



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

Trabajo de Fin de Grado:

Mano biónica a partir de impulsos
musculares.

Grado en Ingeniería Electrónica, Industrial y
Automática.

Javier Martín Pérez
(alu0100777604@ull.edu.es)

Tutor: Leopoldo Acosta Sánchez
(lacosta@ull.edu.es)





Índice:

Resumen.	5
Abstract.	6
1. Prótesis.	7
1.1. ¿Qué es una prótesis?.	7
1.2. Historia.	7
1.2.1. Los comienzos del mundo protésico.	7
1.2.2. Edad Media.	9
1.2.3. El Renacimiento.	10
1.2.4. Época Moderna	10
2. Anatomía.	12
2.1. Estructura de la mano.	12
2.1.1. Estructura muscular.	12
2.1.2. Estructura ósea.	14
2.1.3. Articulaciones de la mano.	15
2.2. El Sistema Nervioso.	17
2.2.1. El Encéfalo.	17
2.2.2. El Sistema Nervioso.	19
3. Las prótesis.	21
3.1. Clasificación.	21
3.2. Materiales de fabricación.	26
3.2.1. Laminado de plástico polímero.	26
3.2.2. Textiles de refuerzo.	27
3.2.3. Materiales termoplásticos.	27
3.2.4. Silicona y similares.	27
3.2.5. Metales.	27
3.3. Prótesis en el mercado actual.	28
4. Estructura protésica.	32
4.1. Objetivo del diseño.	32
4.2. Antropometría.	32
4.3. Mecanismos.	33
4.3.1. Mecanismos de transmisión por tendones.	34
4.3.2. Mecanismos de transmisión por poleas.	35
4.3.3. Mecanismos de barras.	36
4.3.4. Mecanismos con motor por articulación.	37



4.4. Actuadores.	38
4.5. Sensores.	39
4.5.1. Sensores EMG (Sensor Electromiográfico).	39
<i>Preamplificación</i>	40
<i>Filtrado.</i>	44
<i>Amplificación.</i>	54
<i>Conversión Analógico-Digital.</i>	55
4.5.2. Sensor Myoware	56
5. Elección de materiales para una mano protésica.	57
5.1. Actuadores.	57
5.2. Baterías.	60
5.3. Material de la estructura.	61
5.4. Microcontrolador.	62
6. Diseño estructural de mano.	63
6.1. Idea inicial.	64
Principio de Funcionamiento.	65
Prototipado.	66
6.2. Diseño en 3D.	66
Tinkercad	67
Primer prototipo 3D	67
Segundo prototipo 3D.	69
Tercer prototipo 3D	71
Cuarto prototipo 3D	73
Quinto prototipo 3D	74
Sexto prototipo 3D y diseño final	74
Transmisión de energía desde el servomotor al dedo.	76
<i>Engranaje cilíndrico de dientes rectos</i>	76
<i>Engranaje cónico de dientes rectos</i>	77
Diseño del pulgar.	78
Diseño de la palma.	79
<i>Parte inferior de la palma</i>	80
<i>Parte superior de la palma</i>	82
Diseño soporte del pulgar.	84
7. Diseño de código.	86
Planteamiento inicial	86
Movimiento de un dedo.	91
Movimiento varios dedos.	95
Cierre de mano en forma de puño.	99



Prueba oposición del pulgar	100
Cierre de puño final.	103
8. Ensamblaje.	107
9. Conclusión.	116
10. Conclusion.	118
11. Referencias bibliográficas.	120
12. Anexos.	121
ANEXO A. Código cierre de mano en forma de puño.	121
ANEXO B. Datasheet sensor Myoware.	123
ANEXO C. Datasheet servomotor SG90.	124
ANEXO D. Características filamento PLA.	125



Resumen.

El campo de la ingeniería tiene una gran importancia en el día a día de nuestra sociedad. Está integrada a su vez en muchas ramas de las ciencias como puede ser la rama de la Salud. Es por ello que el presente Trabajo de Fin de Grado, pretende unificar la ingeniería con la salud, a través de la fabricación de una mano biónica a partir de impulsos musculares.

El desarrollo de la unificación de las ramas de la ingeniería y la salud ha permitido a lo largo de la historia, que muchas personas hayan visto mejorada su calidad de vida. Desde sus comienzos al usar dedos de madera hasta la fabricación de piernas biónicas que permiten que una persona pueda volver a caminar, las prótesis han tenido a lo largo de la historia un gran desarrollo en cuanto a diseño, fabricación, versatilidad e integración de nuevos materiales. Es por ello que ha día de hoy la unión humano-máquina es cada vez más común y normalizado. Pero es cierto que todo desarrollo también tiene su parte negativa y es que no todo el mundo puede disponer de dichos dispositivos al tener un coste elevado.

Es por ello que el fin de este proyecto es la de poder desarrollar una prótesis de mano, de bajo coste que pueda tener un uso práctico y de calidad a la que pueda tener acceso cualquier persona que la requiera. El principio de funcionamiento estará basado en la detección de señales musculares a través de un sensor muscular y en la traducción de esta señal para que el microcontrolador que se use, pueda transmitir la información de ejecución de movimiento. Luego para ello se ha decidido dividir este proyecto en varias secciones de desarrollo.

Se realizará una selección de los materiales que se van a usar para la fabricación de la mano. Seguidamente se procederá a la fase de diseño la cual está dividida en dos partes. La primera consta del diseño estructural de la mano, donde desarrollaremos cada uno de los dedos, los engranajes que los moverán y la palma. Y la segunda parte del diseño es la referida a la parte electrónica que es el diseño del programa que ejecutará las órdenes para poder realizar los diferente movimientos de la mano. Al mismo tiempo se realizará la impresión 3D de las piezas que usaremos, cuya novedad es la del uso de un filamento biodegradable, por lo que el impacto medioambiental en el desarrollo del proyecto será lo más bajo posible. Y finalmente se ensamblará cada una de las piezas y se realizarán las conexiones pertinentes con el circuito que haremos.

Palabras clave: mano biónica, ingeniería, salud, detección de señales musculares, diseño estructural, diseño del programa, impresión 3D



Abstract.

The engineering field has a great impact in the daily life of our society. It is also integrated in other branches of sciences like in Health. So the purpose of this Final Degree Project is to join engineering and health, by building up a bionic hand controlled by muscle impulse.

The development of unifying engineering and health along history, has provided an improvement regarding to life quality of huge amount of people. From the first wood toe made until the use of a bionic leg that let people to walk again, prosthetics have had a great development according to design, fabrication, versatility and the use of new materials. For this reason, the mix of human-machine, has been settle as common and normalized. But it is also true, that all this progress has a negative side, because not everybody can achieve certain kind of these devices cause of high prices.

For this reason, the main goal of the project is to make a prosthetic hand, low cost of quality and that can be used day by day by any user and also that can be achieved by anyone who demands it. How it works, is based on the detection of muscle signal through out a muscle sensor and the translation of these signals by the microcontroller that is been used, to send the proper information to execute the hand movements. So the project has been divided into certain sectors of development.

First of all, we will select the materials that we are going to use to build up the hand. Then, we will enter into the design sector that is also divided in two areas. The first one will be the structure design, where all the fingers, gears and the palm of the hand will be buildup. The second part will be the electronic side according to the code sketch, where all the movements that we want the hand to do, will be settle down. At the same time, we are going to do the 3D printing of all the pieces, where we are going to introduce a innovation, by using a biodegradable filament to print out all the hand, so we are going to low down the environmental impact. And we will end by assemble the whole hand and do all the electronic connections according to a circuit sketch that we are going to do.

Key words: bionic hand, engineering, health, detection of muscle signal, structure design, code sketch, 3D printing.



1. Prótesis.

1.1. ¿Qué es una prótesis?.

Según la Real Academia de la Lengua Española, se puede definir una prótesis como “1. f. Med. Pieza, aparato o sustancia que se coloca en el cuerpo para mejorar alguna de sus funciones, o con fines estéticos.” Podríamos decir por tanto, que una prótesis es un objeto que se usa para reemplazar la falta ya sea de forma parcial o total de un miembro u órgano. Es importante que no haya confusión entre lo que es una prótesis y un aparato ortopédico, dado que a pesar de que ambos facilitan realizar ciertas funciones motoras, este último no reemplaza a la zona afectada. Por ejemplo, un aparato ortopédico puede ser una zapatilla con zanco para resolver problemas de displasia de cadera y un ejemplo de prótesis puede ser una mano artificial.

1.2. Historia.

A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado la forma de evolucionar con el fin de mejorar. Es por ello que el campo de las prótesis se ha ido sofisticando a lo largo de los años, a partir de unos comienzos muy rudimentarios, como por ejemplo las patas de palo, y llegando hasta nuestro actual momento, donde el mundo biónico se abre paso, como las manos biónicas como la que vamos a estudiar en este proyecto. La unión de la medicina con la ingeniería ha permitido que muchas personas con la necesidad de usar prótesis biónicas, puedan satisfacer muchas más necesidades que antaño.

