtener una buena señal, pero debe ser colocado por personal médico. Los músculos con los que se iban a trabajar son pequeños y no del todo superficiales. La posición de los electrodos y su dirección son muy importantes para recibir una señal de calidad, por eso la colocación de este tipo de sensor es una tarea difícil por lo que no sería nada práctico para el exoesqueleto.
- **Son necesarios 4 sensores EMG** con un precio alrededor de 60 € y el precio del exoesqueleto se dispararía mucho. Para realizar los 4 movimientos de la muñeca, intervienen cuatro músculos, con las distintas combinaciones de estos realiza un movimiento u otro.

Por estas razones se descartó el uso de este sensor.

## 7.2. PROTOTIPO 2

Como el prototipo anterior no era válido, se pasó a reconocer la intencionalidad realizando el portador un pequeño inicio del movimiento que quisiera realizar. Por ello los sensores deben ser capaces de percibir este pequeño movimiento.

Como el uso de servomotores en exoesqueletos es muy frecuente y se trata de un componente muy económico y eficaz, se intentó diseñar el sistema de captación mediante potenciómetros.

### 7.2.1. FUNCIONAMIENTO

- **Prueba 1**

Esta se realizó con los movimientos de abducción y aducción.

El soporte de la mano se componía de dos piezas, “Figura 44”. Una de ellas era fija y se unía al servomotor y la otra pieza conectaba un potenciómetro y la mano. El funcionamiento del sistema consistía en que el giro de la mano provocaría giro del potenciómetro, obteniendo una señal para realizar el movimiento.

En la posición neutral (servomotores en posición inicial 90°) el sistema si funcionaba. Al girar a la izquierda (abducción) se obtenía un aumento de voltaje y al girar a la derecha (abducción) el voltaje disminuía.



Figura 44 Agarre mano con potenciómetro (Fuente: elaboración propia)

- **Prueba 2**

Mismo sistema que el anterior pero el potenciómetro se situaba encima del servomotor “Figura 45”, justo en el mismo eje. En la posición neutral si se obtuvo señal.



Figura 45 Potenciómetro encima del servomotor (Fuente: elaboración propia)

### 7.2.2. PROBLEMAS Y ERRORES

- **Dificultad en el diseño del mecanismo**, debido a las pocas opciones de agarre a la mano no había apenas alternativas para la colocación del potenciómetro.
- **Oposición de la mano**, la mano ejerce una resistencia para volver a su posición neutral, esta impedía mantener la mano en el ángulo deseado. Se diseñó un tope entre las dos piezas para mantener la posición, pero no se podía realizar el pequeño movimiento deseado ya que el potenciómetro no podía girar en la dirección deseada. Debido a no poder obtener señal para realizar todos los movimientos, se descartó este sensor.

### 7.3. PROTOTIPO 3

Como solución al problema encontrado en el prototipo. Se optó por utilizar un sensor resistivo de fuerza. Cuando el sensor se encuentre en el tope obtendría una señal y al realizar el pequeño movimiento de inicio aumentando su valor. Es un sensor pequeño

tamaño, bajo peso y bajo precio, características ideales para el prototipo. Para un correcto funcionamiento la presión debe repartirse en toda su superficie para ello se han utilizado pegatinas de fieltro entre el sensor y la pieza que ejerza la fuerza.

### 7.3.1. FUNCIONAMIENTO

- **Prueba 1**

El sistema, “Figura 46”, consistía en una pieza conectada al servomotor que contiene los sensores y otra conectada a la mano mediante una correa, estando estas dos piezas conectadas por su centro. Al realizarse un movimiento de la mano se ejerce una presión entre ellas.

El sistema funcionaba bien.

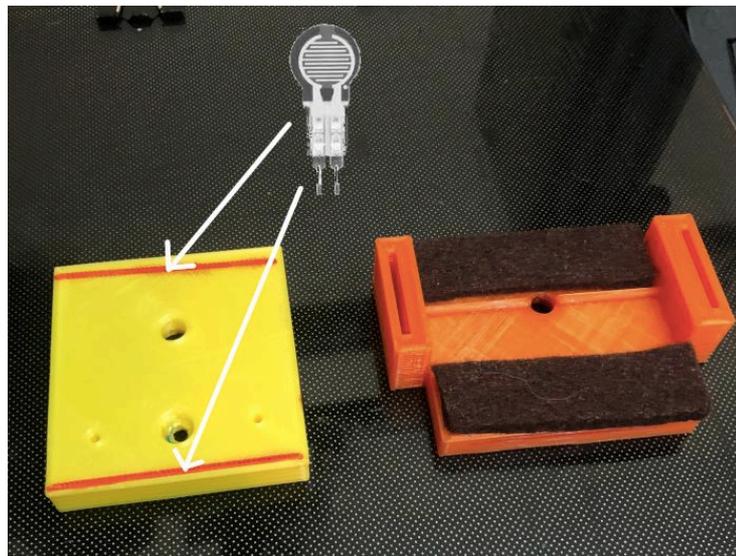


Figura 46 Colocación sensores para movimientos de flexión y extensión (Fuente: elaboración propia)

- **Prueba 2**

En la prueba 2 se colocaron los sensores para los movimientos de aducción y abducción en distintas posiciones como se ve en la “Figura 47”, Por tema de comodidad para el usuario y mayor movilidad de la mano se colocaron de tal forma que la correa sería la encargada de transmitir la fuerza de la mano al dispositivo.

El sistema no funcionaba en todos los movimientos

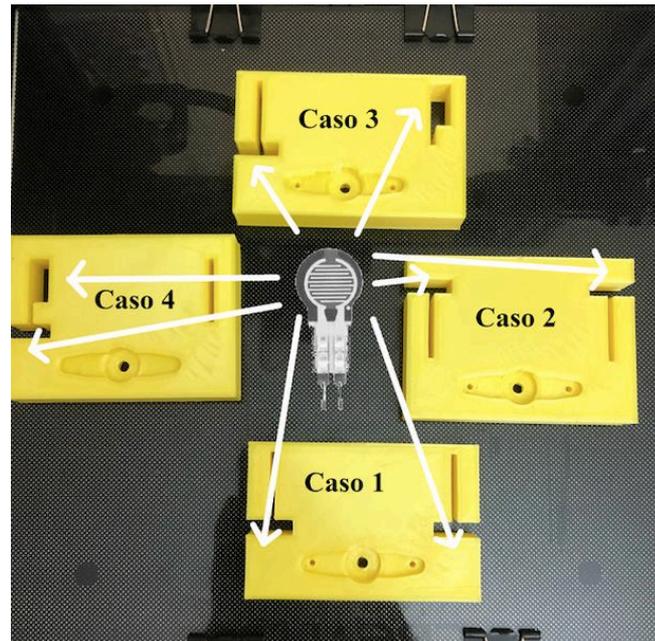


Figura 47 Pruebas colocación de sensores en el soporte de la mano (Fuente: elaboración propia)

- **Prueba 3**

En la prueba 3 el soporte de la mano estaba formado por 3 piezas “Figura 48”. La pieza principal que estaba unida al servomotor y contenía los sensores en sus laterales y dos piezas auxiliares conectadas a la mano mediante la correa y a la pieza principal mediante un eje en su extremo superior. La fuerza al sensor se aplicaba por presión directa de la pieza auxiliar correspondiente que era movida por la mano cuando esta giraba, al girar la mano la correa aplicaba una pequeña presión en los sensores.

El sistema funcionaba, pero no era estable.



Figura 48 Prueba 3 de soporte de mano (Fuente: elaboración propia)

- **Prueba 4**

La Prueba 4 “Figura 49” consistía en el mismo funcionamiento que la anterior, pero obteniendo la señal por disminución de presión, mediante una goma elástica que apretaba el sensor constantemente. Al realizar la intención de giro de la mano la correa separaba la pieza auxiliar disminuyendo así la fuerza aplicada.

El sistema funcionaba, pero no era estable.

El resultado era similar a la prueba anterior no se notó apenas mejoría.

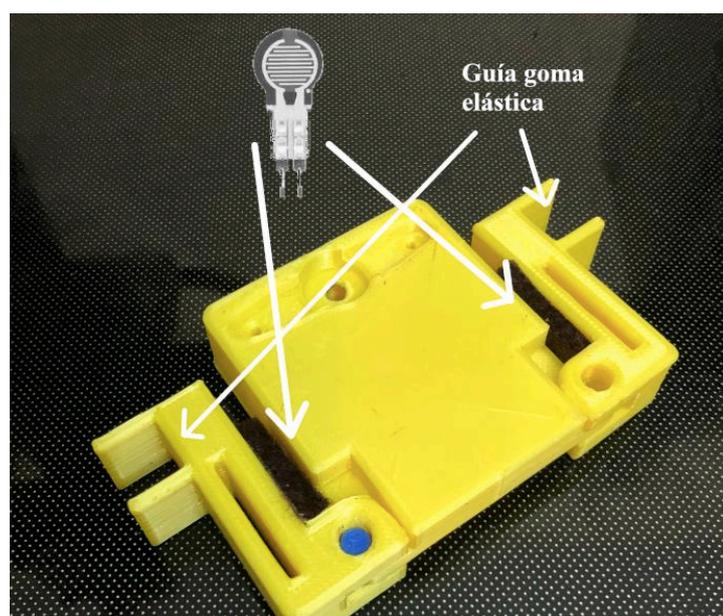


Figura 49 Prueba soporte de mano con disminución de carga (Fuente: elaboración propia)

### 7.3.2. PROBLEMAS Y ERRORES

- **Falsos positivos al abrir y cerrar la mano**, esto ocurría en la prueba 1 como un objetivo del exoesqueleto es que permita la manipulación de objetos, este sistema no es válido.
- **La correa no transmite la fuerza suficiente**, en el lado izquierdo la transmisión de fuerza de la correa no era suficiente, en el otro lado, la presencia del dedo pulgar facilitaba esta acción.
- **Dificultad unión servo-mano**, mejorando esta unión el sistema funcionaría mejor, pero para no reducir la función de manipular de objetos no se encontró una alternativa.
- **Falta de fiabilidad**, el sistema funcionaba bien en el movimiento de abducción, pero en aducción no siempre se obtenía señal.

Se descarto este sistema debido a su poca fiabilidad.

### 7.4. PROTOTIPO 4

Viendo que en la mano no se podían acoplar los sensores se probó a colocarlos en el soporte del brazo. Se colocaron como se puede ver en la “Figura 50”.

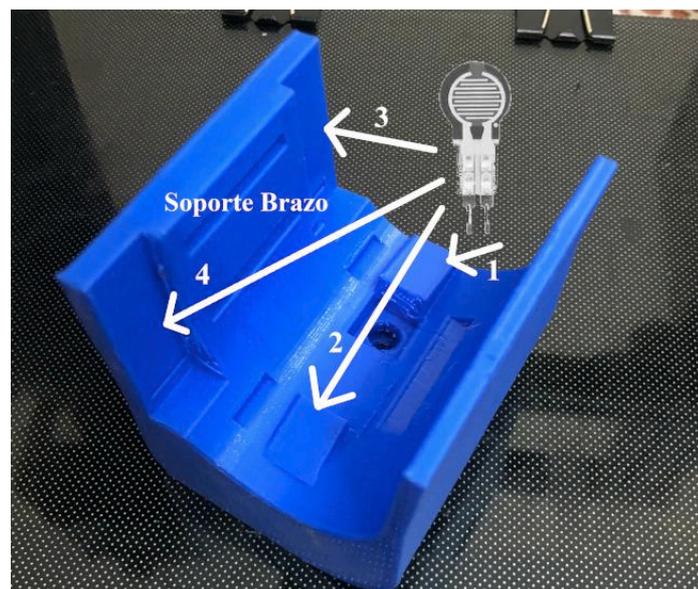


Figura 50 Colocación de sensores en el soporte del brazo (Fuente: elaboración propia)

### **7.4.1. FUNCIONAMIENTO**

Al intentar mover la mano el dispositivo oponía resistencia y se ejercía una fuerza en el soporte del antebrazo, dependiendo del movimiento que se quisiera realizar, esta fuerza se aplicaba en un lugar u otro del soporte del antebrazo.

El sistema funcionaba.

### **7.4.2. PROBLEMAS Y ERRORES**

- **Falsos positivos al mover el brazo**, si el brazo estaba en una posición fija funcionaba el sistema, pero al mínimo movimiento de inclinación del brazo accionaba los sensores. Este sistema podría funcionar con un acelerómetro de 3 Ejes. Se descarto esta opción buscando una solución con el material disponible en ese momento.

## 8. PROTOTIPO FINAL

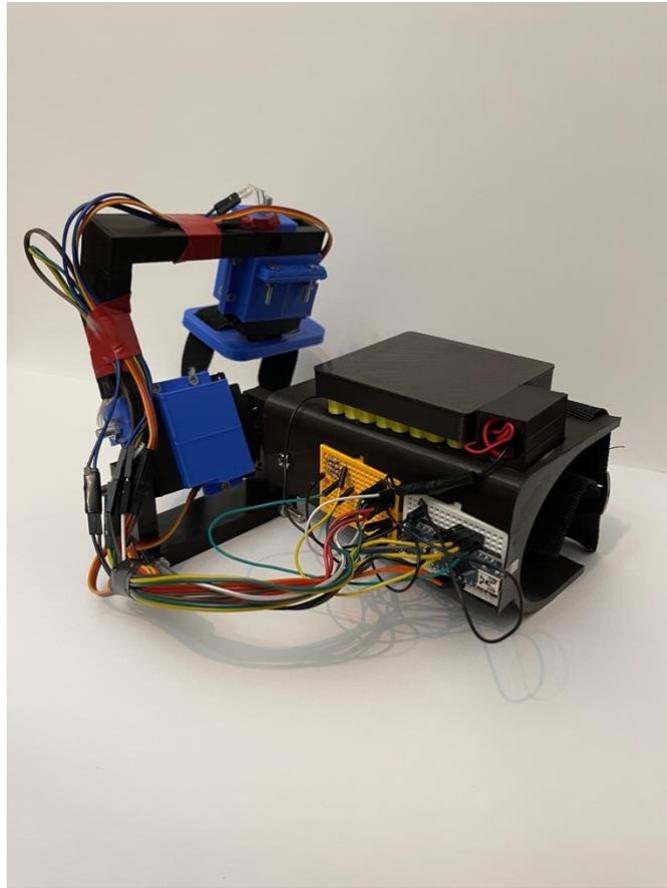


Figura 51 Prototipo final construido (Fuente: elaboración propia)

Debido a los problemas encontrados en los prototipos anteriores, se cambió la ubicación de los sensores al codo de unión de los servomotores. Su funcionamiento consiste en que, al realizar un pequeño giro de la mano, el servomotor gira entorno al eje de su unión con el codo, y se ejerce una presión. Con este sistema se distinguen bien los diferentes movimientos que debe realizar el exoesqueleto por lo tanto es válido y se desarrolló.