1.2.1. Los comienzos del mundo protésico.

Para poder entender cómo hemos llegado al momento actual del mundo protésico, es necesario conocer su historia, y es que nos tenemos que remontar hasta los antiguos egipcios para encontrar las primeras prótesis realizadas a partir de fibras. Se determinó que la primera prótesis



funcional, y no estética, fue hallada en una momia egipcia enterrada cerca de Luxor, Egipto, y se trata de un dedo gordo del pie hecho de madera y cuero. Según los estudios realizados sobre las diferentes réplicas encontradas, pudieron haberse fabricado entre el año 950 y 750 a.C.



Figura 1.- Primera prótesis funcional.

Si avanzamos un poco en el tiempo, en el Imperio Romano podemos encontrar la siguiente prótesis más antigua hallada hasta ahora. Se trata de una pierna protésica que data del año 300 a.C., la cual fue encontrada en Capua, Italia, en el año 1858. Dicha prótesis fue fabricada con hierro y bronce, con el interior de madera. La pierna fue fabricada para poder ser usada por alguien que tuviera una amputación o la falta de la extremidad, a partir de la rodilla. Como curiosidad sobre la pierna original descubierta, fue destruida durante la Segunda Guerra Mundial, por lo que lo único que ha quedado han sido las réplicas de la misma.



Figura 2.- Pierna protésica datada del año 300 a.C.

Y es que a parte de los descubrimientos insitu, contamos con pasajes y escritos donde se relata el uso de prótesis con un fin práctico. Un ejemplo, es el relatado por un erudito romano de nombre Plinio El Viejo, 23 d.C. hasta el 79 d.C., quien describió cómo un general romano al que se le amputó el brazo derecho durante la Segunda Guerra Púnica, 218 hasta 216 a.C., y con el fin de mantenerlo en la batalla, se le incorporó una mano fabricada con hierro para así poder sostener su escudo durante la pelea.

1.2.2. Edad Media.

Aunque fuera presumible que con el paso de los años, el mundo protésico evolucionara, esto no fue así. Y es que durante este período de la historia, los únicos elementos destacables fueron la pata de palo y un gancho para la mano. De hecho este tipo de prótesis solo estaban al alcance de aquellas personas que tuvieran un nivel adquisitivo elevado. Aquellas personas más desfavorecidas se tenían que conformar con prótesis cuya función fuera la de tapar o disimular amputaciones, heridas o deformidades, pero sin funcionalidad práctica.



1.2.3. El Renacimiento.

Es en este período de la historia donde muchos campos como el del arte o las ciencias toman un nuevo rumbo de progreso.

A principios del S XVI, el barbero y cirujano Ambroise Paré desarrolló nuevos procesos de amputación para el mundo de la medicina y elaboró nuevos dispositivos protésicos con muchas innovaciones. Mejoras como el arnés ajustable o el control de bloqueo de rodilla, fueron algunas de las novedades que introdujo, las cuales tuvieron tal repercusión que a día de hoy se siguen utilizando en las prótesis modernas. Es por ello que se considera a Paré como el padre de las prótesis modernas.

Más adelante se continuó innovando ya no solo en la funcionalidad de los dispositivos, sino también en los materiales a utilizar para su fabricación. Hasta ese momento se elaboraban las prótesis con hierro, madera, acero o cobre, lo que hacía que las prótesis fueran aparatos robustos y pesados. Es por ello que se realizaron mejoras introduciendo materiales para el desarrollo de los dispositivos protésicos como cuero, papel y pegamento.

Es en el S XIX, donde podemos comenzar a apreciar sistemas protésicos que dan paso a lo que conocemos actualmente como dispositivo protésico. Aparecen los primeros aparatos con articulaciones, controlados con guías o cuerdas, que permitían un movimiento más natural. Más adelante se incorporan resortes para suavizar el desplazamiento. Y también empiezan a fraguarse las primeras ideas de realizar dispositivos más ligeros y por ende la utilización de nuevos materiales como el aluminio, aunque la fabricación con este material no se desarrollaría hasta ya entrados en el SXX.

1.2.4. Época Moderna

Muchas innovaciones tecnológicas actuales, por paradójico que parezca, fueron desarrolladas a partir de las guerras. Aunque durante la Primera Guerra Mundial y la Segunda Guerra Mundial, no se desarrollaron



grandes avances en el campo de las prótesis, fue tras la finalización de esta última, cuando los veteranos de guerra exigen mejoras de sus diferentes dispositivos protésicos. El ejemplo más significativo ocurre en Estados Unidos, donde tras las exigencias de los veteranos de guerra, el gobierno se ve en la tesitura de llegar a acuerdos con las compañías militares para comenzar a realizar mejoras en las funciones protésicas .

Esto impulsó en gran medida el desarrollo de los dispositivos, haciéndolos más ligeros y funcionales. Los avances permitieron que las prótesis ya no fueran genéricas, sino que fueran personalizadas para cada paciente, y por consiguiente, hacía que éstos pudieran estar más cómodos.

La aparición de microprocesadores o chips informáticos, ha permitido que el desarrollo de las prótesis biónicas esté actualmente en auge y en pleno crecimiento tecnológico, permitiendo que las personas que requieran de dichos dispositivos, puedan recuperar un estilo de vida normal y sin obstáculos. Aunque todo este desarrollo está permitiendo que se innove y se mejore cada día, no se ha conseguido que todos estos avances puedan estar al alcance de todos los pacientes y por ello existe la necesidad de abaratar las prótesis, pero manteniendo la naturalidad y funcionalidad que se espera de una prótesis moderna.



Figura 3.- Ejemplo de prótesis biónica de extremidad inferior.



2. Anatomía.

2.1. Estructura de la mano.

Las manos son nuestras herramientas para poder manipular cualquier objeto. Por ello la estructura de la mano aunque parezca paradójico es sencilla y compleja a la vez.

La mano humana está formada principalmente por tres secciones:

- La palma: zona central de la mano y formada por los huesos metacarpianos.
- Los dedos: parte final de la mano
- La muñeca: sección de unión entre la palma y el antebrazo.

2.1.1. Estructura muscular.

Los músculos que conforman una mano se encuentran en la zona palmar y dorsal. Es decir, que en los dedos no encontramos musculatura como tal, estos están compuestos por ligamentos, tendones y huesos.

Es por ello que los movimientos que realizan los dedos, provienen de las acciones de compresión y relajación de los músculos de la zona



palmar, dorsal y del antebrazo, que tirarán o relajarán los tendones adheridos a cada dedo.

La musculatura de la mano se puede dividir en tres secciones:

- Eminencia tenar: Abductor corto del pulgar, flexor corto del pulgar, oponente del pulgar, aductor del pulgar.

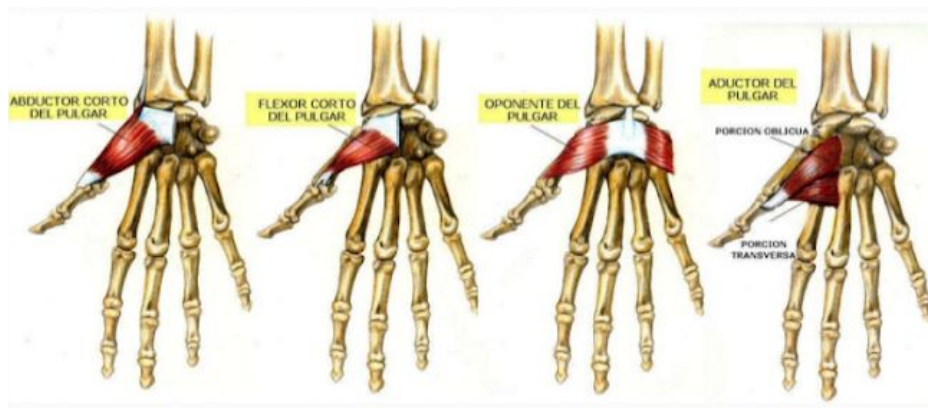


Figura 4.- Estructura eminencia tenar.

- Eminencia hipotenar: Palmar cutáneo, aductor del meñique, flexor corto del meñique, oponente del meñique.

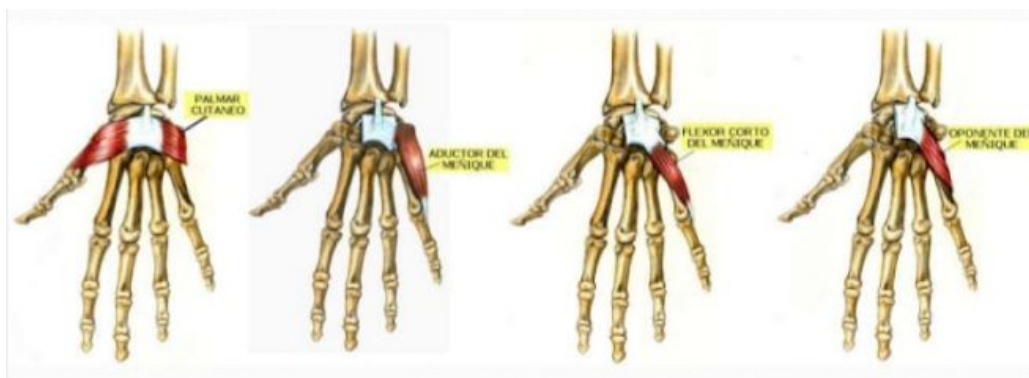


Figura 5.- Estructura eminencia hipotenar

- Región palmar media: Capa superficial (lumbricales), capa profunda en espacios intermetacarpianos (interóseos palmares, interóseos dorsales).

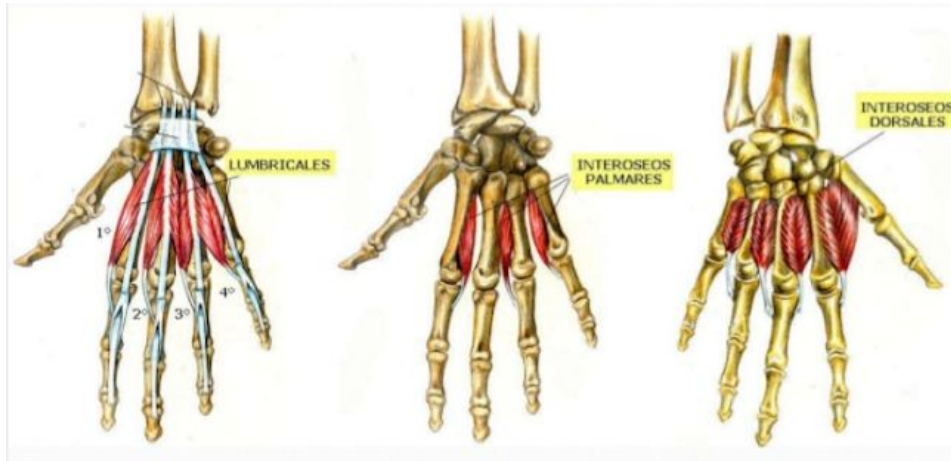


Figura 6.- Estructura región palmar media.

2.1.2. Estructura ósea.

La parte rígida de la mano la componen los huesos. Estos los podemos dividir en tres grupos: huesos del carpo, huesos del metacarpo y falanges.

- Carpo: lo conforman un conjunto de 8 huesos esponjosos y es la sección más próxima al antebrazo. Estos huesos son: trapecio, trapezoide, grande, ganchoso, pisiforme, piramidal, semilunar, escafoides.
- Metacarpo: compuesto por 5 huesos metacarpianos. Cada uno de estos huesos tiene una base, un cuerpo y una cabeza redonda. Los metacarpianos se designan como I, II, III, IV y V contando desde el metacarpiano correspondiente al dedo pulgar.
- Falanges: Cada uno de los dedos contiene tres falanges que son la primera falange o falange proximal, la segunda falange o falange media y tercera falange o falange distal. El único



dedo que incumple esta norma es el dedo pulgar que solo contiene la falange proximal y la falange distal.

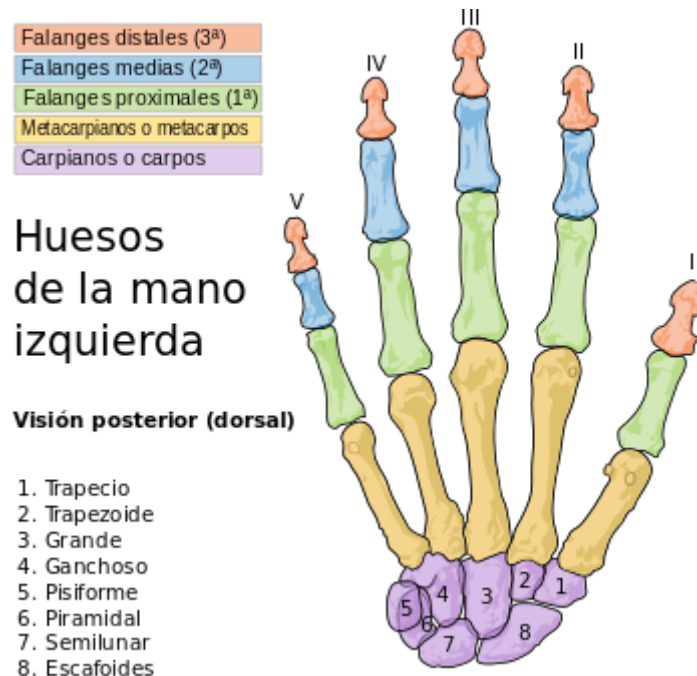


Figura 7.- Estructura ósea de la mano.

2.1.3. Articulaciones de la mano.

Aparte de la estructura ósea y de la musculatura, para que se puedan desarrollar los diferentes movimientos de la mano, ésta contiene “bisagras” que unen dos huesos y facilitan los movimientos mecánicos, además de dar elasticidad y plasticidad a los dedos. Estas son las articulaciones, que en la mano las podemos agrupar en cinco grupos:

- Articulación de la muñeca: También denominada como articulación radiocarpiana, es la unión entre el cúbito y el radio con el disco articular. Forma lo que se denomina cavidad sinovial, donde se segrega el líquido sinovial que impide que se produzca fricción entre los huesos. Los



movimientos que permite esta articulación son de abducción, aducción, extensión y flexión.

- **Articulaciones del carpo:** estas articulaciones son cavidades que se encuentran entre los huesos del carpo. A pesar de que la libertad de movimientos de estas articulaciones es limitada, contribuyen a que los movimientos de abducción, aducción, flexión y extensión, anteriormente mencionados, puedan realizarse.
- **Articulaciones carpometacarpianas:** concretamente hay 5 articulaciones de este tipo, entre los huesos metacarpianos y la fila distal de los huesos del carpo. Algunos de los movimientos que pueden realizar estas articulaciones son la flexión, la extensión, la abducción, la aducción, la rotación y la circunducción (combinación de la flexión, la extensión, la abducción y la aducción, de tal forma que al rotar describa una trayectoria que forme la figura de un cono).
- **Articulaciones metacarpofalángicas:** son las situadas entre las cabezas distales de los metacarpianos y las falanges proximales. Los movimientos que permiten este tipo de articulación son la flexión, la extensión, la abducción, la aducción, la circunducción y una leve rotación.
- **Articulaciones interfalángicas de la mano:** se encuentran en la unión de las falanges. Éstas tan sólo permiten movimientos de flexión y extensión.

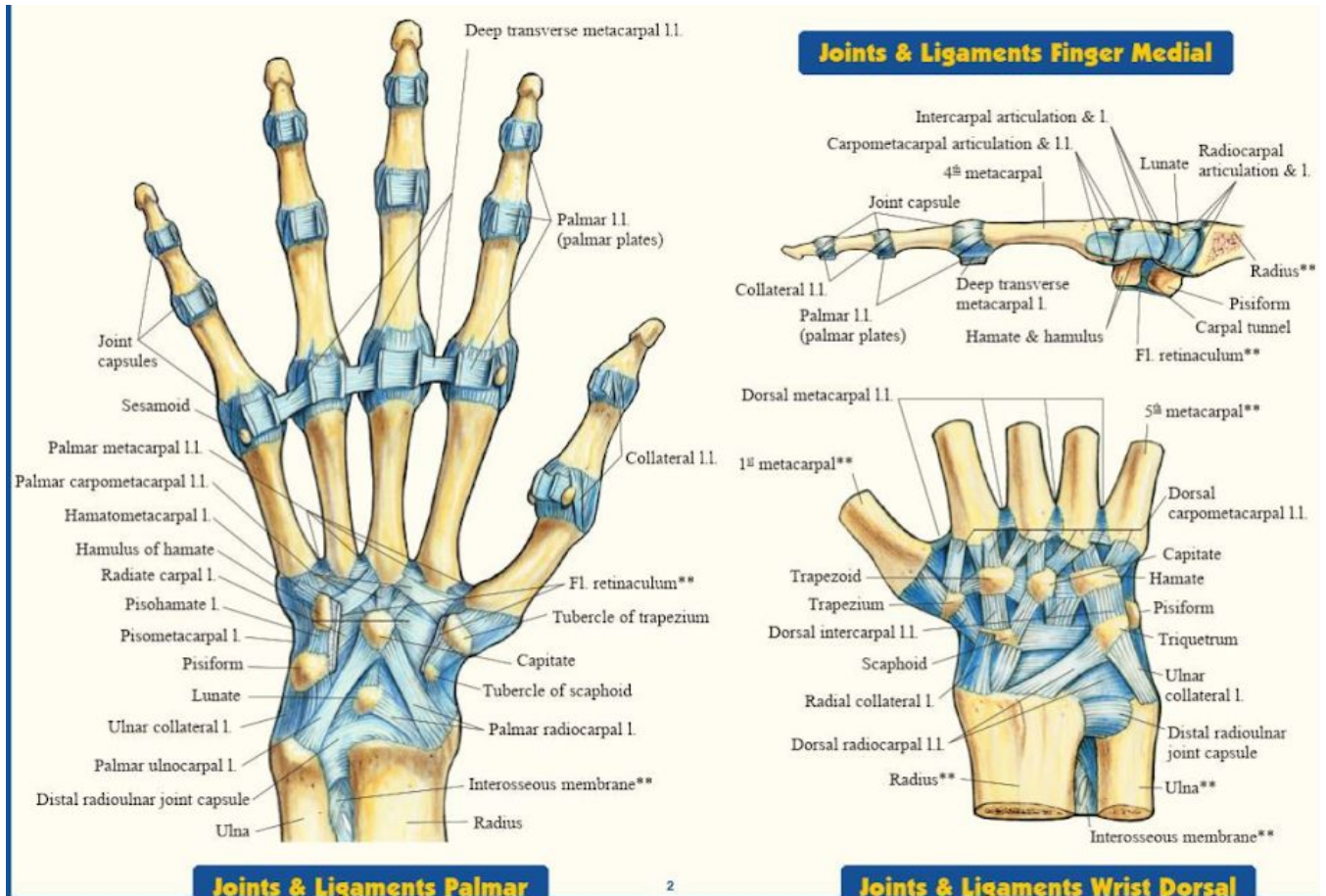


Figura 8.- Articulaciones de la mano desde diferentes puntos de vista

2.2. El Sistema Nervioso.

Una vez vista la parte mecánica de la mano, debemos conocer cómo es posible realizar movimientos. Es por ello que debemos tener nociones básicas del funcionamiento del encéfalo y del sistema nervioso.