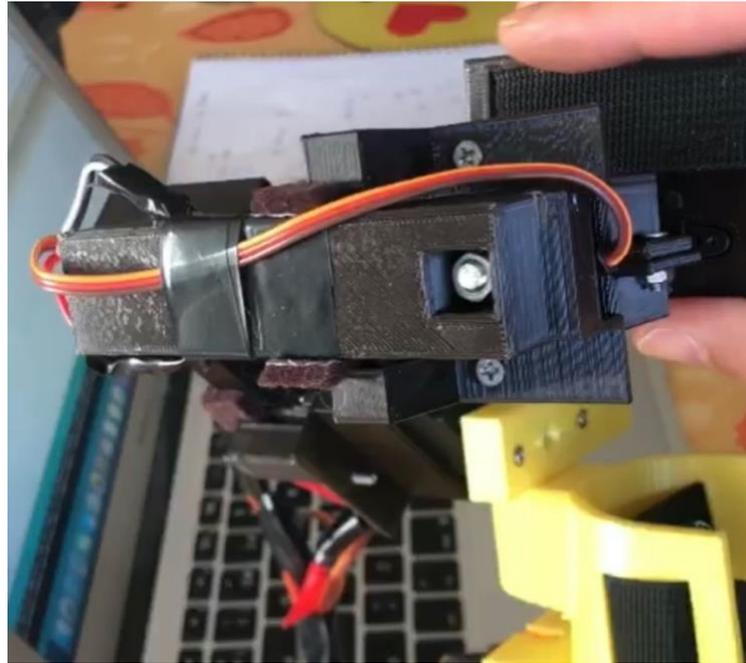


Figura 52 Ubicación inicial de los sensores en el prototipo final (Fuente: elaboración propia)

En la “Figura 52” se muestra el primer diseño de este tipo, fue simple para comprobar el funcionamiento de los sensores. El tope que ejercía la presión en los sensores se encontraba en la carcasa de los servomotores funcionaba bien, pero el diseño era muy aparatoso. Por ello se cambió la ubicación de los sensores de la parte exterior del codo a la parte interior, para minimizar el material y el volumen ocupado, “Figura 53”.

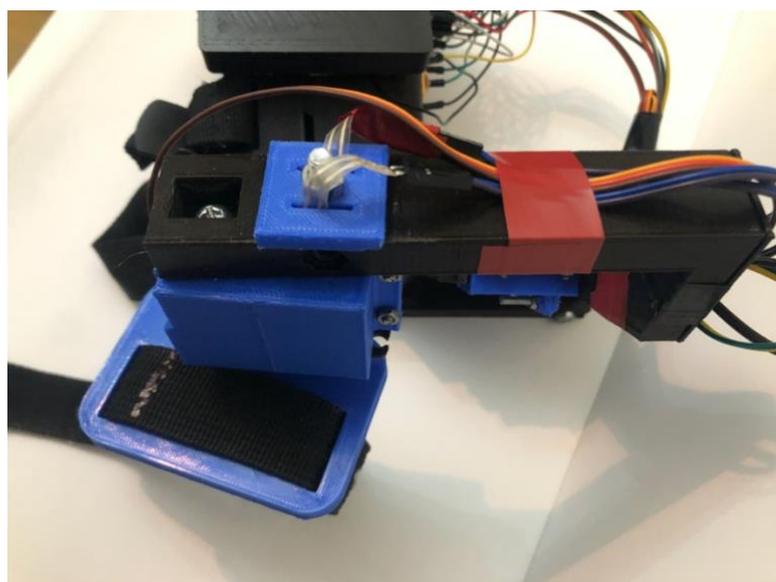


Figura 53 Ubicación de los sensores en el prototipo final (Fuente: elaboración propia)



Sus principales características son (Amazon, s.f.):

- Dimensiones: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm
- Peso: 55 gramos
- Alimentación: 4.8 a 6V
- Corriente máxima: 1200mA
- Velocidad 6V:0.16s/60, 4,8V:0.2s/60
- torque 6V: 10 kgf.cm, 4.8V: 8,5 kgf.cm
- Piñones interiores metálicos
- Precio: 13,69€

## 8.2. DISEÑO MECÁNICO

En la “Figura 55” se muestra el diseño del conjunto del prototipo, y en la “Figura 56” su construcción. Una buena calibración de una impresora 3D no es una tarea sencilla, sobre todo cuando existen partes de la pieza sin soporte, la impresora con la que se han fabricado las piezas es de uso personal y se ha tenido en cuenta este aspecto a la hora de diseñar las piezas.

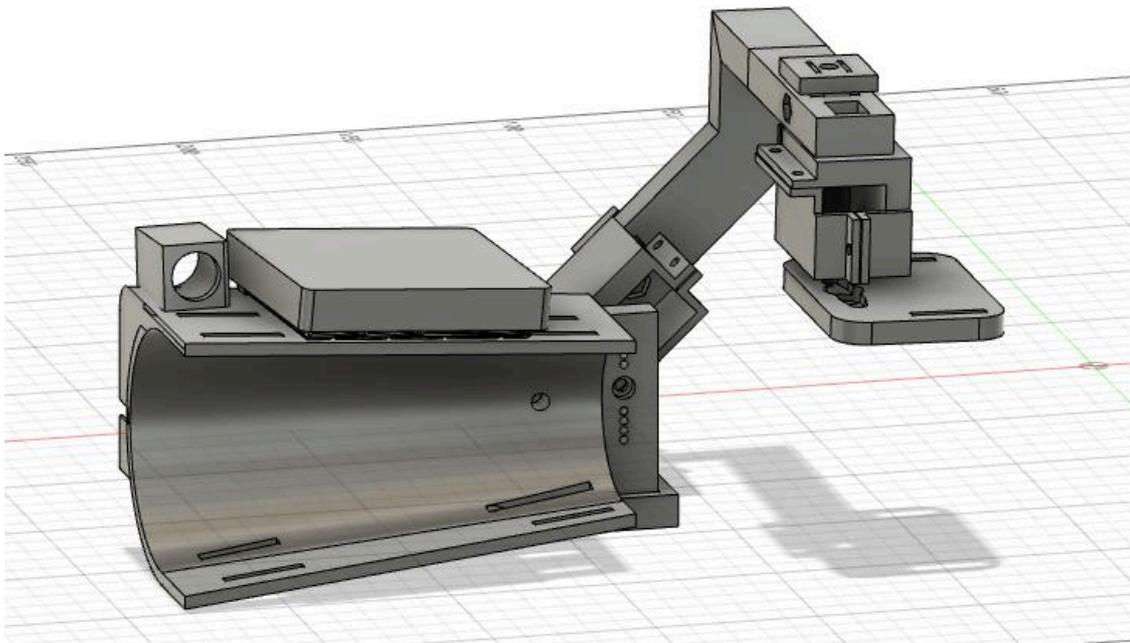


Figura 55 Diseño conjunto del prototipo. (Fuente: elaboración propia)

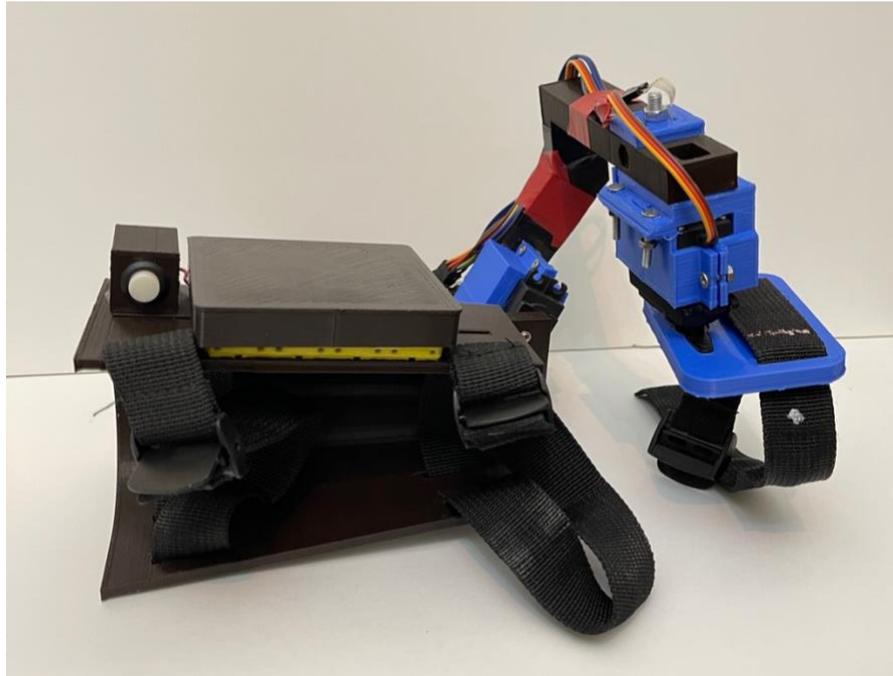


Figura 56 Imagen prototipo final construido (Fuente: elaboración propia)

En la “Tabla 8” se recogen las piezas, con su nombre correspondiente y sus uniones.

Tabla 8 Piezas prototipo y uniones (Fuente: elaboración propia)

Pieza	Nombre	Cantidad	Unión
1	Soporte antebrazo	1	Antebrazo
			Pieza 2
2	Unión soporte-servo antebrazo	1	Pieza 1
			Servo antebrazo
			Pieza 4
			Pieza 6
3	Unión mano – servo mano	1	Mano
			Pieza 4
4	Carcasa servos	2	Servos
			Pieza 5
			Pieza 6
5	Soporte sensores	2	Pieza 4
			Pieza 6
6	Codo unión servos	1	2 piezas 4
			2 piezas 5

### 8.2.1. PIEZA 1, SOPORTE ANTEBRAZO

Según el boceto del apartado 6.4.1 se diseñó esta pieza, y con una longitud de 0,140m. Es la base sobre la que va a trabajar el exoesqueleto. En la “Figura 57” y en la “Figura 58” se observa el diseño final y las ubicaciones de las correas para la sujeción en el antebrazo, el interruptor, las baterías y las protoboards.

Un apartado importante es el acople con el servomotor del antebrazo, este se realizó para unir la pieza “unión soporte servomotor antebrazo”, esta unión se realizó mediante un tornillo “M5 20mm”, lo más conveniente es que fueran una sola pieza, pero al tratarse un punto frágil del exoesqueleto, con el tornillo se refuerza, y si se produce una rotura solo habría que sustituir la pieza de unión y no todo el soporte donde se encuentra el montaje realizado. Otra razón para su separación es que la impresión de la unión con el brazo del servomotor con esta orientación no sería la más adecuada.

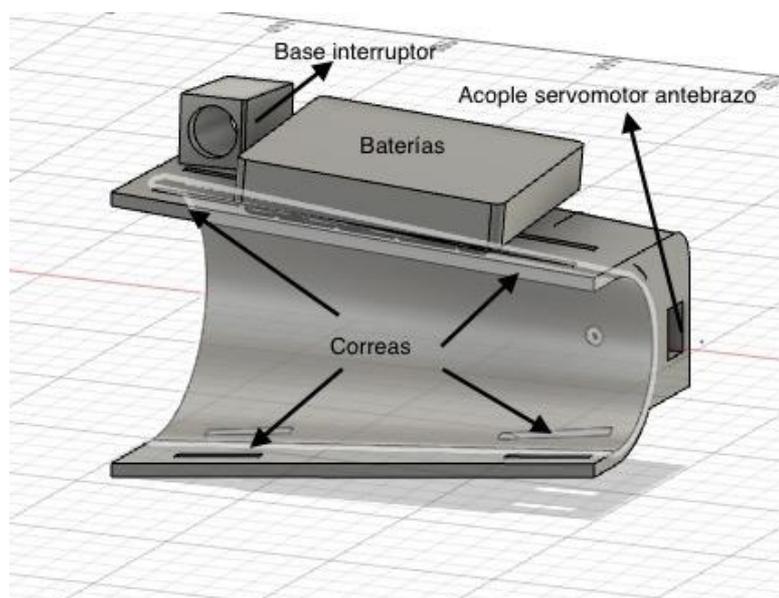


Figura 57 Vista 1, Diseño y partes de la pieza 1, soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia)

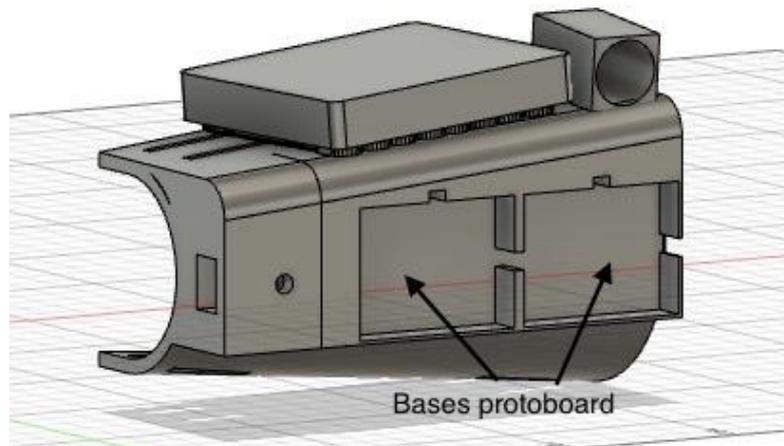


Figura 58 Vista 2 Diseño y partes de la pieza 1, soporte antebrazo (Fuente: elaboración propia)

### 8.2.2. PIEZA 2 UNIÓN SOPORTE-SERVO ANTEBRAZO

En la “Figura 59” se muestra el diseño de esta pieza. Su función es unir el servomotor del antebrazo con el soporte del antebrazo. Se ha dimensionado en base a la altura y el largo del servomotor MG995. En ella se encuentra el acople con el soporte del antebrazo visto en el apartado anterior, la unión del brazo del servomotor que se une con los tornillos incluidos en este y el soporte del servomotor para proporcionar una mayor estabilidad. Para garantizar la dureza se incorporan 2 tornillos.

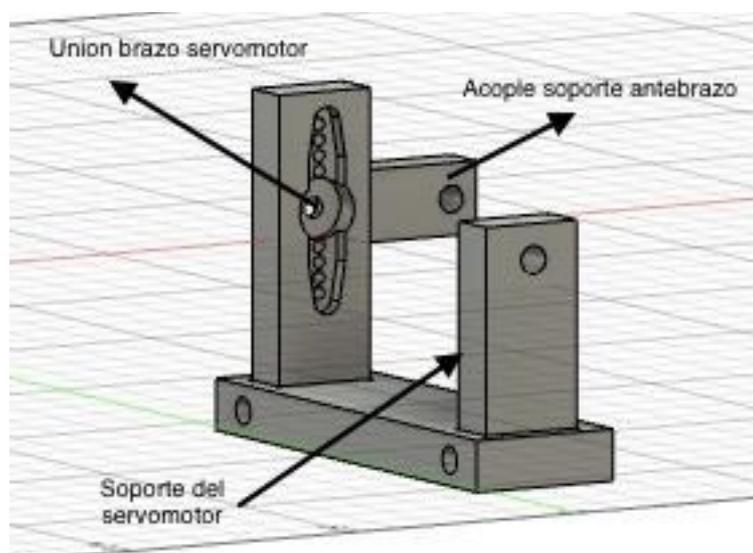


Figura 59 Diseño pieza 2, unión soporte-servo antebrazo (Fuente: elaboración propia)

### 8.2.3. UNIÓN MANO-EXOESQUELETO

En la “Figura 60” se muestra el diseño de la pieza 3, encargada de unir la mano que es la que debe realizar los movimientos y el servomotor ubicado en esta. Sus dimensiones son de 0,075m de ancho y 0,053m de largo. En ella se encuentran los espacios para la correa y el acople del brazo del servomotor.