2.2.1. El Encéfalo.

Se trata de una masa nerviosa situada en el interior del cráneo. Éste consta de tres grandes secciones: el cerebro, el cerebelo y el bulbo raquídeo.



- El Cerebro: podríamos decir que es la sección más importante dado que está compuesta por sustancia gris (cuerpos neuronales) y sustancia blanca (haces de axones: “cable” que sale del centro de la neurona hasta un punto alejado de este. Se trata de un conductor por el que viajan impulsos nerviosos). El cerebro se divide en dos partes que son el hemisferio izquierdo (controla funciones lógicas, analíticas, numéricas, el lenguaje, el pensamiento racional) y el hemisferio derecho (facultades artísticas, sensibilidad espacial). En cuanto a sus funciones generales podríamos destacar el control y funcionamiento de los centros nerviosos, por ende, es el responsable de facultades como la memoria, la inteligencia, entre otras cuestiones.
- Tronco encefálico: situado entre la base del cerebro y la médula espinal, está compuesto por el mesencéfalo (responsable de la comunicación entre el cerebro y el resto del sistema nervioso), la protuberancia (traslada impulsos desde el cerebro al cerebelo y la médula espinal) y el bulbo raquídeo.
- Bulbo raquídeo: esta sección del tronco encefálico es la responsable de regular el funcionamiento del corazón, la masticación, músculos encargados de la respiración, entre otras cuestiones.
- El Cerebelo: se halla en la parte trasera del cerebro, está formada en el exterior de sustancia gris y en el interior de sustancia blanca. Es la encargada de la coordinación de los movimientos del cuerpo humano, como por ejemplo la acción de caminar.



- La Médula Espinal: podríamos definir esta sección como la encargada de trasladar, a través de los nervios, la información recogida por los sentidos hasta el cerebro y mandar como respuesta, impulsos nerviosos desde el cerebro hacia los músculos.



Figura 9.- Sección transversal del encéfalo.

2.2.2. El Sistema Nervioso.

Podríamos definirlo brevemente como la unión del cerebro con una red nerviosa capaz de trasladar información necesaria para reaccionar ante un estímulo y por tanto para realizar alguna acción. Se puede dividir el sistema nervioso en dos grupos: El sistema nervioso central (cerebro y médula espinal) y el sistema nervioso periférico (red de nervios que recorren todo el organismo).

Por tanto, para poder realizar cualquier movimiento de la mano, es necesario que viaje información desde la mano hasta el cerebro y desde este se mandarían impulsos nerviosos en respuesta de vuelta a la mano. Un simple ejemplo podría ser el siguiente: queremos coger una botella de agua de una mesa, por lo tanto el cerebro recopila información de diferentes sentidos como pueden ser la vista y el tacto. La vista nos dará



información de dónde está situada la botella, qué forma tiene la misma o por dónde queremos agarrarla. En cuanto al tacto nos trasladará información de la superficie de la botella (rugosidad, por ejemplo), flexibilidad de la botella o plasticidad de la misma. Toda esta información se traslada al cerebro, el cual mandará mensajes en respuesta a la red nerviosa, que determinará qué músculos debemos mover para coger la botella, en qué posición debemos colocar la mano y los dedos para la sujeción y con qué fuerza se deberá coger la botella para que no se nos caiga o no la rompamos.

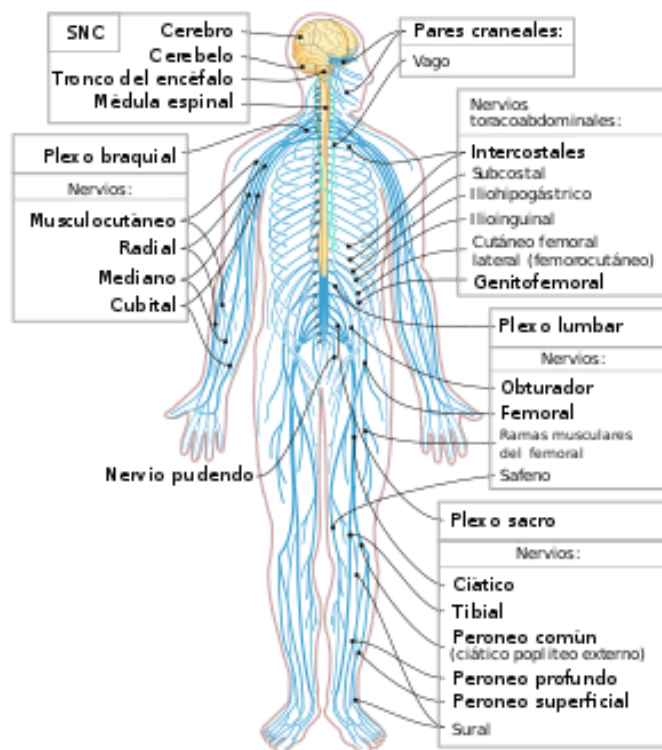


Figura 10.- Estructura del Sistema nervioso del cuerpo humano.



3. Las prótesis.

3.1. Clasificación.

Los usuarios que necesiten hacer uso de una prótesis a día de hoy, tienen una gran variedad de modelos en el mercado. Pero dicha elección deberá tener en cuenta cuestiones como la funcionalidad, el diseño y el lugar donde se colocará el mismo. Por ello podemos de entrada clasificar las prótesis en dos grupos:

- **Prótesis pasivas o estéticas:** prótesis cuyo fin es cubrir la zona afectada por un miembro artificial, con un tinte estético. Para la fabricación de este tipo de prótesis se hace uso de materiales como látex o silicona. Este tipo de prótesis debe satisfacer las necesidades que el usuario requiere, por lo que el diseño, el color, los detalles (uñas, arrugas), peso de la prótesis, entre otras cuestiones deben ser primordiales.



Figura 11.- Ejemplo prótesis estética.

- **Prótesis activas o funcionales:** prótesis que buscan que el usuario recupere las funciones motoras que tenía con su miembro real. La diferencia esencial entre las activas y las pasivas es la cuestión del



movimiento, dado que las pasivas, suelen ser estáticas. Otra diferencia es la parte de diseño, mientras que las pasivas buscan que la prótesis sea lo más parecida posible a un miembro real en cuanto a aspecto, las prótesis activas, no suelen tener ese nivel de estética tan exacto, aunque si bien es cierto que se pueden conseguir resultados muy correctos realizando guantes de látex o silicona que envuelvan la prótesis. Pero la esencia de este tipo de prótesis es el movimiento, por tanto, podemos a su vez dividir este tipo de prótesis en 5 tipos en función del origen de transmisión del movimiento:

1. **Prótesis mecánicas:** prótesis que realizan un movimiento único en función de la fuerza corporal que se ejerza. La idea esencial, es que por medio de un sistema de cables, el usuario realice un movimiento determinado con alguna sección del cuerpo, que tensará o aflojará el cable que hará que los mecanismos de la prótesis realicen un movimiento específico. En los últimos años, este tipo de prótesis ha tenido una gran aceptación en la comunidad infantil, dado que son prótesis que no tienen una dificultad muy elevada y además se pueden realizar con muy pocos recursos.

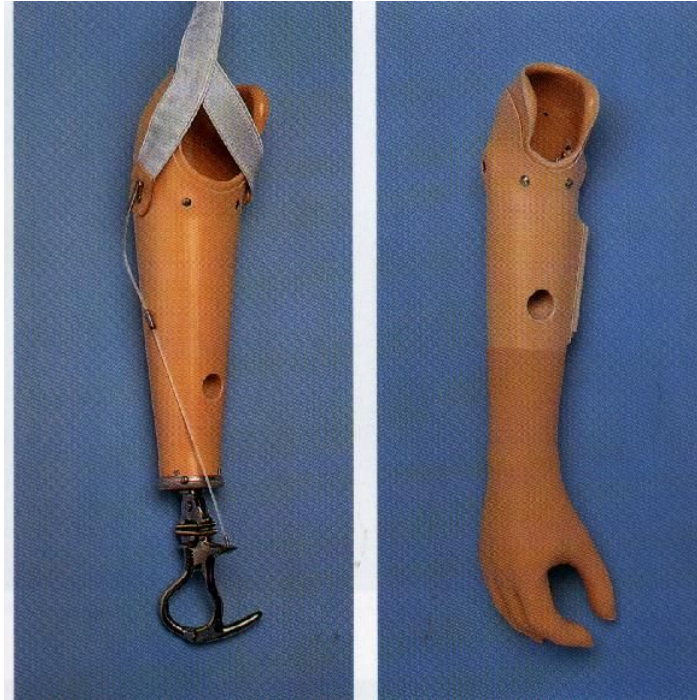


Figura 12.- Prótesis mecánica extremidad superior.

2. **Prótesis eléctricas:** la fuente de energía de este tipo de prótesis proviene de una batería que suministra energía a los motores eléctricos que hacen que la prótesis realice los diferentes movimientos establecidos. En este caso accionando un interruptor y colocando la prótesis en las posiciones deseadas se controlan los movimientos que queremos que haga. A pesar de la gran diferencia en cuanto a movimientos que se pueden realizar, si lo comparamos con las prótesis mecánicas, tienen inconvenientes, como pueden ser el exceso de peso o la imposibilidad de poder tener este tipo de prótesis en contacto con zonas húmedas.



Figura 13.- Prótesis eléctrica de mano.

3. Prótesis neumáticas: en este caso se usa como fuente de transmisión de energía el ácido carbónico comprimido, con lo cual se pueden ejercer fuerzas grandes. El inconveniente de este tipo de prótesis es la misma fuente de transmisión de energía, puesto que el elemento que se usa tiene un nivel de riesgo elevado.



Figura 14.- Prótesis neumática de pie.



4. **Prótesis mioeléctricas:** este tipo de prótesis ha sido una de las grandes revoluciones en cuanto a la búsqueda de una prótesis funcional eficiente. Se trata de prótesis que realizan diferentes movimientos en función de estímulos musculares realizados por una sección del cuerpo. Es decir, cuando realizamos el movimiento de algún músculo del organismo, se proporciona una señal eléctrica muscular o señal EMG. Esta señal se recoge mediante electrodos que están pegados en la superficie de la piel, se amplifica dicha señal, además de eliminar el ruido que se pueda producir, y en función de cómo se haya codificado el brazo, realizaremos ciertos movimientos. A diferencia de las prótesis ya mencionadas, presenta muchas ventajas como la cantidad de movimientos que podemos realizar o la comodidad. Actualmente muchas de estas prótesis presentan un precio elevado en el mercado, por lo que es complicado que muchos usuarios puedan acceder a las mismas.

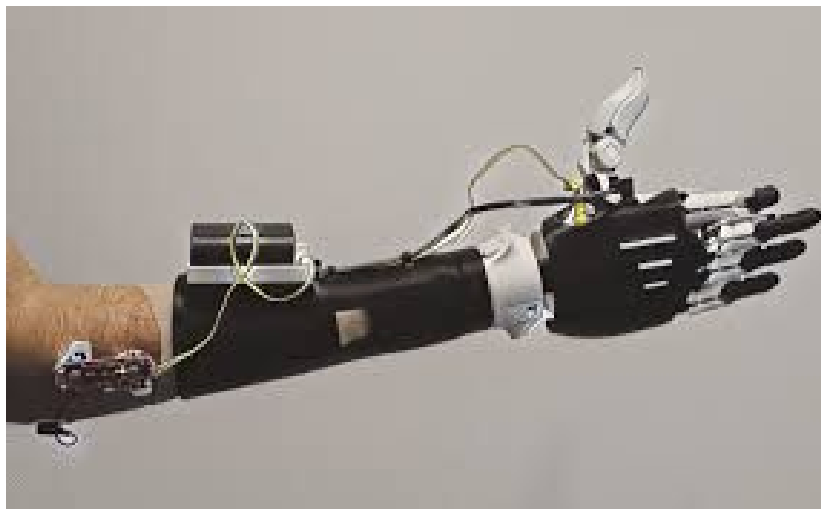


Figura 15.- Prótesis mioeléctrica

5. **Prótesis híbridas:** este tipo de prótesis se acciona mediante la combinación de los movimientos del cuerpo y señales eléctricas al mismo tiempo. Es decir, combina un sistema mecánico para realizar un movimiento determinado y además un sistema eléctrico para otros. Este tipo de prótesis pueden ser muy útiles cuando el usuario presente una



amputación donde se desea sustituir los movimientos de dos articulaciones.



Figura 16.- Prótesis híbrida de la sección del brazo.

3.2. Materiales de fabricación.

Esta cuestión es de gran importancia para la fabricación de una prótesis, puesto que en función de la calidad, la resistencia o el peso, afectará de manera satisfactoria o no a las necesidades del usuario.

3.2.1. Laminado de plástico polímero.

Este tipo de material se suele usar para la realización de encajes protésicos. Los laminados de plástico polímero más usados son el epoxi,



el acrílico y el poliéster. Una de las ventajas que presenta este producto es el control que se tiene sobre la resistencia, el grosor o la rigidez del elemento ya finalizado. Una desventaja que presenta es que se trata de resinas termofijas, lo que significa que una vez finalizado el producto, si se desean modificar secciones con calor va a ser muy difícil realizarlo.

3.2.2. Textiles de refuerzo.

Hablamos de materiales como el nylon, la fibra de vidrio o el Kevlar. La idea principal es la de proporcionar resistencia al producto.

3.2.3. Materiales termoplásticos.

Algunos de estos materiales son el polipropileno o el polietileno. Se suele usar este tipo de materiales para realizar estructuras o fabricación de conexiones protésicas. La gran ventaja que presentan estos materiales es el hecho de poder realizar modificaciones una vez se haya terminado el trabajo inicialmente.

3.2.4. Silicona y similares.

Estos materiales se usan principalmente en el campo de las prótesis estéticas, las cuales necesitan un alto nivel de detalle. Una de las grandes utilidades de estos materiales es como sistema de sujeción de la prótesis sobre la piel, dado que a la hora de la fabricación del calcetín (dispositivo que permite que la prótesis pueda estar pegada a la superficie de la piel), mediante un durómetro blando, proporcionamos la capacidad de relleno además de no producir daño en la piel.

3.2.5. Metales.

Algunos de los materiales más usados son el titanio, el aluminio o el acero inoxidable. En el caso del aluminio, una de sus propiedades más llamativas es la ligereza, además de su resistencia. En cuanto al acero, la gran resistencia que presenta es la propiedad que justifica su uso en el



campo protésico, sin embargo, es un material relativamente pesado. Si se requiere un término medio entre resistencia y ligereza, encontramos el titanio, el único inconveniente de este material es su alto precio en el mercado.

3.3. Prótesis en el mercado actual.

Podemos decir que el campo de las prótesis en general, está en continuo desarrollo, lo que propicia que muchas empresas fabriquen una gran variedad de productos. A continuación, centrándonos en el tema que queremos tratar en este trabajo, las prótesis de manos, vamos a mencionar algunos de estos fabricantes y sus productos:

- Fabricante RLS Steeper, Prótesis de mano activa eléctrica: se trata de una mano eléctrica, cuya movilidad de articulación es de pinza gancho. El control que usa esta mano es un control mioeléctrico, que como ya hemos comentado anteriormente en otro apartado, controla la mano en función de las señales musculares que recogen los electrodos que están en contacto con la piel.



Figura 17.- Prótesis mano eléctrica, RLS Steeper.



- Fabricante RLS Steeper, Prótesis de mano con control motor: en este caso la mano es mecánica, es decir, no necesita ninguna fuente de energía eléctrica, sino que se realiza el movimiento deseado, a partir de la acción mecánica de alguna zona del cuerpo. La movilidad articular que presenta esta mano es de pinza gancho.



Figura 18.- Prótesis mecánica, RLS Steeper.

- Fabricante RLS Steeper, Prótesis de mano con control motor: esta prótesis tiene un control manual, en el que se mantienen cuatro dedos en estado rígido y tan solo se mueve el pulgar. El tipo de agarre que se puede realizar con esta mano es de pinza gancho.



Figura 19.- Prótesis eléctrica, RLS Steeper.



- Fabricante Touch Bionics, Prótesis de mano mioeléctrica: como observamos en el nombre se trata de una mano mioeléctrica, que a diferencia del anterior fabricante visto, presenta una movilidad multiarticular, lo que permite al usuario poder mover dedos y muñeca. Lo novedoso de esta mano es que permite cambiar los patrones de agarre mediante un control de gestos y además estos patrones pueden ser modificados a través de una App.



Figura 20.- Prótesis mioeléctrica, Touch Bionics

- Fabricante Fillaner, Prótesis de mano con control motor: nos encontramos nuevamente con una mano de agarre pinza gancho, de control mecánico.





Figura 21.- Prótesis mecánica, Fillaner.

- Fabricante Ottobock; Prótesis de mano mioeléctrica: este es otro ejemplo de mano controlada por sensores mioeléctricos, que permite la movilidad de los dedos de forma independiente además de la sección de la muñeca.



Figura 22.- Prótesis mioeléctrica, Ottobock.

- Fabricante Handii, Prótesis de mano mioeléctrica: tenemos un nuevo ejemplo de mano mioeléctrica que presenta un diseño más atractivo en cuanto a la estructura.



Figura 23.- Prótesis mioeléctrica, Handii.

Como podemos observar, hay una gran variedad de diseños de manos protésicas. Las ventajas que presentan estas prótesis, son la



robustez, calidad de diseño y calidad de uso. Pero el mayor inconveniente de estos productos es su alto coste, lo que limita su uso para muchos usuarios.