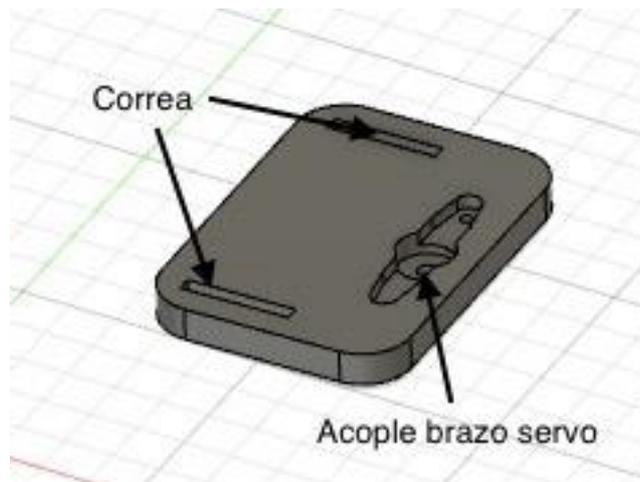


Figura 60 Diseño pieza que une la mano con el exoesqueleto (Fuente: elaboración propia)

### 8.2.4. CARCASA SERVOMOTORES

Se divide en dos piezas, que están unidas mediante 5 tornillos y tuercas “M3 8mm”, su unión realiza la función de sustentar a los servomotores. En la “Figura 61” se observan como se realiza la unión con el codo mediante un tornillo y una tuerca “M5 15mm” y con el soporte de los sensores mediante un tornillo y una tuerca “M5 30mm”.

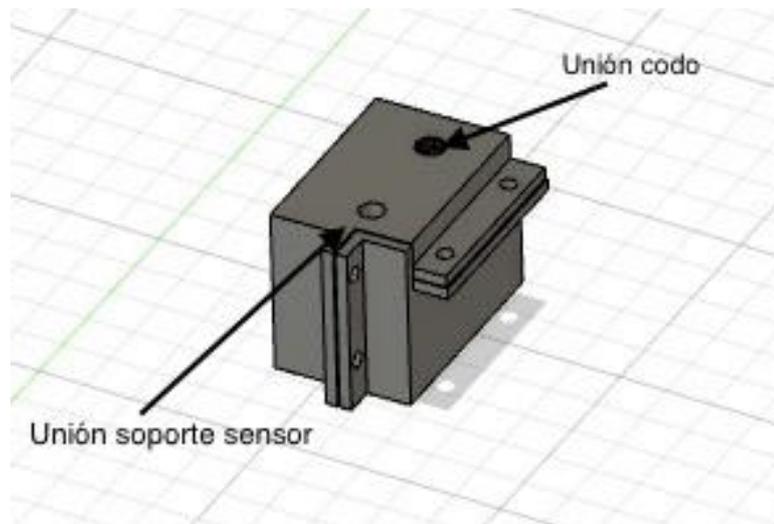


Figura 61 Diseño completo pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia)

En la “Figura 62” se observa la parte 1, y en las “Figura 63 y 64” se observa la parte 2. Esta última contiene unos vaciados en su parte inferior para una tuerca en el punto de unión con la pieza 6 y un tornillo de cabeza hexagonal en el punto de unión de la pieza 5.

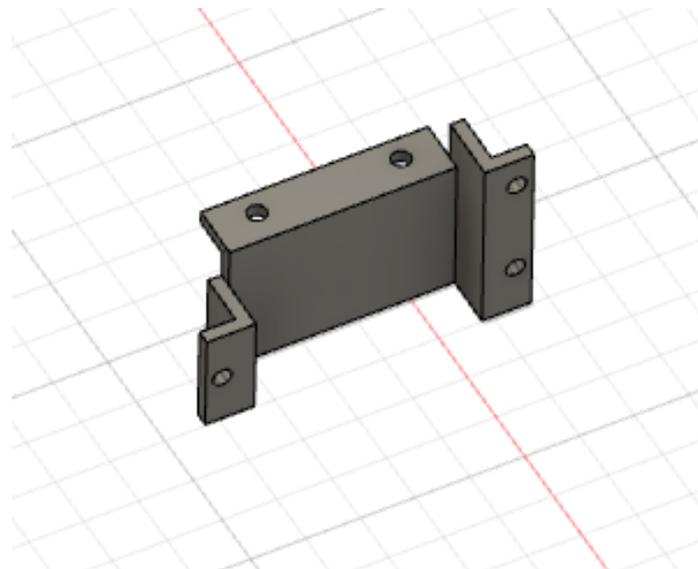


Figura 62 Parte 1 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia)

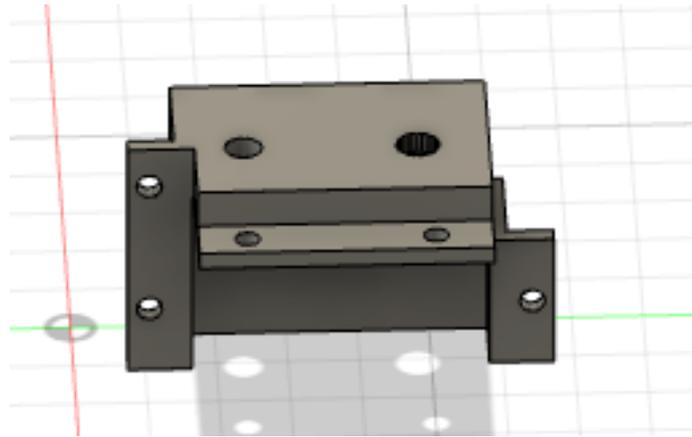


Figura 63 Vista superior de la parte 2 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia)

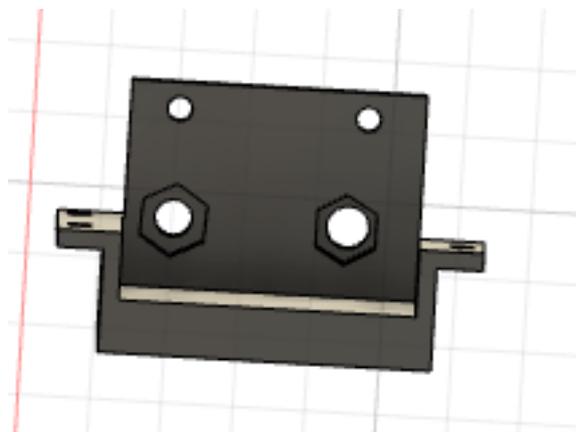


Figura 64 Vista inferior de la parte 2 diseño pieza 4, carcasa servomotores (Fuente: elaboración propia)

### 8.2.5. SOPORTE SENSORES

Estas piezas son donde se sitúan los sensores FSR, se ubica uno a cada lado en ambos soportes. Se han dimensionado en base a las medidas del sensor FSR elegido, un cuadrado de 0,01m. El ancho del soporte debe corresponderse con la pieza 6. El tope que incluye esta pieza sirve para que el servomotor se mantenga recto y conserve la posición adecuada.

En la “Figura 65“se observa el soporte del sensor de la mano.

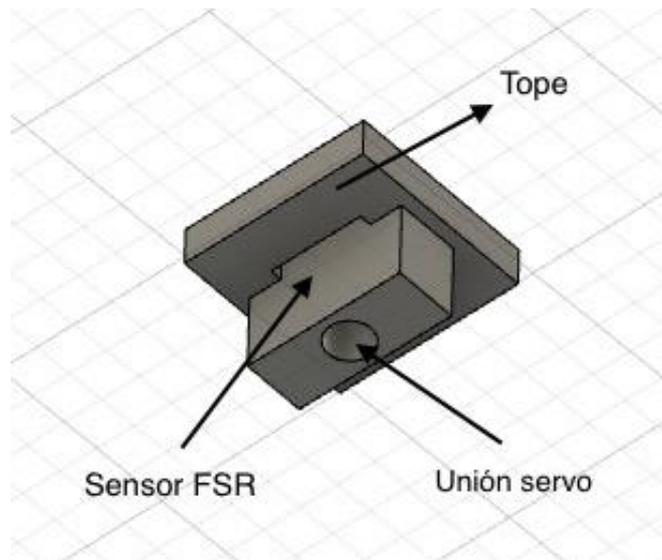


Figura 65 Diseño pieza 5, soporte de sensor mano (Fuente: elaboración propia)

En el caso del tope del soporte de los sensores del antebrazo “Figura 66” al haber un problema de colisión con el soporte del servomotor del antebrazo se redujeron sus dimensiones en un lado.

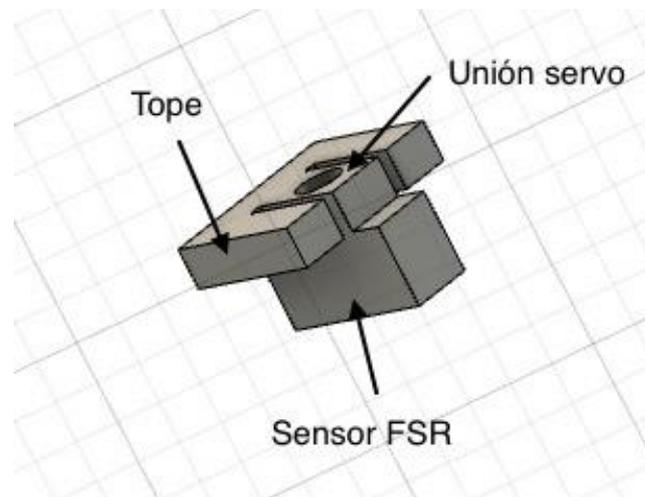


Figura 66 Diseño pieza 5, soporte de sensor antebrazo (Fuente: elaboración propia)

## 8.2.6. CODO UNIÓN SERVOMOTORES

Teniendo en cuenta los factores que se encuentran en el apartado 6.4.4. Se diseñó la pieza que se muestra en la “Figura 67”. Su función principal es unir los dos servomotores para transmitir el movimiento del servomotor del antebrazo a la mano y ser el soporte del

servomotor de la mano. En ella es donde se va a ejercer la fuerza a los sensores en los distintos movimientos.

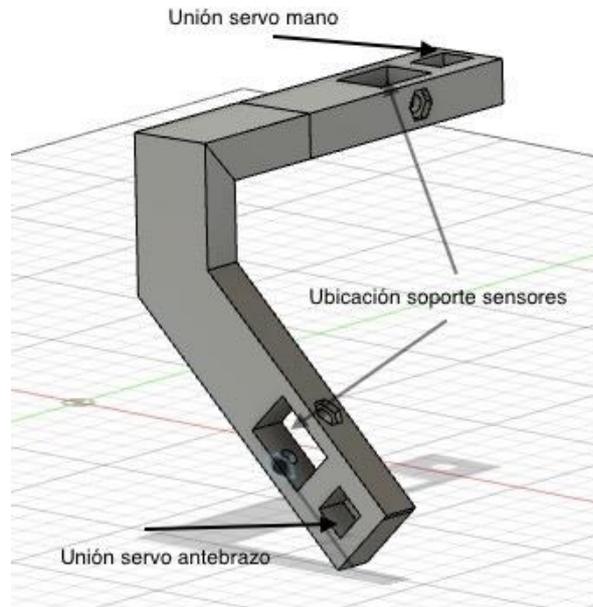


Figura 67 Diseño pieza 6, codo unión servomotores (Fuente: elaboración propia)

Para que la presión sea la adecuada, más precisa y sea más fácil el montaje del prototipo, se ha añadido un tornillo y una tuerca “M5 15mm” en el lateral de la ubicación de los sensores para ajustar el rango de movimiento de los soportes de los servomotores. En la “Figura 68” se muestra su ubicación.

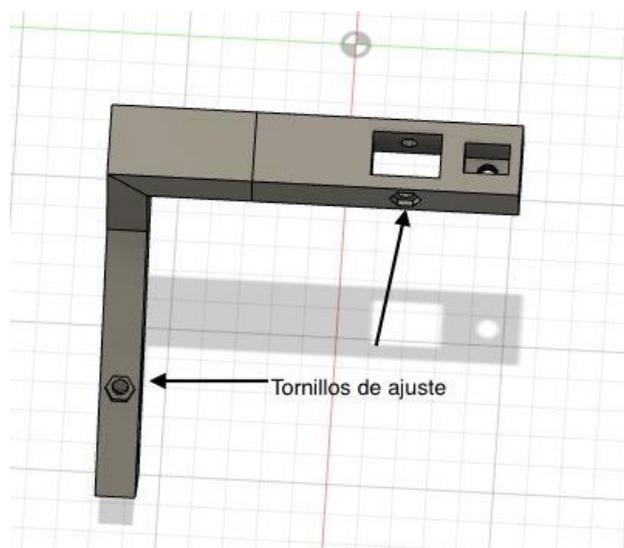


Figura 68 Diseño pieza 6, codo unión servomotores indicando tornillo de ajuste (Fuente: elaboración propia)

### 8.3. MONTAJE ELECTRÓNICO

Los componentes utilizados en el prototipo son los siguientes:

- 1 interruptor
- 1 placa de pruebas PCB (protoboard)
- 4 sensores resistivos de fuerza *FSR*
- 4 resistencias 1K  $\Omega$
- 2 servomotores MG995
- 1 placa base Arduino nano
- 1 batería de 6V formada por 4 pilas 1,5 V conectadas en serie

En la “Figura 69” se muestra el montaje electrónico del prototipo. En el dibujo aparece una placa Arduino Uno, que posee las mismas conexiones que la placa utilizada Arduino Nano.

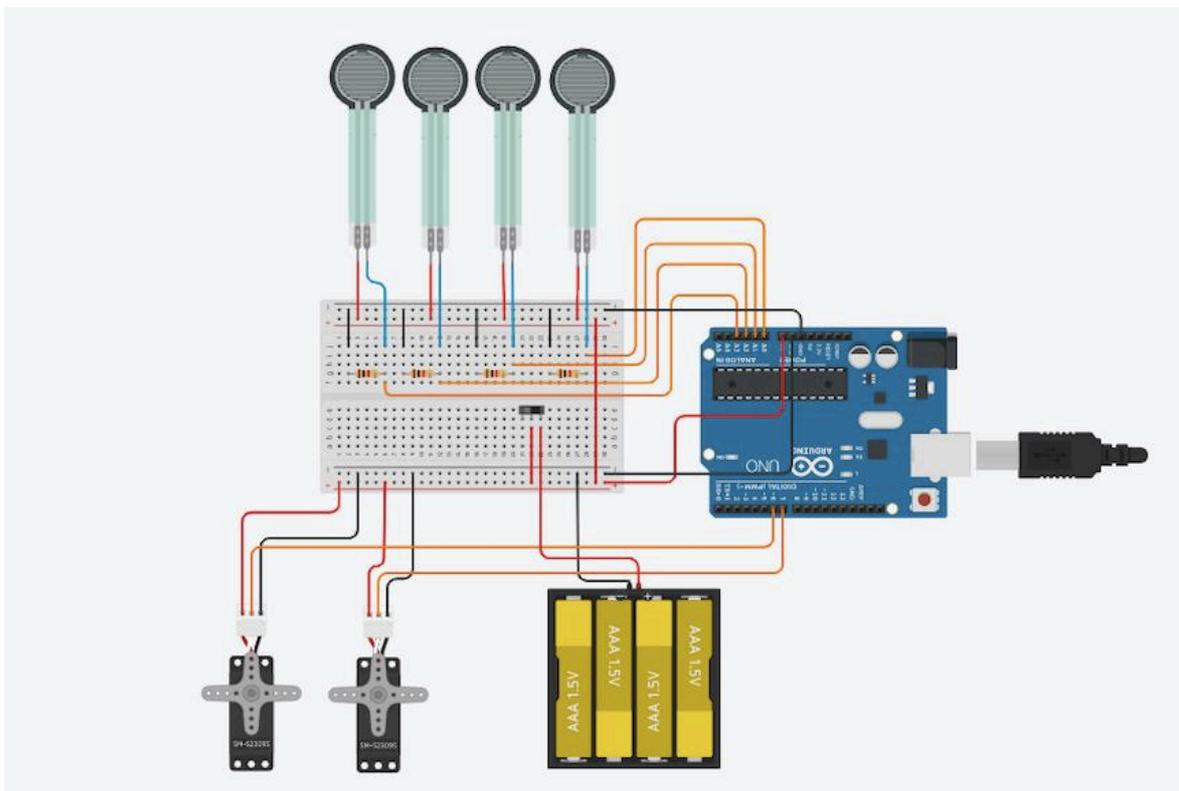


Figura 69 Montaje electrónico diseño final (Fuente: elaboración propia)

Las conexiones son las siguientes:

- El **pin positivo (+)** de la fuente de alimentación se conecta al **pin 1** del interruptor.
- El **pin negativo (-)** de la fuente de alimentación se conecta a la **línea de tierra** de la protoboard.
- El **pin 2** del interruptor se conecta a la **línea alimentación** de la protoboard.
- Los **pines VCC** de los servomotores se conectan a la **línea alimentación** de la protoboard.
- Los **pines GND** de los servomotores se conectan a la **línea de tierra** de la protoboard.
- El **pin Signal** del servomotor del antebrazo se conectan al **pin digital 7** de la placa.
- El **pin Signal** del servomotor de la mano se conectan al **pin digital 6** de la placa.
- El **pin 1** de cada sensor FSR se conecta a la **línea de alimentación** de la protoboard.
- El **pin 2** del sensor bajar se conecta a el **pin analógico A0** de la placa y al **pin 1** de una resistencia.
- El **pin 2** del sensor subir se conecta a el **pin analógico A1** de la placa y al **pin 1** de una resistencia.
- El **pin 2** del sensor derecha se conecta a el **pin analógico A2** de la placa y al **pin 1** de una resistencia.
- El **pin 2** del sensor izquierda se conecta a el **pin analógico A0** de la placa y al **pin 1** de una resistencia.
- Los **pines 2** de las resistencias se conectan al **pin GND** de la placa.
- El **pin VIN** de la placa se conecta a la **línea de alimentación** de la protoboard.
- El **pin GND** de la placa se conecta la **línea de tierra** de la protoboard.

En la “Figura 70” se representa el esquema eléctrico del montaje electrónico del prototipo.

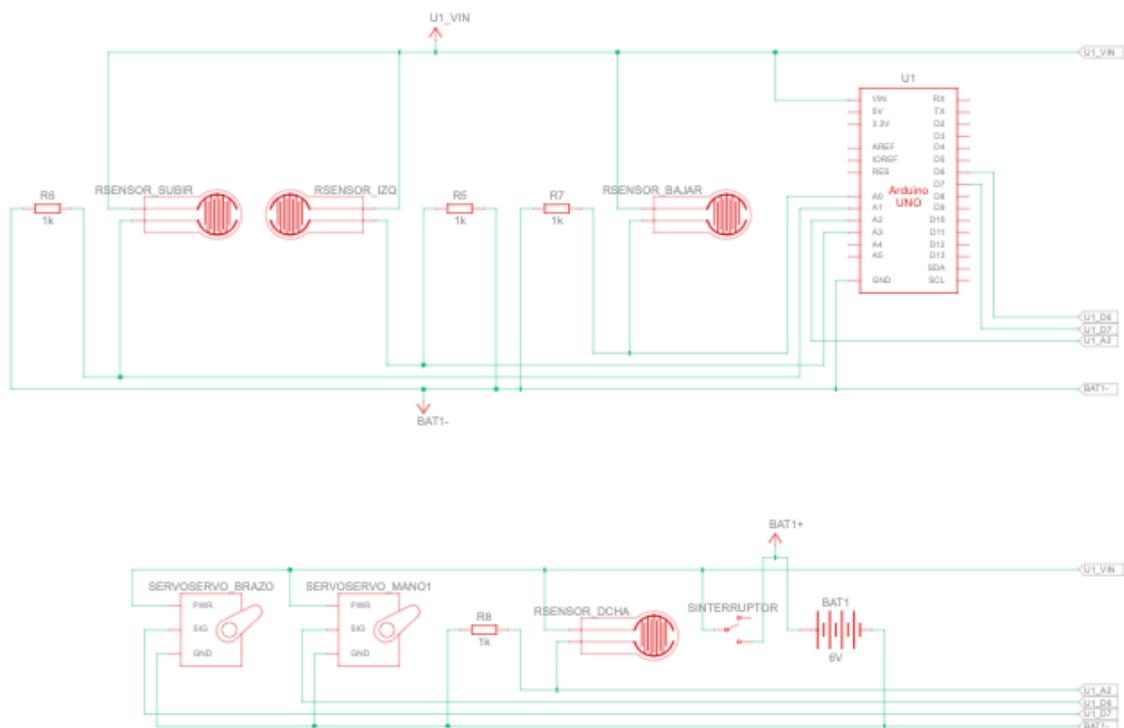


Figura 70 Esquema eléctrico del montaje electrónico del prototipo (Fuente: elaboración propia)

## 8.4. PROGRAMACIÓN

El lenguaje utilizado para la programación es el de Arduino. Se han elaborado 3 programas para realizar un análisis de la señal obtenida, otro para calibrar el prototipo y el final para procesar las señales.

Para ello se ha utilizado la librería “Servo” incluida en Arduino para el control de los servomotores.

Para diferenciar la posición de los servomotores, la variable del ubicado en la mano se denomina “Ángulo” y la del ubicado en el antebrazo se denomina “Grados”.

### 8.4.1. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE LOS SENSORES Y SELECCIÓN DE ÁNGULOS DE LOS SERVOMOTORES

Para realizar el programa y obtener un adecuado funcionamiento se hicieron pruebas para ver la respuesta de los sensores ante la intención de movimiento. El método empleado fue

colocar el prototipo en sus distintas combinaciones, ejecutar la intención de los distintos movimientos de la mano y observar las respuestas de los sensores ante estos.

Para ello se utilizó el programa “VerGráficas” que se encuentra en el Anexo B que mediante la comunicación serial de Arduino se obtienen las gráficas que indican las respuestas de los sensores en las distintas posiciones.

Para facilitar este proceso se creó el algoritmo que se puede ver en la “Figura 71”, en el cual mediante la comunicación serial se introducen manualmente los ángulos deseados para cada servomotor.

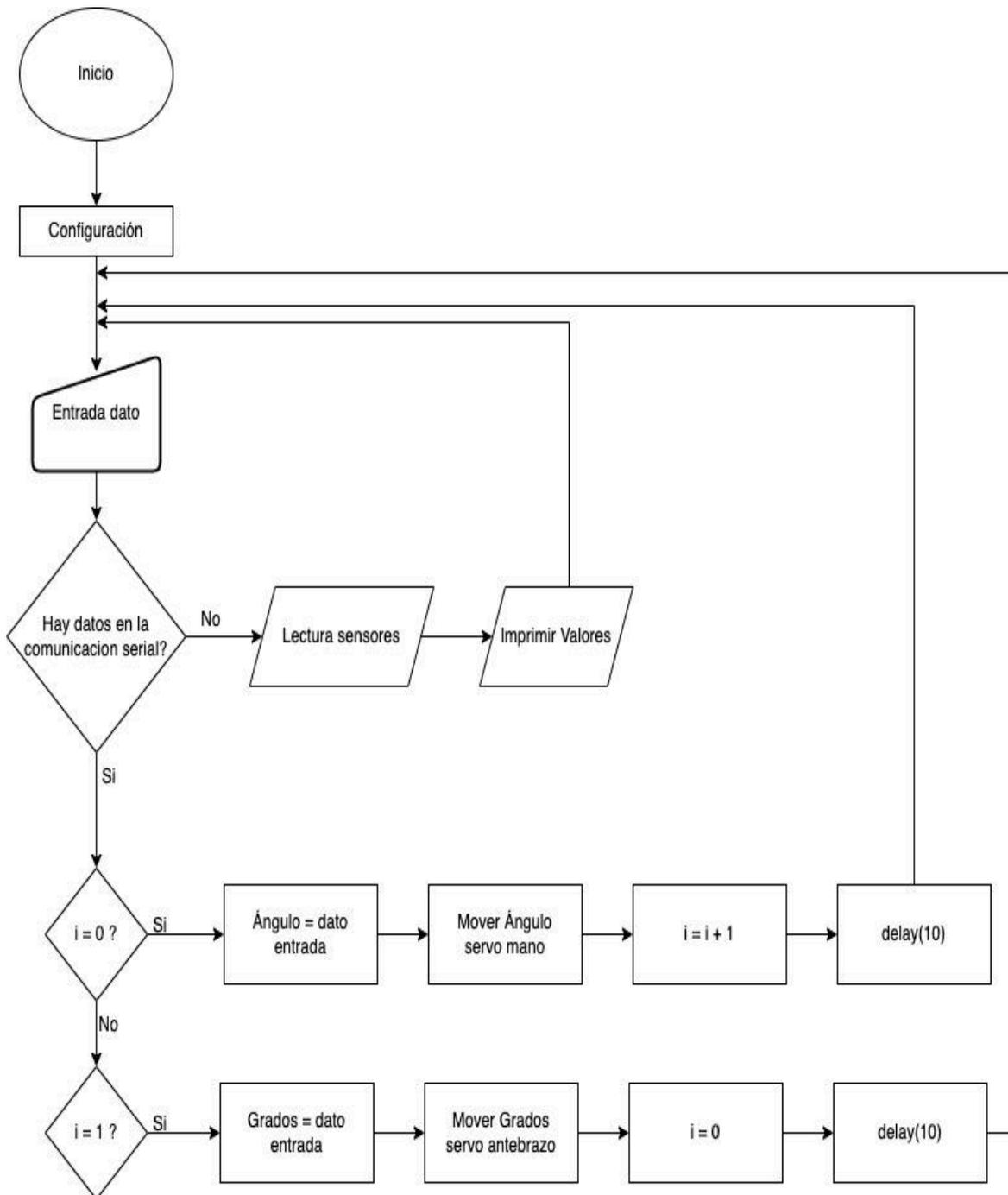


Figura 71 Algoritmo para el análisis de las señales en las distintas posiciones (Fuente: elaboración propia)

En los siguientes apartados se revisa cada caso y los resultados obtenidos en cada uno.

### 8.4.1.1 ANGULO 90° - GRADOS 90°

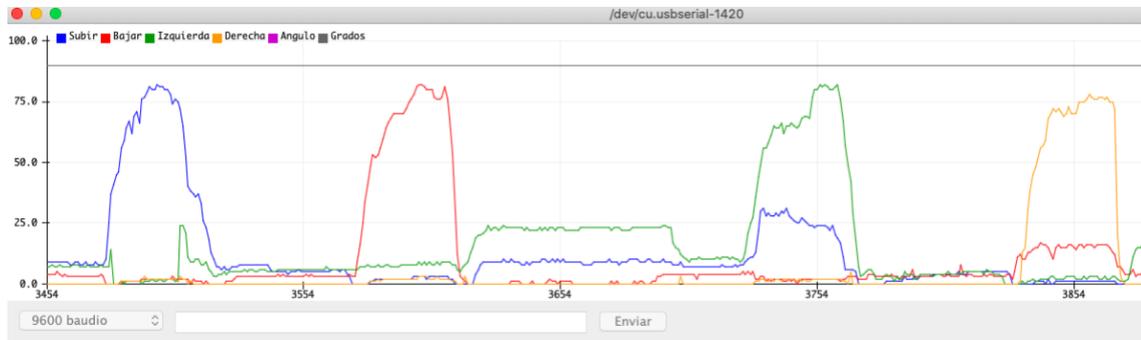


Figura 72 Gráfica respuesta sensores posición Ángulo 90° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 90°
- Grados: 90°
- Posición neutral
- Movimientos de extensión, flexión, abducción y aducción en ese mismo orden

La respuesta de los sensores está muy diferenciada para cada movimiento, por lo tanto, el resultado es satisfactorio al distinguir con claridad las distintas intenciones de movimiento.

### 8.4.1.2 ÁNGULO 90° - GRADOS 20°

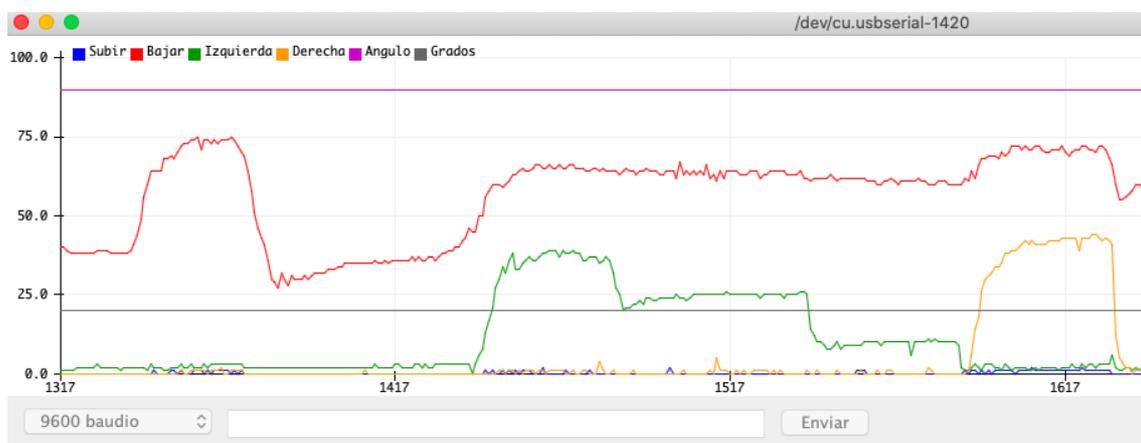


Figura 73 Gráfica respuesta sensores Ángulo 90° - Grados 20° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 90°
- Grados: 20°
- Posición extensión
- Movimientos de flexión, abducción y aducción en ese mismo orden

No se completa el rango completo de 85ª sino de 70° debido a una mejor respuesta de los servomotores y para así evitar forzar en exceso la articulación de la muñeca y al propio exoesqueleto.

La respuesta de los sensores es válida, ya que se obtiene diferentes respuestas para cada movimiento, sin embargo, se puede observar que para los movimientos de abducción y aducción también obtenemos una respuesta en el movimiento de extensión debido que al realizar estos movimientos la mano tiende a bajar para realizarlos. En la programación hay que tener en cuenta este detalle para evitar conflictos.