4. Estructura protésica.

4.1. Objetivo del diseño.

Los objetivos principales que vamos a marcar para la fabricación de la mano biónica serán las siguientes

- Entendimiento de la señal ofrecida por el sensor para poder realizar el diseño del código del programa.
- Realizar un diseño estructural que cumpla especificaciones antropomórficas.
- Poder unificar correctamente la parte electrónica y mecánica para conseguir el movimiento de mano que deseamos.
- Elaborar todo el proyecto con materiales asequibles para cualquier persona.

4.2. Antropometría.

La definición explícita de antropometría es el estudio de las proporciones y las medidas del cuerpo humano. Por tanto, es esencial que a la hora del diseño de la mano, estudiemos las medidas y proporciones de una mano real.

La importancia de este apartado tiene una cuestión estética, como puede ser la forma de los dedos, la longitud y anchura de estos, el tamaño de la palma, para que podamos lograr una proporcionalidad y simetría de conjunto.

Debemos considerar las siguientes medidas: longitud y ancho de los cinco dedos, longitud de la zona palmar, altura desde la zona palmar



hasta la dorsal, perímetro de la muñeca y ancho de la mano desde el lateral de la mano hasta la zona exterior del pulgar.

Con estas medidas conseguiremos que el resultado en cuanto a medidas y proporción sea lo más realista posible.

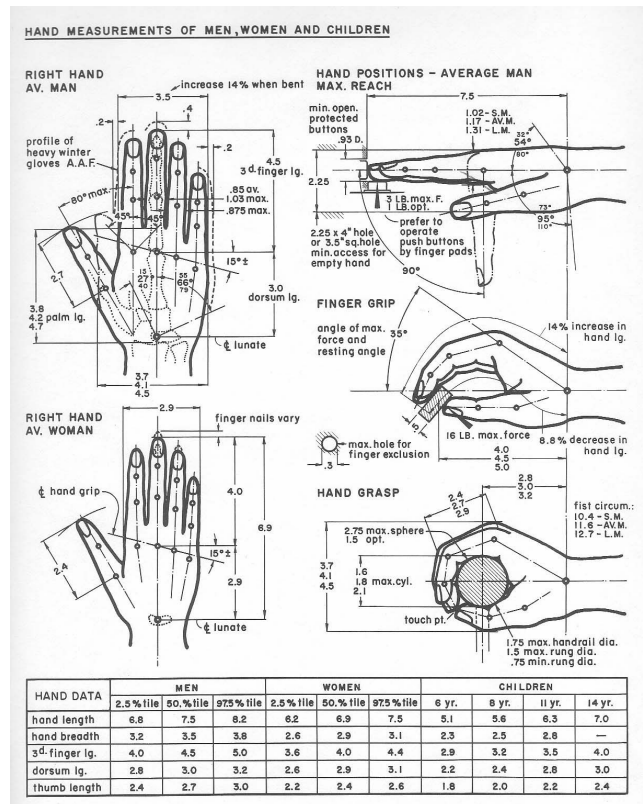


Figura 24.- Diagrama ejemplo de antropometría de mano derecha.

4.3. Mecanismos.

Lo que veremos a continuación son los diferentes mecanismos de transmisión de movimiento para la fabricación de una prótesis de mano. Podemos organizar los mecanismos actuales usados en el campo protésico como se muestra en el siguiente diagrama:

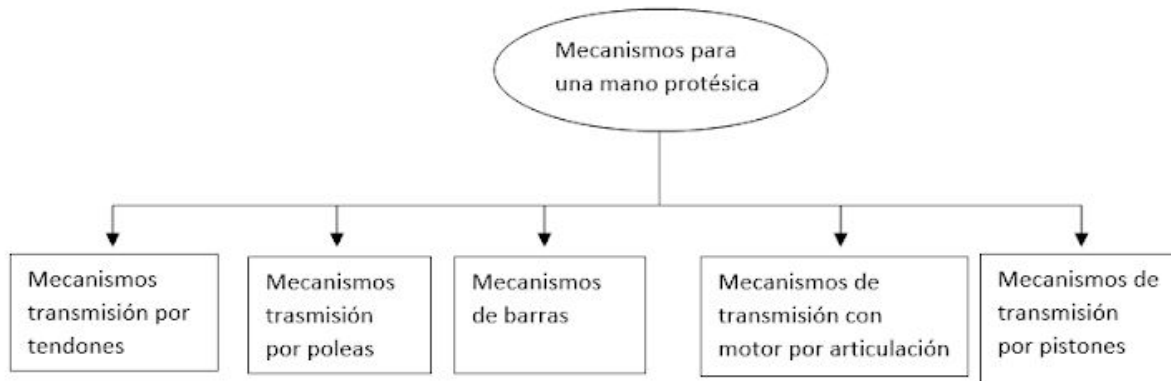


Figura 25.- Diagrama mecanismos.

4.3.1. Mecanismos de transmisión por tendones.

Se trata de un sistema que trabaja como los tendones reales que tenemos en los dedos. La idea principal es la de poder realizar el movimiento de flexión y extensión de los dedos, con un motor y un cable, hilo o materiales como el nylon, que atraviese todas las falanges de los dedos. Lo que se haría es pasar el cable por el interior o el exterior de los dedos hasta llegar a la última falange, y éste unido a un motor, que al girar, recoja el cable y por tanto flexione el dedo. Para volver a su estado de reposo, el motor girará en sentido contrario dejando libre de tensión el cable usado. La misma idea puede usarse para prótesis mecánicas en las cuales estos cables están unidos a una correa o a algún brazaletes. Mediante el movimiento del cuerpo se puede realizar la tensión y relajación del cableado y por tanto la flexión y extensión de los dedos.

Sin embargo este método presenta problemas, dado que cuando se desea volver a la extensión de los dedos, no se puede realizar correctamente. Es necesario entonces incorporar soluciones para la flexión. A día de hoy una de las soluciones más efectivas es el uso de resortes en las articulaciones para realizar la flexión del dedo de tal forma que cuando el motor deje de tensar el hilo el resorte extenderá el dedo. Otra solución es hacer uso de dos sistemas de cableados, uno que trabaje para realizar la flexión del dedo y otro que permita la extensión del dedo.

Este tipo de mecanismos, se suele usar en prótesis mecánicas infantiles, dado que permite que el usuario pueda coger objetos de tamaños pequeños y ligeros. Además, permite que cualquier usuario que lo desee pueda realizarse su propia prótesis en casa con un coste muy



bajo, dado que no se necesita excesivo material y éste no es complejo de conseguir.



Figura 26.- Ejemplo prótesis con mecanismo por tendones.

4.3.2. Mecanismos de transmisión por poleas.

Este tipo de mecanismo hace uso de un sistema cableado y poleas. La idea es introducir el cable desde el extremo de la falange hasta un actuador a través de las poleas, las cuales estarán ubicadas en las secciones articulares del dedo. Tiene un parecido en cuanto a funcionamiento al mecanismo por tendones, dado que se usa un sistema de cableado y un actuador, sin embargo, el uso de poleas resuelve el problema de tensión que se ejerce sobre el cable al pasar por las poleas. Con esto podemos conseguir entre otras cosas coger objetos más robustos y pesados.

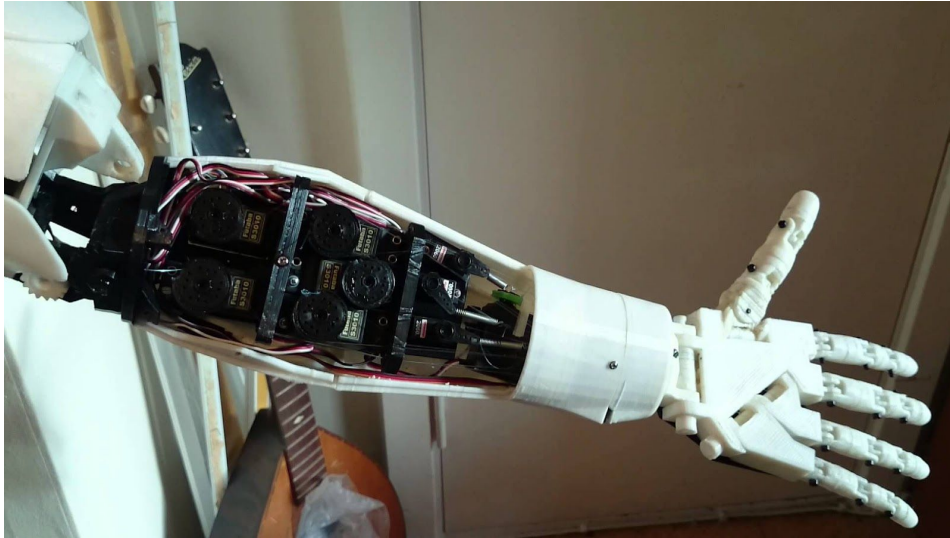


Figura 27.- Ejemplo prótesis mecanismo por poleas.

4.3.3. Mecanismos de barras.

La transmisión de movimiento con esta estructura, consiste en la conexión de barras en una forma determinada, de tal modo que pueda realizar el movimiento deseado. Dado que es el juego de barras el que efectúa el movimiento solo se necesita un actuador inicial, como un servomotor, para poder transmitir la energía cinemática a la barra a la que esté unida y se produzca el movimiento del dedo. Uno de los inconvenientes de este sistema es que todos los movimientos se efectúan al mismo tiempo. Por otro lado, conseguimos robustez de la mano al tener una estructura rígida en todo momento.