### 8.4.1.3 **ÁNGULO 90° - GRADOS 160ª**

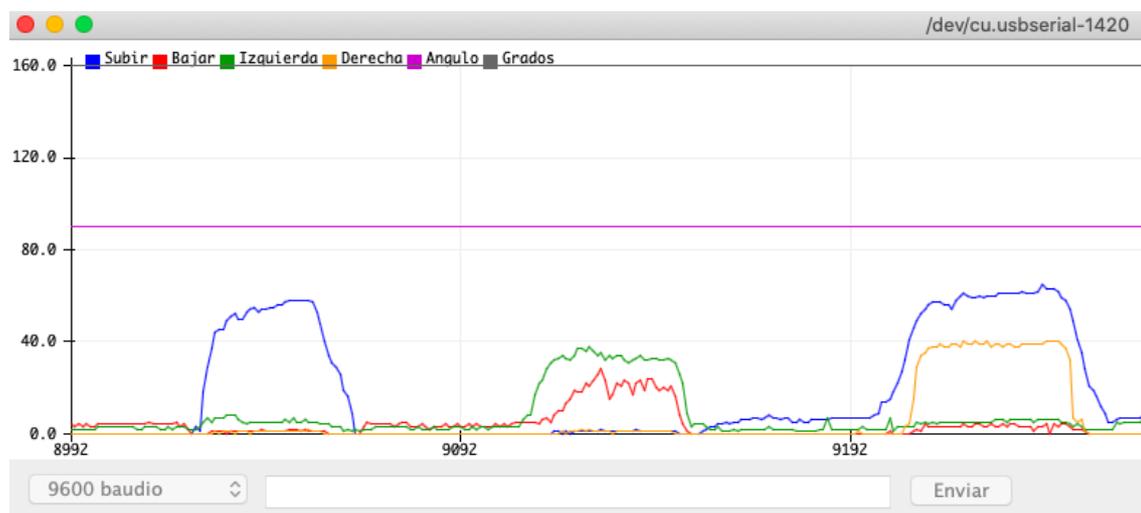


Figura 74 Gráfica respuesta sensores Ángulo 90° - Grados 160ª (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 90°
- Grados: 160ª
- Posición flexión
- Movimientos de extensión, abducción y aducción en ese mismo orden

Como en el caso anterior no se completa el rango completo, la respuesta es válida y hay combinación de entradas en los sensores para tener en cuenta en la programación.

### 8.4.1.4      **ÁNGULO 30° - GRADOS 90<sup>a</sup>**

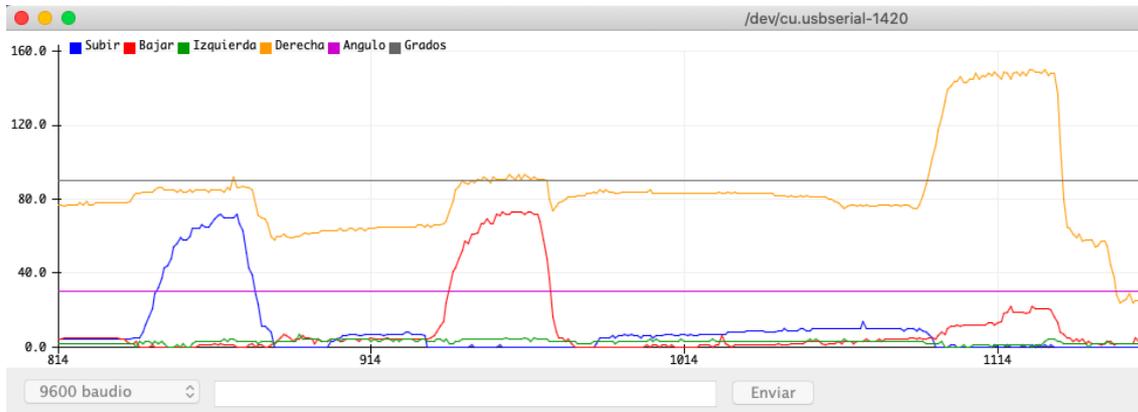


Figura 75 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 30°
- Grados: 90°
- Posición abducción
- Movimientos de extensión, flexión y aducción en ese mismo orden

El rango de movimiento es 60°, en vez de 30°, esto es debido a la pérdida de movimiento en la correa. que une el servomotor y la mano. La respuesta obtenida es satisfactoria, al diferenciarse con claridad las distintas intenciones de movimiento.

### 8.4.1.5      **ÁNGULO 140° - GRADOS 90<sup>a</sup>**

- Ángulo: 140°
- Grados: 90°
- Posición aducción
- Movimientos de extensión, flexión y abducción en ese mismo orden

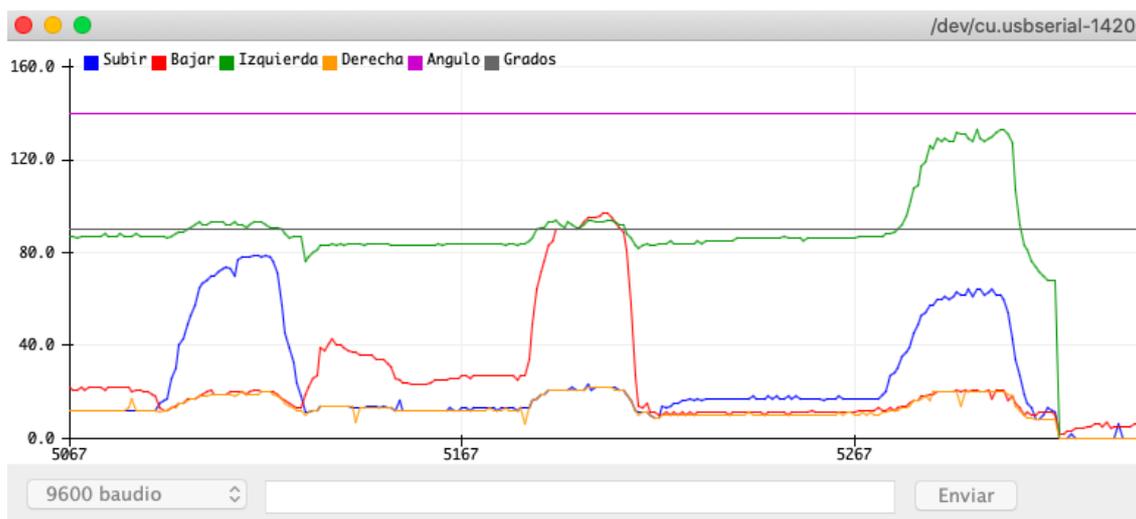


Figura 76 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 90° (Fuente: elaboración propia)

Como en el caso anterior el rango de movimiento varía, en este caso, de 50° a 15°. La respuesta obtenida es válida, pero observamos como en casos anteriores que obtenemos una respuesta similar en un sensor para diferentes movimientos.

#### 8.4.1.6 **ÁNGULO 30° - GRADOS 20<sup>a</sup>**

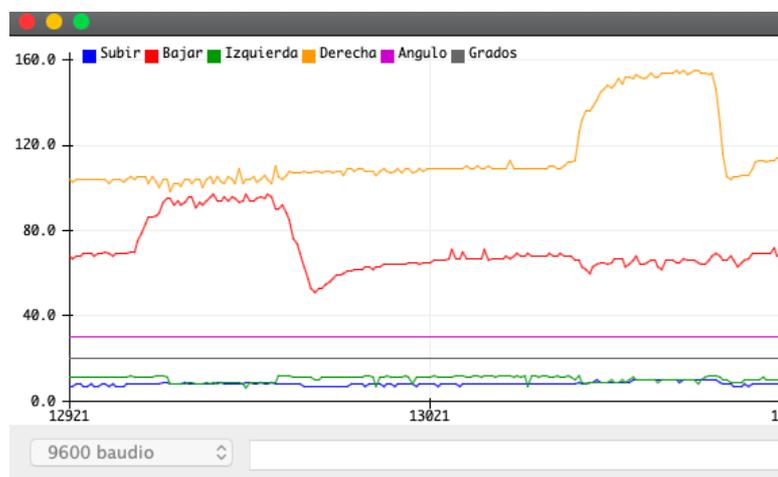


Figura 77 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 20° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 30°
- Grados: 20°
- Posición extensión/abducción
- Movimientos de flexión y aducción en ese mismo orden.

La respuesta obtenida es satisfactoria al obtenerse una respuesta diferenciada para los distintos movimientos.

#### 8.4.1.7 **ÁNGULO 30° - GRADOS 140<sup>a</sup>**

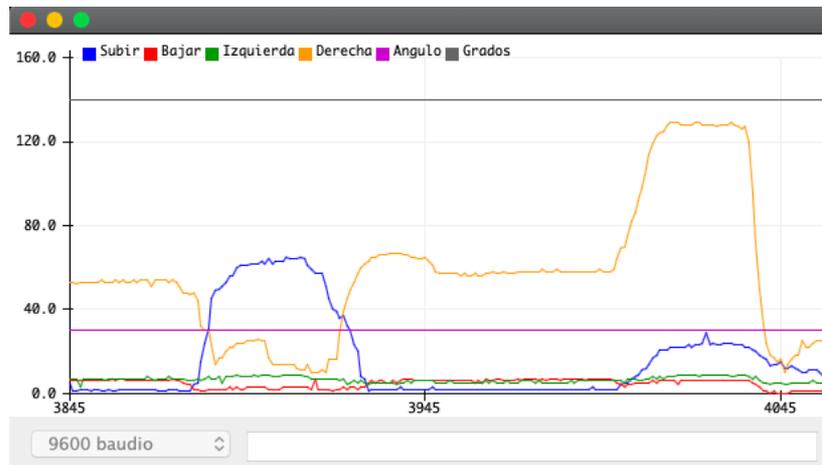


Figura 78 Gráfica respuesta sensores Ángulo 30° - Grados 140° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 30°
- Grados: 140°
- Posición flexión/abducción
- Movimientos de extensión y aducción en ese mismo orden.

En este caso como la mano en flexión total apenas puede realizar el movimiento de aducción, por ello para obtener una mejor respuesta del prototipo, se varía el ángulo del servomotor del antebrazo de 160° a 140°. La respuesta obtenida es satisfactoria al obtenerse una respuesta diferenciada para los distintos movimientos.

#### 8.4.1.8 **ÁNGULO 140° - GRADOS 30<sup>a</sup>**

- Ángulo: 140°
- Grados: 30°
- Posición extensión/ aducción
- Movimientos de flexión y abducción en ese mismo orden.

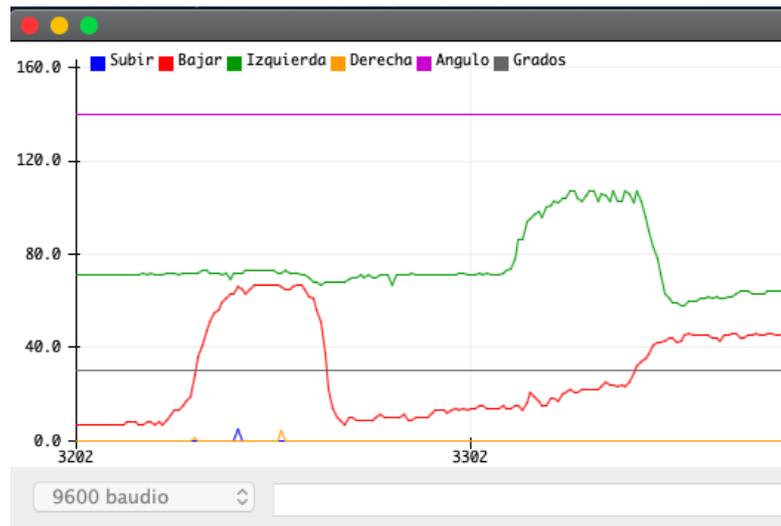


Figura 79 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 30° (Fuente: elaboración propia)

Como en el caso anterior varía el ángulo del servomotor del antebrazo de 20° a 30°. La respuesta obtenida es satisfactoria al obtenerse una respuesta diferenciada para los distintos movimientos.

#### 8.4.1.9 **ÁNGULO 140° - GRADOS 140ª**

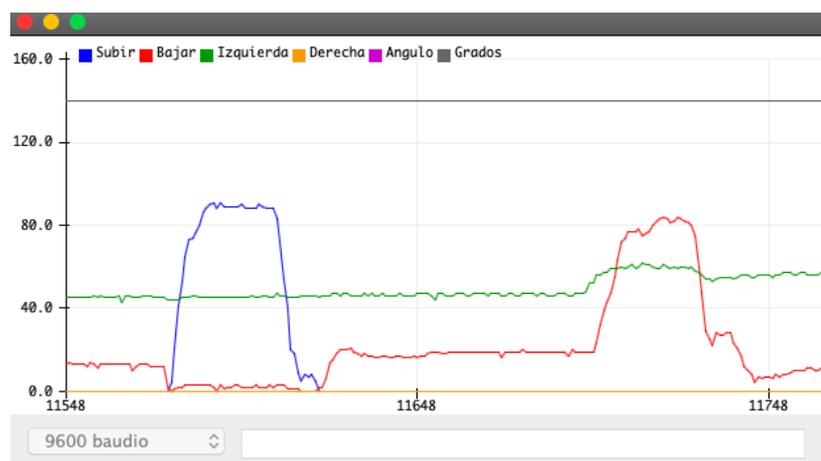


Figura 80 Gráfica respuesta sensores Ángulo 140° - Grados 140° (Fuente: elaboración propia)

- Ángulo: 140°
- Grados: 140°
- Posición flexión/aducción

- Movimientos de extensión y abducción en ese mismo orden.

Como en el caso anterior varía el ángulo del servomotor del antebrazo de 160° a 140°. La respuesta obtenida es válida, en este caso el sensor correspondiente al movimiento de abducción no obtiene cambios, pero se puede sustituir por el sensor de flexión debido a que este movimiento en esta posición no podría realizarse.

## **8.4.2. PROGRAMA PROCESAMIENTO SEÑALES**

En la señal recibida por los sensores, se puede observar un aumento y disminución de sus valores. Estos valores cambian de forma continua, dependen de muchos factores, por ejemplo, de la colocación del prototipo y de la fuerza con la que están apretadas las correas. Por este motivo, no se establecen unos valores fijos para activar el movimiento, sino que se detecta un cambio en ellos. En los siguientes apartados se explica cómo se ha realizado esta función.

### **8.4.2.1 FUNCIÓN MOVER**

La tarea más complicada que debe realizar el programa es ser capaz de detectar los cambios generados en la señal que producen los sensores. Para ello se creó el algoritmo con la función mover. Esta función recibe 10 valores obtenidos de cada sensor, los compara uno a uno y devuelve la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo. En la “Figura 81” se muestra el diagrama de flujo de este.

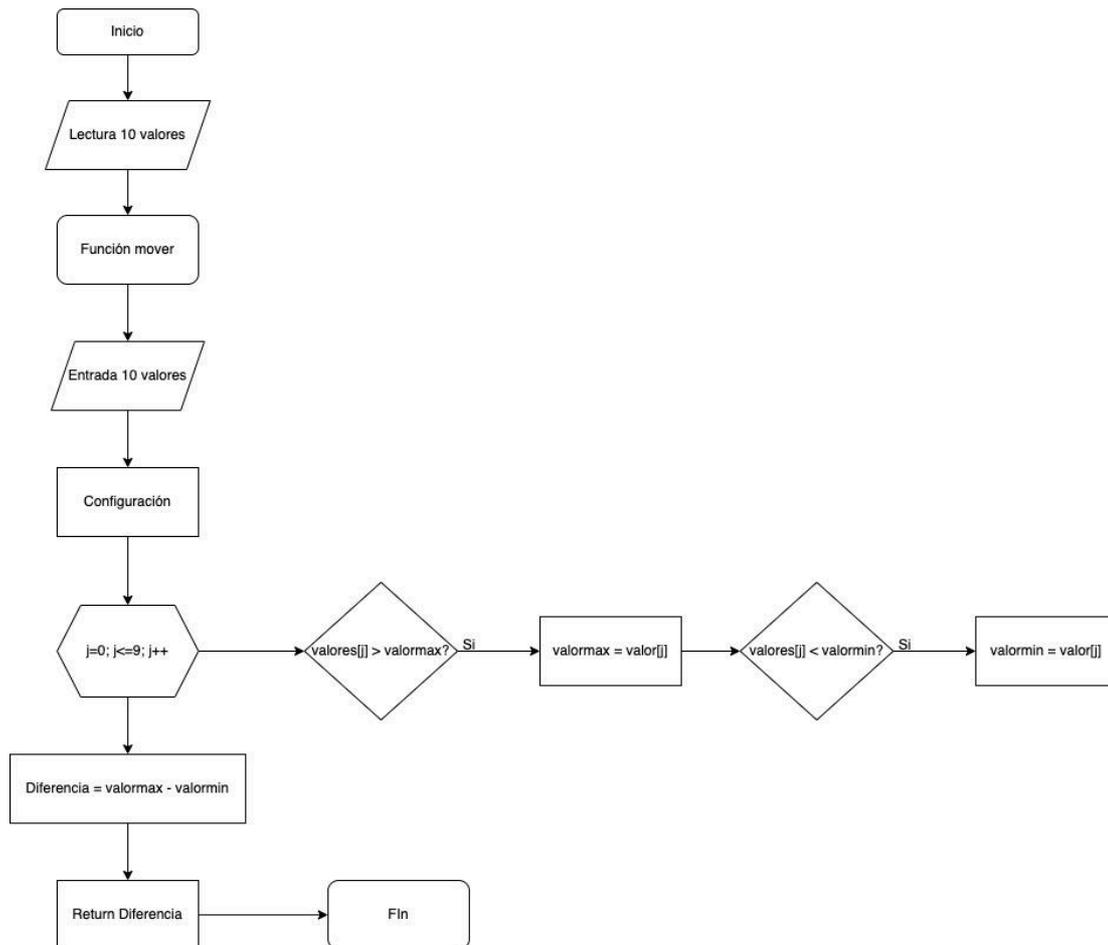


Figura 81 Diagrama de flujo algoritmo función mover (Fuente: elaboración propia)

### 8.4.2.2 PROGRAMA ESTABLECER RANGOS

Para detectar los cambios realizados por las señales, el funcionamiento consiste en comparar la variable diferencia que obtiene el algoritmo de la función mover, con un rango para detectar si la presión aplicada a los sensores es suficiente o no.

Estos rangos varían en función de la posición en la que se encuentra el prototipo y el movimiento a realizar. Para asignar estos rangos se creó el programa “BuscarRangos” que se encuentra el código detallado en el anexo B.

En la “Figura 82” se encuentra un diagrama de flujo cómo funciona algoritmo utilizado.

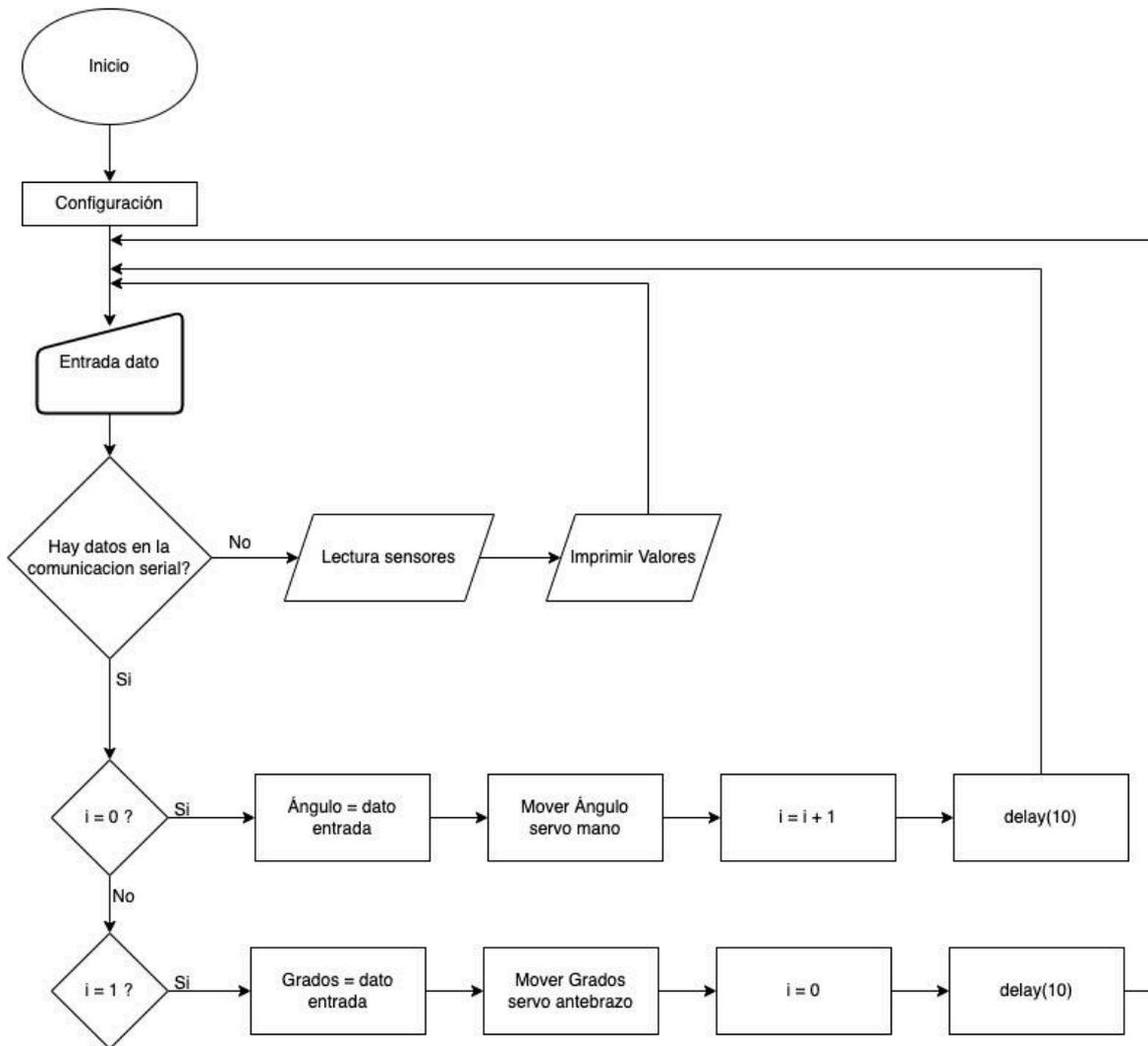
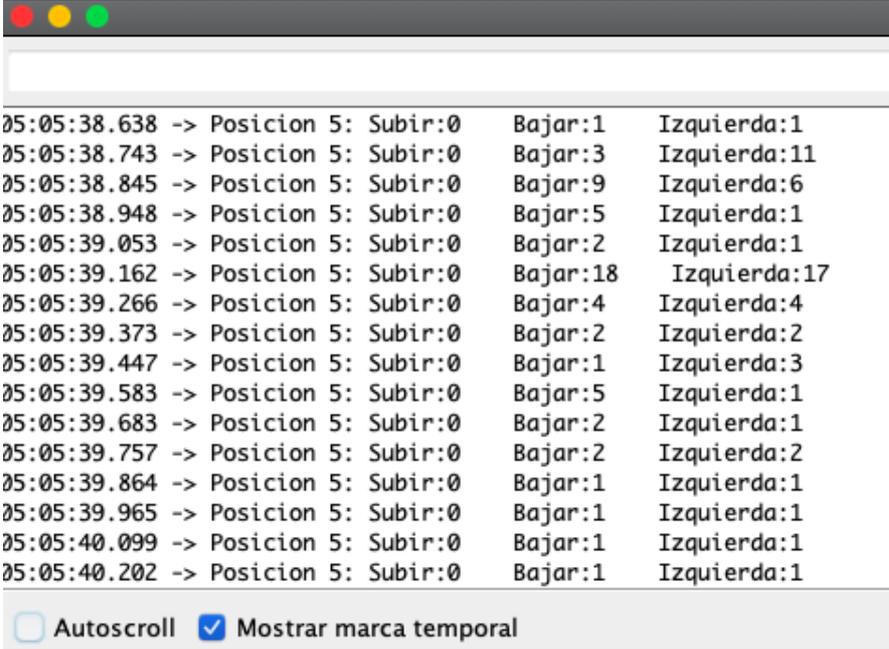


Figura 82 Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para la detección de intencionalidad (Fuente: elaboración propia)

En este programa mediante la comunicación serial de Arduino, se elige la posición a colocar el prototipo. Y como se ve en la “Figura 83” nos indica los valores de diferencia que se obtienen a partir de realizar la intención de movimiento.

Se han observado estos valores y a partir de ellos se ha establecido un rango para cada movimiento y posición.



```

05:05:38.638 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:1
05:05:38.743 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:3    Izquierda:11
05:05:38.845 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:9    Izquierda:6
05:05:38.948 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:5    Izquierda:1
05:05:39.053 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:2    Izquierda:1
05:05:39.162 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:18   Izquierda:17
05:05:39.266 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:4    Izquierda:4
05:05:39.373 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:2    Izquierda:2
05:05:39.447 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:3
05:05:39.583 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:5    Izquierda:1
05:05:39.683 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:2    Izquierda:1
05:05:39.757 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:2    Izquierda:2
05:05:39.864 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:1
05:05:39.965 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:1
05:05:40.099 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:1
05:05:40.202 -> Posicion 5: Subir:0    Bajar:1    Izquierda:1

```

Autoscroll  Mostrar marca temporal

Figura 83 Datos obtenidos mediante comunicación serial programa "BuscarRangos"  
(Fuente: elaboración propia)

### 8.4.2.3 PROGRAMA FINAL

A partir de los rangos obtenidos en el apartado anterior, se realiza el programa final encargado de ordenar a los servomotores ejecutar la intención del usuario portador. Utiliza la función mover como el apartado anterior, pero aparte de calcular la diferencia, la compara con el rango y ordena el movimiento de los servomotores.

En la “Figura 84” se observa el diagrama de flujo de cómo funciona el programa y en el Anexo B se encuentra completo explicado con detalle.

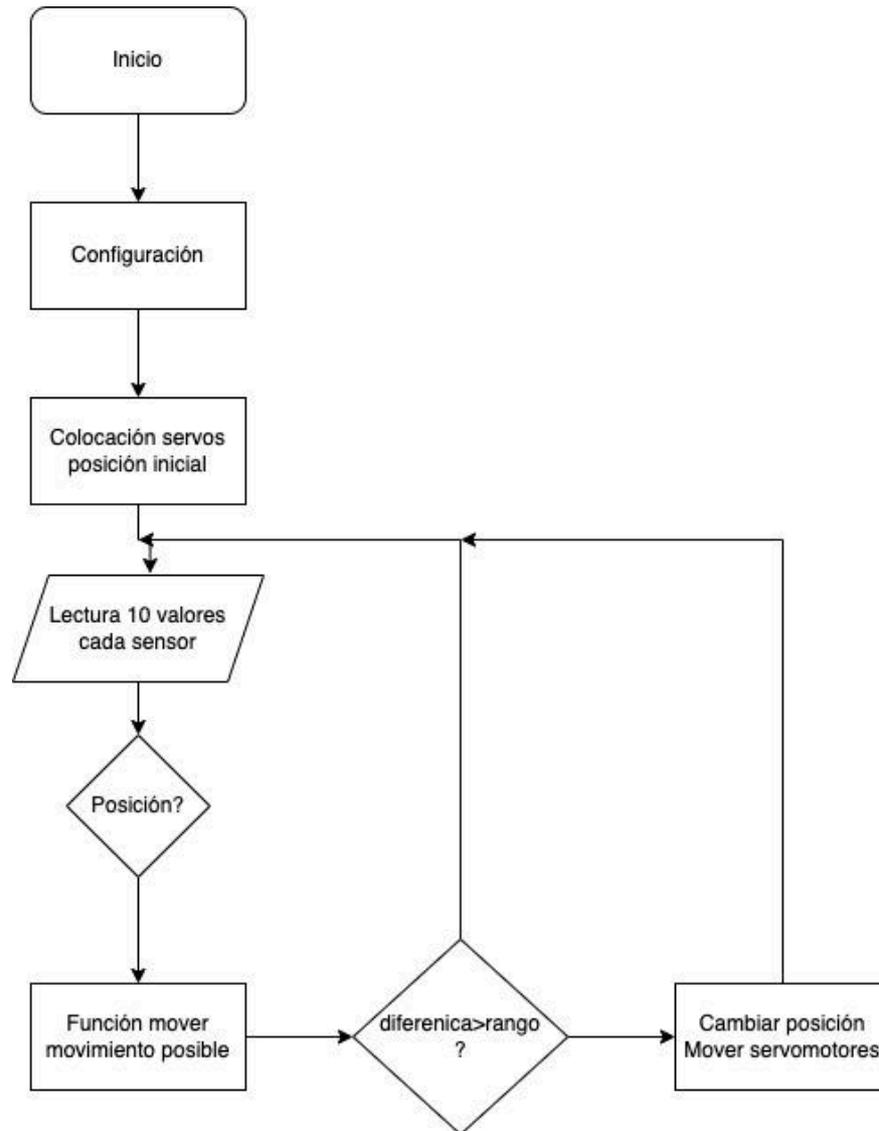


Figura 84 Diagrama de flujo del funcionamiento del programa final (Figura: elaboración propia)

## 9. PRESUPUESTOS

En la “Tabla 9” se recogen los presupuestos de los dos prototipos, siendo el diseñado la opción A y el construido la opción B.