Figura 28.- Ejemplo prótesis mecanismo de barras.

4.3.4. Mecanismos con motor por articulación.

Con este sistema eliminamos elementos de transmisión de movimiento como cables o poleas, y son elementos como servomotores, los encargados de realizar los movimientos de cada una de las falanges del dedo. Lo que conseguimos es tener un control total de los movimientos de cada sección de los dedos. Uno de los problemas que supone este sistema, es el tamaño, dado que colocar un motor en cada articulación hará que la estructura final sea excesivamente grande.

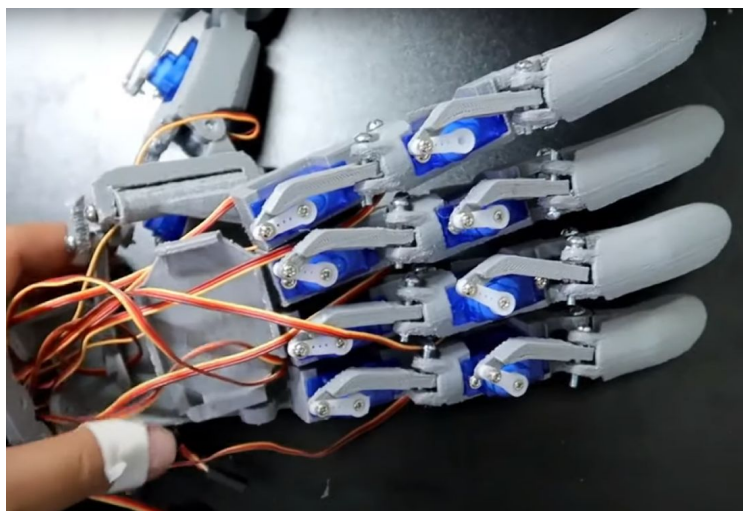


Figura 29.- Ejemplo prótesis con servomotor por articulación.



4.4. Actuadores.

Para que se pueda realizar el movimiento de los dedos o de alguna sección de la mano, es necesario un elemento que inicie dicha acción. En el caso de las prótesis mecánicas ya hemos visto que es el propio usuario, quien a través del movimiento de alguna sección del cuerpo ejerce fuerza o ejecuta un movimiento para transmitir dicha energía mecánica a la prótesis. Sin embargo, en prótesis eléctricas, son los actuadores los encargados de la transmisión de energía para el movimiento de los dedos. Por tanto, si queremos definir lo que es un actuador, podríamos determinar que se trata de un elemento que transforma un tipo de energía en una acción mecánica.

Podemos dividir los actuadores en tres grupos, en función de la fuente de energía que acciona a dichos actuadores:

- **Neumáticos:** en este caso la fuente de energía será aire comprimido. Algunos ejemplos de estos actuadores son motores neumáticos o cilindros neumáticos.
- **Hidráulicos:** la fuente de energía para este tipo de actuador es un fluido, que a través de la presión hidráulica, genera una fuerza que activa el actuador. Válvulas hidráulicas o electro-hidráulicas son elementos que entran dentro de este grupo .
- **Eléctricos:** la energía para que el actuador trabaje es la electricidad. En este grupo de actuadores englobamos los motores de corriente continua (DC), motores de corriente alterna (AC) o motores paso a paso.



4.5. Sensores.

Este apartado es importante para las prótesis eléctricas, dado que son fundamentales para su funcionamiento. Estos instrumentos electrónicos no son de uso común en prótesis mecánicas, puesto que para la movilidad de dicha mano, solo es necesario el movimiento de otra sección del cuerpo.

Para que los actuadores se activen es necesario que exista un elemento de control. Estos elementos son los sensores.

Dentro de los sensores de detección de actividad muscular, podemos agruparlos en dos grupos que serían sensores invasivos y sensores no invasivos. Entendemos por sensores invasivos, aquellos elementos electrónicos que necesitan que los electrodos estén incorporados dentro de la piel y estén adheridos a los músculos. Los sensores no invasivos, son los que los electrodos se adhieren a la superficie de la piel y no tienen la necesidad de estar en contacto con el músculo.

Los más usados son los sensores no invasivos dado que los invasivos requieren una operación quirúrgica para la implantación de los electrodos.

Si hablamos de sensores no invasivos hacemos referencia a sensores EMG, es decir, sensores electromiográficos.

4.5.1. Sensores EMG (Sensor Electromiográfico).

Llamamos electromiografía a la adquisición de las señales eléctricas que se producen durante la contracción muscular. Luego si lo vinculamos a las prótesis, el usuario realiza la contracción de alguna sección del cuerpo, la señal eléctrica que se produce es recogida por los electrodos que están pegados sobre la piel y seguidamente, debido a que la señal suele ser muy débil, es necesario realizar una preamplificación, a continuación un filtrado para eliminar el ruido producido, y finalmente la amplificación. Lo siguiente es realizar una conversión Analógico-Digital, en el que traducimos la señal para que finalmente el actuador se active según se haya definido en el código de control.



Preamplificación

El músculo en estado de reposo no genera señal, pero en el momento de activación del mismo, es decir, cuando este se contrae, genera una señal eléctrica en torno a los 250 μV . Este valor de señal es demasiado bajo para que se pueda trabajar con él, dado que pueden interferir ruidos, ya sea de ambiente o de línea. Lo que conseguimos por tanto con esta sección, es la de amplificar en cierta medida la señal obtenida y además eliminar gran parte de ruido. Uno de los instrumentos electrónicos que permite suprimir el ruido de la señal detectada son los amplificadores diferenciales.

- Amplificadores diferenciales: instrumento electrónico constituido por dos entradas, cuyo fin es el de amplificar la diferencia de potencial existente entre las dos entradas.

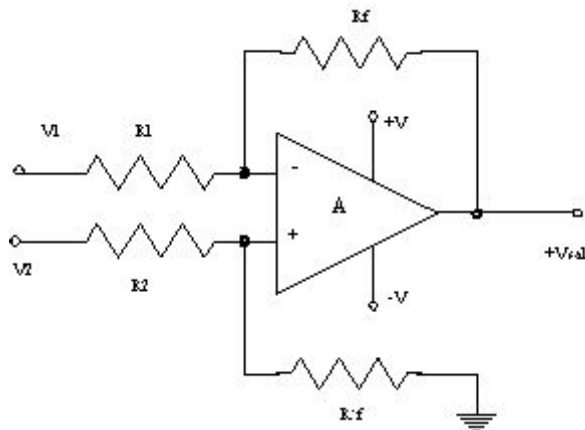


Figura 30.- Esquema amplificador diferencial.

Para entender cómo es el funcionamiento de este amplificador vamos a suponer un caso inicial, que será colocar una de las entradas a cero.

Supongamos que $V_2=0$. Si esto fuera así nuestro circuito quedaría de la siguiente forma:

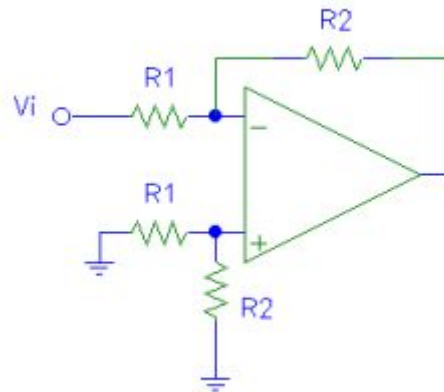


Figura 31.- Esquema caso inicial.

Vemos que en la parte no inversora del amplificador quedan R1 y R2 en paralelo, por lo que podríamos sustituir por un $R_{eq} = R1 || R2$. A través de la ley de Ohm en este nodo, podemos ver que al no tener tensión de entrada, la intensidad que atraviesa esta sección es cero, por lo que concluimos que la parte no inversora del circuito es igual a cero, convirtiendo el amplificador diferencial en un amplificador inversor.

Luego, la corriente que atraviesa R1 de la sección inversora y R2, es la misma. Aplicando la ley de Ohm, tendríamos:

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \quad (1)$$

Si lo transformamos tendremos que:

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (2)$$

Si hacemos un segundo supuesto, en el que colocamos la tensión de la parte inversora, transformaremos el amplificador diferencial en un amplificador no inversor:



$$V_o = \frac{R_2}{R_1} V_i \quad (3)$$

Por tanto, viendo estos dos sistemas, observamos que si en las entradas inversora y no inversora tenemos tensión, se nos quedaría la siguiente ecuación:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (4)$$

Es decir, como comentamos al inicio, el amplificador diferencial amplifica la diferencia entre las dos entradas. A partir de esta fórmula podemos obtener también cuál va a ser la ganancia del amplificador:

$$\frac{V_o}{V_2 - V_1} = A_v = \frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

Como conclusión de este último apartado lo que comprobamos es que la amplificación de los valores de tensión de entrada, dependerá de los valores de las resistencias que coloquemos, es decir, que podemos controlar el factor de amplificación con los valores de las resistencias.

A partir de lo obtenido anteriormente podemos crear un circuito en el que conformemos la etapa de preamplificación. Para ello haremos uso del amplificador de instrumentación INA, que se forma a partir de amplificadores diferenciales.