Tabla 9 Presupuesto del prototipo diseñado y del prototipo construido (Fuente: elaboración propia)

Componentes	Cantidad		Precio unidad (€)		Precio Total (€)	
	A	B	A	B	A	B
Placa Arduino Nano	1		25,69		25,69	25,69
Servomotor Antebrazo	1		29,95	13,69	29,95	13,69
Servomotor Mano	1		17,50	13,69	17,50	13,69
Sensor FSR	4		7,87		31,48	31,48
Baterías	4		16,24	8,45	64,98	14,85
Resistencias 1k	4		0,25	0,25	1	1
Interruptor	1		0,80		0,80	0,80
Correas	3		2		6	6
Impresión 3D	142 m		30€		30€	30€
Tornillería	3		2		6	6
			Total		213,4	143,2

## 10. CRONOGRAMA

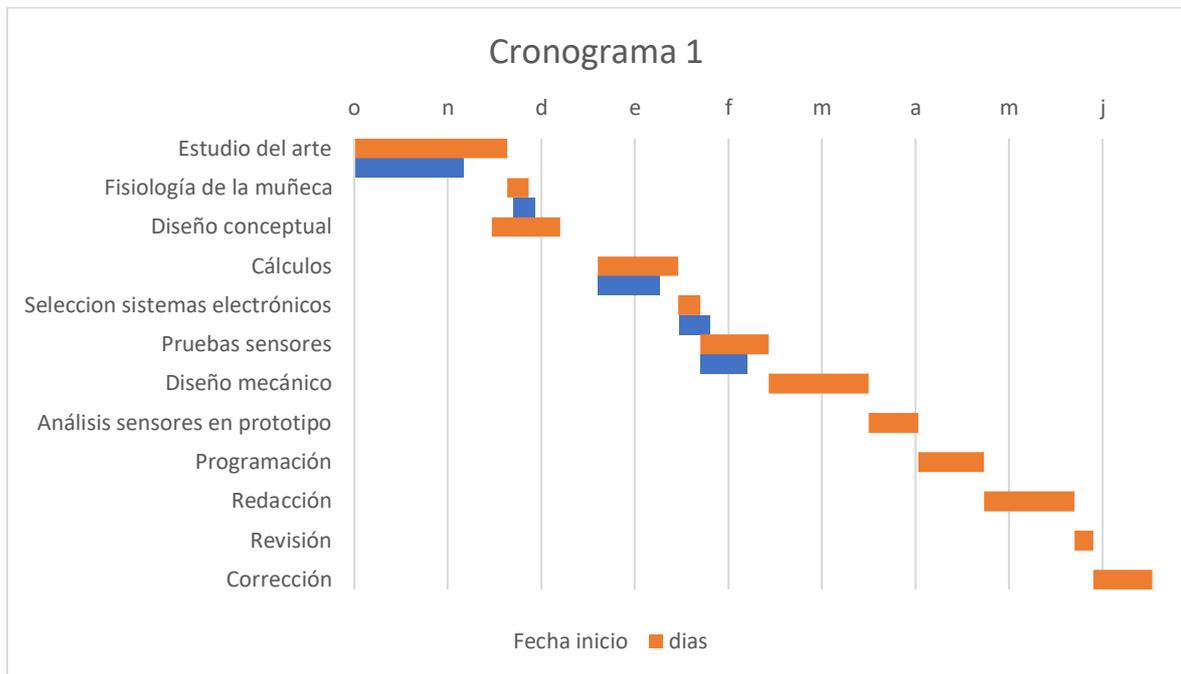


Figura 85 Cronograma inicial (Fuente: elaboración propia)

Debido al no funcionamiento de los sensores Emg, se cambió el objetivo del proyecto y por lo tanto de la planificación. Con esta nueva planificación se cambió el objetivo de presentar en septiembre.

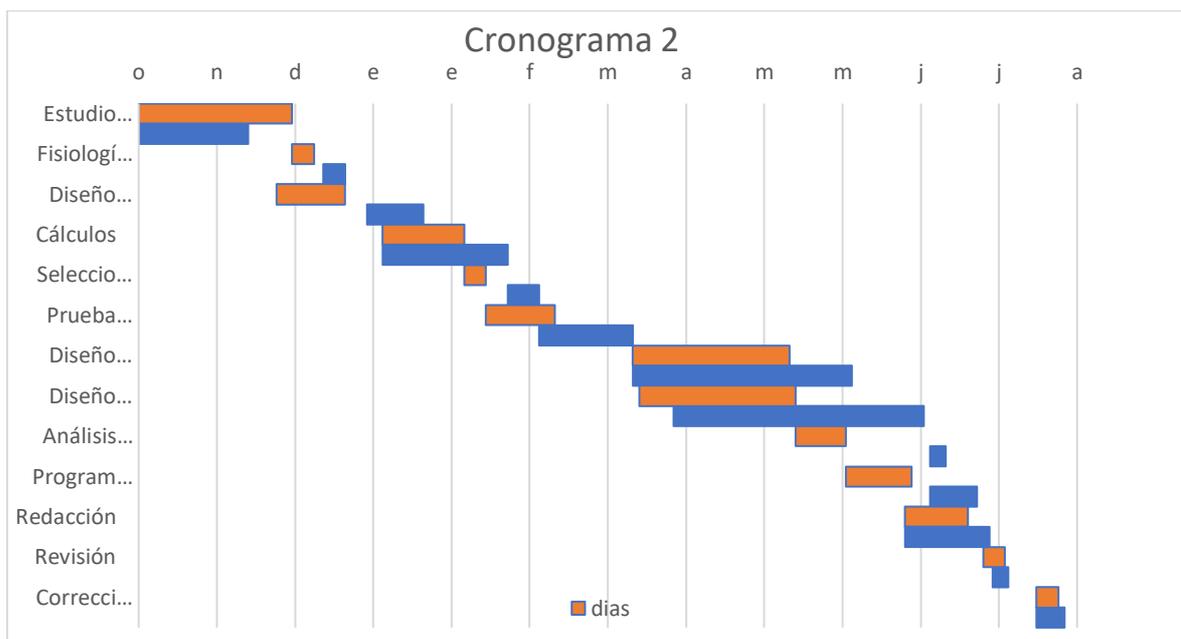


Figura 86 Cronograma final (Fuente: elaboración propia)

## 11. RESULTADOS

- El resultado de este trabajo ha sido la construcción de un exoesqueleto “low cost” para la articulación de la muñeca con dos grados de libertad. En la “Figura 87” se muestra el dispositivo.

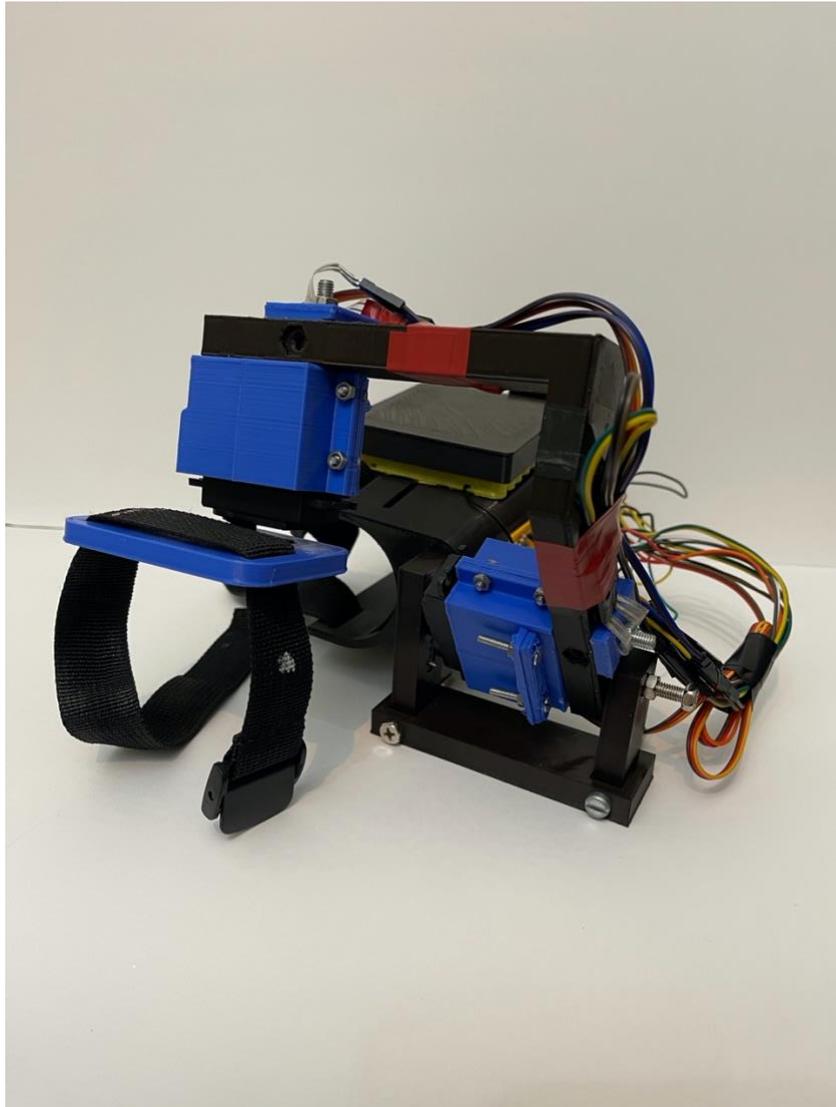


Figura 87 Resultado construcción prototipo (Fuente: elaboración propia)

- El exoesqueleto cumple su función principal que es ser capaz de realizar los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción de la articulación de muñeca en los rangos estipulados.
- El diseño no limita a la mano para realizar sus funciones, pero si limita los movimientos de pronación y supinación de la muñeca.

- El diseño del prototipo limita su uso a una sola posición del brazo.
- El prototipo construido tiene un peso de 0,640 kg y su colocación aumenta el perímetro en la zona del cubito 0,110 m y en el dorso de la mano 0,1 m.
- En la “Tabla 10” se realiza un resumen de los datos obtenidos por los sensores en el reconocimiento de intención de movimiento. Estos resultados se diferencian en satisfactorio cuando la respuesta es buena y válido cuando se obtiene una respuesta buena, pero puede inducir a que se produzcan conflictos.

Tabla 10.1 Resultados de la respuesta de los sensores resistivos de fuerza ante la intención de movimiento (Fuente: elaboración propia)

Ángulo	Grados	Posición	Movimientos	Resultado		
90°	90°	Neutra	Extensión	✓	Satisfactorio	
			Flexión	✓		
			Abducción	✓		
			Aducción	✓		
90°	20°	Extensión	✓	Válido		
		Flexión				
		Neutra	Abducción		✓	
			Aducción		✓	
90°	160°	Extensión		Válido		
		Flexión	✓			
		Neutra	Abducción		✓	
			Aducción		✓	
30°	90°	Neutra	Extensión	✓	Satisfactorio	
			Flexión	✓		
		Abducción	✓	Abducción		
		Aducción				Aducción
140°	90°	Neutra	Extensión	✓	Válido	
			Flexión	✓		
		Abducción		Abducción		✓
		Aducción	✓	Aducción		
30°	20°	Extensión	✓	Satisfactorio		
		Flexión				
		Abducción	✓			

		Aducción		Aducción	✓	
30°	140°	Extensión	✓	Extensión		Satisfactorio
		Flexión		Flexión	✓	
		Abducción		Abducción	✓	
		Aducción	✓	Aducción		
140°	30°	Extensión	✓	Extensión		Satisfactorio
		Flexión		Flexión	✓	
		Abducción		Abducción	✓	
		Aducción	✓	Aducción		
140°	140°	Extensión		Extensión	✓	Válido
		Flexión	✓	Flexión		
		Abducción		Abducción	✓	
		Aducción	✓	Aducción		

- El algoritmo diseñado funciona bien en todas las posiciones excepto en la posición 6 (extensión y abducción) y en la posición 8 (extensión y aducción), en estas posiciones si no detecta el movimiento la primera vez que se ejerce después le cuesta mucho reconocerlo. En la “Tabla 11” se recogen los datos necesarios para la programación y las respuestas a cada movimiento.
- Los tiempos de respuesta son de un segundo aproximadamente entre distintos movimientos con una respuesta buena, pero con 0,5s también respondía el sistema.

Tabla 11 Resultados y datos necesarios para la programación (Fuente: elaboración propia)

Posición	Lectura	Movimientos	Nuevas posiciones	Rango	Orden lecturas	Estabilidad
1	i=9, delay(10)	Subir	2	30	3	Buena
		Bajar	3	30	4	Buena
		Izquierda	4	20	2	Buena
		Derecha	5	10	1	Buena
2	i=9, delay(10)	Bajar	1	15	1	Buena
		Izquierda	6	10	3	Buena
		Derecha	8	10	2	Buena
3	i=9, delay(10)	Subir	1	30	3	Buena
		Izquierda	7	10	1	Buena
		Derecha	9	20	2	Buena
4	i=9, delay(10)	Subir	6	30	2	Buena
		Bajar	7	35	3	Buena
		Derecha	1	10	1	Buena
5	i=9, delay(10)	Subir	8	40	2	Buena
		Bajar	9	40	3	Buena
		Izquierda	1	10	1	Buena
6	i=9, delay(10)	Bajar	4	20	2	Buena
		Derecha	2	10	1	Baja
7	i=9, delay(10)	Subir	4	30	2	Buena
		Derecha	3	20	1	Buena
8	i=9, delay(10)	Bajar	5	30	2	Baja
		Izquierda	2	10	1	Baja
9	i=9, delay(10)	Subir	5	30	1	Buena
		Bajar	3	40	2	Buena

## 12. CONCLUSIONES Y MEJORAS

### 12.1. CONCLUSIONES

- El principal objetivo de este trabajo se ha cumplido. Se ha diseñado y construido un exoesqueleto para la articulación de la muñeca capaz de realizar los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción.
- Para el diseño de este dispositivo se debía realizar una pequeña investigación de los estudios y desarrollos de exoesqueletos que hay hasta la fecha. La gran mayoría son muy complejos y emplean tecnología muy avanzada lo que ocasiona un difícil acceso a ellos. Respecto a los exoesqueletos para la articulación de la muñeca, la gran mayoría son utilizados para el ámbito de la rehabilitación, por ello son fijos y emplean rutinas que puedan ser realizadas sin la ayuda de un fisioterapeuta. En cambio, gracias a esta investigación se encontró el exoesqueleto *EXOS Wrist DK2*, un exoesqueleto háptico para la interacción con entornos virtuales, con características similares a las que se buscaban en este trabajo. Por ello el diseño mecánico del exoesqueleto se basó en este dispositivo y se modificó para realizar distintas funciones.
- Uno de los requisitos más importantes del exoesqueleto a desarrollar era su precio. Con un bajo coste y utilizando tecnologías de fácil acceso como software y hardware libre y su construcción mediante la impresión 3D este sería accesible a cualquier persona que lo pueda llegar a necesitar. El precio total del prototipo diseñado es de 213,4 € un precio económico teniendo en cuenta que al ser portátil solo las baterías suponen un 30% del coste final. El precio final del exoesqueleto construido es de 143,2 €. Cabe destacar que la diferencia entre el exoesqueleto construido y el prototipo diseñado, el precio de las baterías se reduce a la mitad, también se reducen los costes de los servomotores. Por lo que habría que considerar dependiendo las funciones que se vayan a realizar si es más interesante perder prestaciones del dispositivo a cambio de reducir de forma considerable su precio. Otro aspecto a tener en cuenta es la utilización de la impresión 3D, para el trabajo con cargas pesadas no es el adecuado ya que limita las propiedades mecánicas del dispositivo, siendo así ineficaz la elección de actuadores más potentes.

- Para darle una aplicación a él exoesqueleto, este debía de ser capaz de reconocer la intención de movimiento del usuario. Esta función en la mayoría de los exoesqueletos es desarrollada mediante los sensores EMG ya que no hay mejor transmisor de intención que el propio sistema nervioso central. La idea inicial para realizar este proyecto era el empleo de esta tecnología. Pero realizando un estudio de la fisiología de la muñeca se comprobó que los 4 movimientos que debía de realizar el exoesqueleto dependían de la combinación de 4 músculos diferentes del antebrazo. La obtención de 4 señales distintas ya complicaba el problema, pero además de ello estos músculos no son de un gran tamaño y no tienen un fácil acceso superficial, por lo tanto, la colocación de los electrodos superficiales para recibir una buena señal sería un tarea ardua e ineficaz debido a la precisión necesaria. A parte de esto la colocación de los 4 sensores limitaría mucho el espacio disponible para el diseño del dispositivo y por último aumentaría el precio de una forma considerable. Por estas razones se descartó este tipo de tecnología y cambio la perspectiva del trabajo.
- A partir de aquí cambio el principal objetivo a diseñar e implementar un sistema capaz de reconocer la intención de movimiento. Para ello el concepto consistía en recibir mediante un pequeño gesto de inicio del movimiento una señal que indicara al exoesqueleto que ayude a continuar con ese movimiento. Se estudiaron diferentes tipos de sensores que fueran capaces de interpretar este pequeño movimiento y lo más rápido posible. Simular o calcular las diferentes fuerzas que actúan no era viable debido a las infinitas combinaciones de direcciones, sentidos e intensidades, por ello, para el desarrollo del sistema se utilizó la técnica ensayo-error para ver cómo se comportaban los diferentes sensores y a partir de ahí realizar un diseño. El empleo de esta técnica en mi opinión ha sido un error, el comportamiento de los sensores variaba mucho y para cada sensor se podían encontrar varias opciones válidas para unos movimientos, pero ineficaces para otros, por lo que había que idear un nuevo diseño diferente lo que ralentizaba mucho el proceso y provocaba mucha frustración.
- El segundo prototipo se diseñó utilizando potenciómetros, debido a que son muy utilizados en los exoesqueletos. En la posición neutral de la mano el sistema respondía bien pero después de realizar el movimiento y colocarse en la nueva

posición, la mano oponía una resistencia para volver a su posición neutral. Para que la mano se mantuviera en esa posición ya no se podía realizar el pequeño movimiento en la dirección deseada. De ahí surgió la idea de la utilización de sensores resistivos de fuerza o FSR, al encontrarse en esa posición, aunque no se pudiera realizar el movimiento el sensor detectaría un aumento de presión por lo tanto sería capaz de generar una señal para distinguir la intención. Además, tienen un bajo coste, y por su reducido tamaño y flexibilidad brindan muchas opciones, otra ventaja era su fácil instalación y retirada que facilitaba mucho realizar distintas pruebas con ellos. A partir de ahí se probaron muchas opciones para colocar los sensores, inicialmente en la mano. Para los movimientos de flexión y extensión la mayoría funcionaban sin problema, pero siempre se encontraban problemas para el movimiento de aducción, debido a que la correa en el lado del dedo meñique no ejercía la misma fuerza de giro que en el dedo pulgar. Este problema se solucionaría con una mayor sujeción de la mano, pero limitaría mucho su funcionalidad. Otra idea fue colocar estos sensores en el soporte del antebrazo ya que era el que soportaba la pequeña fuerza de la intención de giro. Este sistema funcionaba, pero al mínimo movimiento del brazo se obtenían falsos positivos por lo que se descartó esta idea, añadiendo un sensor de aceleración de 3 ejes puede que se podría solucionar este problema, pero esta opción al final no se intentó al no disponer de uno. Por último, se cambió la perspectiva y se instalaron los sensores entre el codo de unión de los servomotores y el servomotor. Este sistema si funcionaba bien, pero fue difícil buscar alternativas para ubicarlos. En conclusión, la ubicación se encontró una bastante ergonómica y cómoda para su instalación y ajuste. Y finalmente funcionaba. La sensibilidad del sistema podría ser mucho mayor si no tuvieran juego los ejes de los servomotores, donde se pierde bastante presión.

- El diseño mecánico del prototipo cumple con los requisitos, pero tiene mucho margen de mejora y es necesario realizar un estudio mecánico de cada pieza para mejorar el funcionamiento total. El trabajo se ha centrado más en buscar una solución válida para continuar con el resto del diseño.
- El procesamiento de las señales, no ha sido muy desarrollado debido a que con el propio sistema de captación se obtenían señales lo suficientemente claras para

realizar la función. Por lo tanto, un estudio de estas y un buen procesamiento mejorarían el funcionamiento de manera considerable.

- Las señales obtenidas eran concisas en cuanto a la intención de movimiento, pero no seguían un mismo patrón variaban mucho sus valores máximos y mínimos. Por lo que se creó un algoritmo capaz de interpretar un cambio significativo de la señal. Estos algoritmos se utilizan principalmente en sistemas con cambios lentos y pocos datos, pero el creado es capaz de trabajar en 0,5s entre movimiento y movimiento, aunque para un funcionamiento correcto por lo menos es necesario 1s entre estos, mejorando la adquisición de la señal se pueden disminuir estos tiempos.

## 12.2. MEJORAS

Como el diseño de este exoesqueleto y su sistema de reconocer la intencionalidad del movimiento han partido casi de cero por ello hay gran posibilidad de mejoras:

- Hay un gran margen de mejora en el diseño mecánico del exoesqueleto. Se pueden realizar un estudio mecánico de cada pieza y su comportamiento para un dimensionado y funcionamiento adecuado de estas.
- Hay dos opciones para enfocar la mejora del diseño, que este se realice a medida mediante softwares especializados para un mejor funcionamiento y comodidad. O, por otro lado, realizar un diseño más universal que sea compatible para distintas personas, al fin y al cabo, el propuesto en el trabajo está limitado al autor.
- Otra mejora necesaria sería que el exoesqueleto se pueda utilizar en ambas manos, el diseño actual al tratarse de prototipos se realizó para la mano izquierda para poder trabajar con él con comodidad, no se tuvo en cuenta su diseño para la mano derecha. Pero simplemente rediseñando la pieza codo de unión de servomotores se podría aplicar esta mejora.
- Otra mejora interesante y vía de estudio sería ir ampliando los grados de libertad del exoesqueleto, en primer lugar, añadiendo los movimientos de supinación y pronación y posteriormente continuar con los de dos de las manos o con el resto del brazo.
- En cuanto al diseño electrónico se pueden realizar mejoras realizando un procesamiento más amplio de las señales obtenidas, probar el funcionamiento de otros sensores como las galgas extensiométricas, sensores magnéticos, o añadir más sensores que nos proporcionen más información como por ejemplo un acelerómetro

de 3 ejes para conocer en qué posición se encuentra el brazo ya que al variar la posición se obtenían falsos positivos.

- Incluir un programa de calibración para el exoesqueleto para no tener que calibrarlo mediante el ordenador y un sistema de feedback para checkear que el exoesqueleto está funcionando de manera óptima.
- Y por último otra mejora interesante sería la creación de un programa y una app para realizar rutinas de movimiento para tratamientos de fisioterapia, pero siendo supervisados por personal médico.

# Bibliografía

aliexpress, s.f. <https://es.aliexpress.com>. [En línea]

Available at: <https://es.aliexpress.com/item/32985537403.html>

Amazon, s.f. [www.amazon.es](http://www.amazon.es). [En línea]

Available at: [https://www.amazon.es/AZDelivery-Digital-Helic%C3%B3ptero-Arduino-Gratis/dp/B07PXDKLGH/ref=sr\\_1\\_1\\_sspa?keywords=mg995+servo&qid=1662219383&sr=8-1-spons&psc=1&smid=A1X7QLRQH87QA3](https://www.amazon.es/AZDelivery-Digital-Helic%C3%B3ptero-Arduino-Gratis/dp/B07PXDKLGH/ref=sr_1_1_sspa?keywords=mg995+servo&qid=1662219383&sr=8-1-spons&psc=1&smid=A1X7QLRQH87QA3)

Anon., s.f. [Rewalk](http://Rewalk). [En línea]

Available at: <https://rewalk.com/>

Anon., s.f. [www.guiadisc.com](http://www.guiadisc.com). [En línea]

Available at:

<https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Fwww.guiadisc.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2010%2F12%2Flifesuit14.jpg&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.guiadisc.com%2Fexoesqueletos-evolucion-trajes-roboticos.html&tbnid=egucWt2jgNW6JM&vet=12ahUKEwiC3ueP5vT5AhU>

arduino, s.f. <https://store.arduino.cc>. [En línea]

Available at: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>

aulafacil, s.f. <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica/corriente-continua/asociacion-de-pilas-en-serie-y-en-paralelo-l30039>. [En línea]

Available at: <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica/corriente-continua/asociacion-de-pilas-en-serie-y-en-paralelo-l30039>

aulafacil, s.f. [www.aulafacil.com](http://www.aulafacil.com). [En línea]

Available at: <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica/corriente-continua/asociacion-de-pilas-en-serie-y-en-paralelo-l30039>

Brico geek, s.f. <https://tienda.bricogeek.com>. [En línea]

Available at: <https://tienda.bricogeek.com/servomotores/1322-servo-gigante-feetech-40kg-ft5335m-fb-con-feedback.html>

Brutovsky, J. & Novak, D., 2006. *Low-cost motivated rehabilitation system for post-operation exercises*. New York, International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.

Carlson, J. D., 2000. *Portable hand and wrist rehabilitation device*. EEUU, Patente nº US6117093A.

Chávez Cardona, M. A., Rodríguez Spitia, F. & Baradica López, A., 2010. Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. *Ingeniería Biomédica*, 4(7), pp. 63-73.

Cheng-Barrantes, O. & Rojas Vega, L., 2019. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO DE REHABILITACIÓN PARA MIEMBRO SUPERIOR*, Universidad de Piura, Perú: Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico- Eléctrico.

Chu, A., Kazerooni, H. & Zoos, A., 2005. *On the Biomimetic Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)*. Barcelona, International Conference on Robotics and Automation.

Ciaffaroni Castro, D. y otros, 2011. ESTIMACION DEL PESO TOTAL EN PERSONAS AMPUTADAS EN MIEMBROS INFERIORES. *Revista electrónica de Ciencias Aplicadas al Deporte*, 4(13).

Copaci, D. y otros, 2016. *EXOESQUELETO ACTUADO POR SMA PARA MOVILIZACION DE LA MUÑECA*. Madrid, Actas de las XXXVII Jornadas de Automática, pp. 368-373.

Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S. & Mares Carreño, J., 2014. *Sensores y actuadores Aplicaciones con Arduino*. Azcapotzalco, México D. F.: GRUPO EDITORIAL PATRIA, S.A. DE C.V..

Espejo Quezada, C. A., s.f. *ESTADO DEL ARTE BIOINGENIERIA: EXOESQUELETOS*, s.l.: Universidad Politécnica Salesiana.

Exiii inc., s.f. <https://exiii.jp/>. [En línea]

Available at: <https://exiii.jp/>

<https://rewalk.com/>, s.f. <https://rewalk.com/>. [En línea]

Available at:

<https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2Frewalk.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F05%2Frewalk-exoskelet->

[6 0.png&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.frewalk.com%2F&tbnid=fsZZ1WEuDDJLDM&vet=12ahUKEwjD- vt vT5AhVFdBoKHftiDnkQMygGegUIARC7AQ..i&docid= Tue9MFbpNq](https://tendencias2009.wordpress.com)

<https://tendencias2009.wordpress.com>, s.f. <https://tendencias2009.wordpress.com>. [En línea]

Available at: <https://tendencias2009.wordpress.com/2013/04/18/hal-el-primer-exoesqueleto-bionico/>

<https://www.lifeder.com>, s.f. <https://www.lifeder.com>. [En línea]

Available at: <https://www.lifeder.com/musculos-brazo/>

<https://www.neoteo.com>, s.f. <https://www.neoteo.com>. [En línea]

Available at: <https://www.neoteo.com/rex-exoesqueleto-y-piernas-bionicas/>

<https://www.xataka.com>, s.f. <https://www.xataka.com>. [En línea]

Available at: <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/hal-el-exoesqueleto-de-cyberdyne-que-se-controla-con-la-mente-finalmente-esta-listo-para-salir-a-la-venta>

Kapadnji, A. I., 2006. Fisiología articular. En: Madrid: Editorial medica panamericana, pp. 146-194.

Li Jianfeng, L. Y., 2016. China, Patente nº CN106109165B.

MEDEN-INMEN, s.f. [www.meden.com](http://www.meden.com). [En línea]

Available at: <https://meden.com.pl/offer/limb-dysfunction-therapy/175-wrist-joint-rehabilitation-device-pictor.html>

[Último acceso: Enero 2022].

Moreno Arango, J. D., 2018. *ÓRTESIS ROBÓTICAS PARA REHABILITACIÓN DE MANO Y MUÑECA*. COLOMBIA, Patente nº PCT/CO2017/000006.

naylampmechatronics, s.f. <https://naylampmechatronics.com>. [En línea]

Available at: <https://naylampmechatronics.com/biomedico/309-sensor-emg-myoware.html>

Oblak, J., Cikajlo, I. & Matjačić, Z., 2010. *Universal Haptic Drive: A Robot for Arm and Wrist Rehabilitation*. s.l., IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, pp. 293-302.

Ortiz Chimbo, K. M., Luna Aveiga, H., Medina Moreira, J. & Soledispa Tumbaco, R. . L., 2016. Los beneficios de las impresoras 3D como herramienta de innovación en la medicina. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, junio.

Pando, A. & Charles, S., 2013. Characterization of Wrist Kinetics during Activities of Daily Living. *Journal of Undergraduate research*, Septiembre.

Pezent, E., Rose, . C. G., Deshpande, A. D. & O'Malley, M. K., 2017. *Design and characterization of the OpenWrist: A robotic wrist exoskeleton for coordinated hand-wrist rehabilitation*. s.l., s.n.

PRIM Physio, s.f. [www.primphysio.es](http://www.primphysio.es). [En línea] Available at: [https://www.primphysio.es/productos/kinetec\\_maestra-maquina-de-mano/](https://www.primphysio.es/productos/kinetec_maestra-maquina-de-mano/) [Último acceso: Enero 2022].

Salamea Palacios, C. & Luna Romero, . S., 2019. Calibración Automática en Filtros Adaptativos para el Procesamiento de Señales EMG. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, Volumen 16, pp. 232-237.

Tribeño Alata, E. E., 2021. *DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PORTÁTIL PARA LA REHABILITACIÓN PASIVA DE MUÑECA CON TRES GRADOS DE LIBERTAD*, Lima: Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico.

Walsh, C. J., 2006. *Biomimetic Design of an Under-Actuated Leg Exoskeleton For Load-Carrying Augmentation*, Massachusetts Institute of Technology: Master of Science in Mechanical Engineering.

Weinberg, B. y otros, 2007. *Design, Control and Human Testing of an Active Knee Rehabilitation Orthotic Device*. s.l., Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation.

zonamaker, s.f. <https://www.zonamaker.com>. [En línea] Available at: <https://www.zonamaker.com/electronica/intro-electronica/componentes/motores/servo-motores>

Zoss, A., Kazerooni, H. & Chu, A., 2005. *on the mechanical design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton*. s.l., IEEE International Conference on Robotics and Automation.