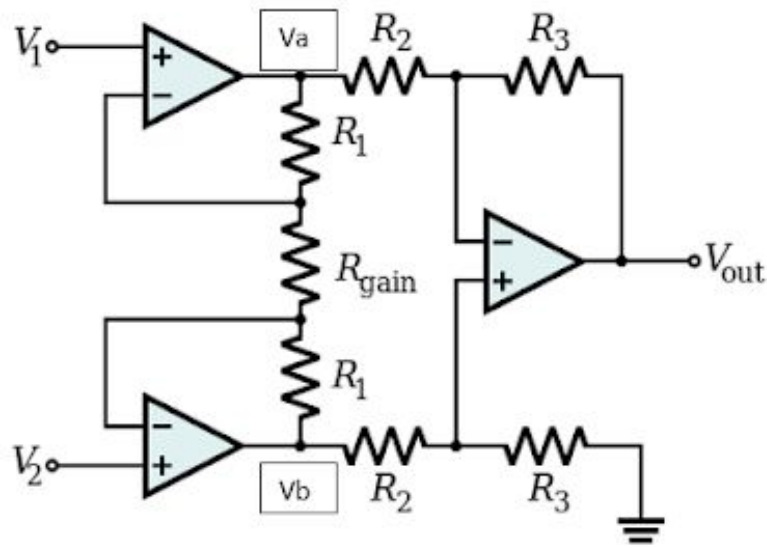


Figura 32.- Esquema amplificador INA.

Si analizamos el comportamiento del circuito, viendo que ocurre en los nodos Va y Vb, vemos que a la salida del amplificador operacional INA, obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(\frac{2R_1}{R_{gain}} + 1 \right) \quad (6)$$

Por tanto, podemos observar que el amplificador INA es un amplificador diferencial, dado que amplifica la diferencia entre V2 y V1, cuya ganancia en tensión es la siguiente:

$$A_v = \frac{2R_1}{R_{gain}} + 1 \quad (7)$$

Encontramos que R1 es un componente de valor fijo y Rgain es un componente variante, luego, es posible cambiar la ganancia del



amplificador variando la resistencia R_{gain} , pero conseguimos que el factor de rechazo a modo común, CMRR, no cambie.

Con este tipo de configuración logramos ventajas tales como una alta amplificación, un alto índice de CMRR, una ganancia lineal, o un bajo índice de offset.

Filtrado.

A continuación es necesario introducir un filtrado a la señal obtenida, con la que conseguiremos una señal más precisa con la que operar. Es decir, corregiremos aquellas secciones de la señal que no deseamos. Por tanto, procedemos a realizar un filtrado analógico, en el cual usaremos filtros de primer orden. A través de la transformada de Laplace, conseguiremos la frecuencia de corte así como el diagrama de respuesta logarítmico de los mismos.

- Filtro pasa baja: la función principal de este tipo de filtrado es la transmisión de las frecuencias más bajas y atenuar las frecuencias altas.

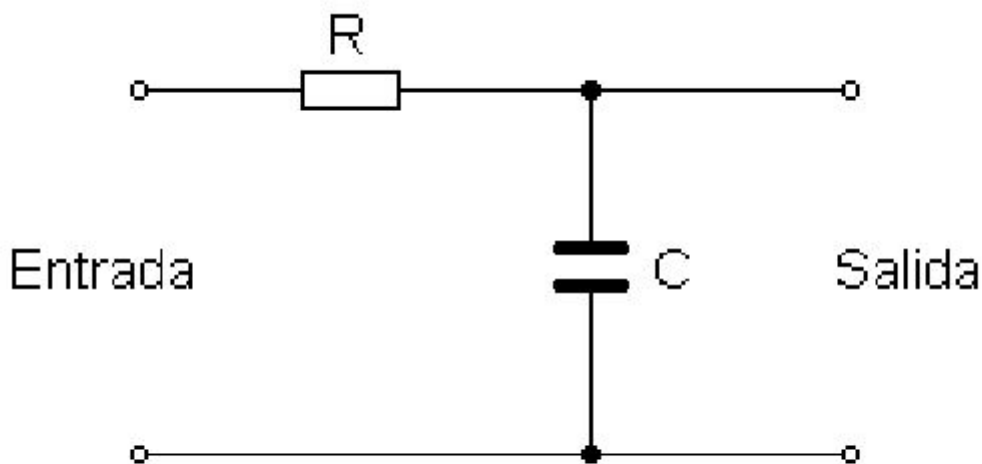


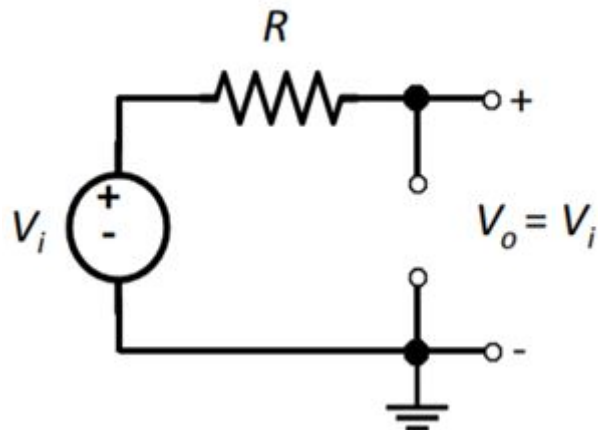
Figura 33.- Esquema filtro pasa baja.

Para entender cómo es el funcionamiento de este tipo de filtros empecemos por analizarlo. Supongamos que tenemos una



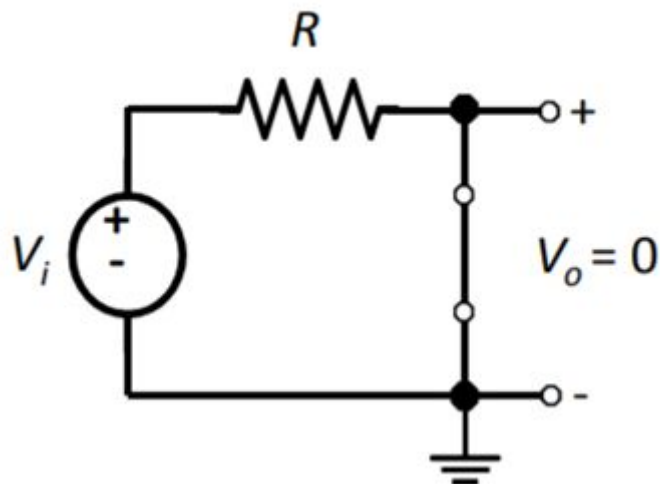
señal de entrada senoidal. Por tanto, vamos a ver cómo serían los circuitos equivalentes en dos supuestos casos:

- a) Circuito equivalente a frecuencias bajas:



Lo que ocurre en este caso es que a frecuencias bajas, $\omega=0$ rad/s, el componente C se comporta como un circuito abierto por lo que a la salida obtendremos la misma señal que a la entrada.

- b) Circuito equivalente a frecuencias altas:





En este segundo caso, tendríamos que si $\omega \rightarrow \infty$, el componente C se comporta como un cortocircuito, lo que hará que tengamos señal a la salida igual a cero.

Es por esto por lo que permite el paso de frecuencias bajas pero atenúa las frecuencias altas.

Veamos como es el comportamiento de este filtro. Sabemos que la función de transferencia del circuito debe tener esta forma:

$$T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} \quad (8)$$

Lo que queremos obtener al final es la respuesta en frecuencia del circuito. Para representar la respuesta haremos uso del diagrama de Bode. Por tanto la función de transferencia quedaría de la siguiente forma:

Podemos observar que los componentes R y C conforman un divisor de tensión. La función de transferencia la podemos expresar también de la siguiente manera:

$$T = \frac{V_o}{V_i} = \frac{Z_c}{R + Z_c} \quad (9)$$

$$T(j\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_0}} \quad (10)$$

Si observamos la función de transferencia podemos encontrar un polo real de frecuencia ω_0 . Por tanto, sabemos que a la frecuencia angular ω_0 , tendremos un cambio de fase. Una vez llegados a este punto podemos desarrollar la función de transferencia para obtener la respuesta en magnitud de este filtro:



$$w = 2\pi f \rightarrow T(jf) = \frac{1}{1 + \left(\frac{jf}{f_0}\right)} \quad (11)$$

$$|T|(dB) = 20 \log_{10} 1 - 20 \log_{10} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} = -20 \log_{10} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (12)$$

Si desarrollamos el diagrama de Bode de la función anterior:



Tabla 1.- Diagrama de Bode respuesta en Magnitud filtro pasa baja.

Lo que vemos en el diagrama de Bode del filtro pasa baja, es que en el eje Y se representan los valores de magnitud en decibelios. En el eje X vemos los valores en una escala logarítmica de frecuencia en función de la frecuencia de corte. Primero vemos que cuando la frecuencia es mucho menor a la frecuencia de corte, la respuesta en magnitud tiende a



cero. Cuando la frecuencia es igual a la frecuencia de corte, es decir, el punto 1 del eje X, vemos que la magnitud desciende a -3db. A medida que la frecuencia va ascendiendo, la respuesta en magnitud decae 20db/década, lo que viene siendo 6db/octava.

Debemos también analizar la respuesta de fase del filtro, para ello debemos fijarnos en la función de transferencia. Vemos que tenemos una constante en el numerador, por lo que contribuye con 0°. Después tenemos un polo real en la frecuencia de corte lo que supone un cambio de fase.

Lo que vemos es que si la frecuencia coge valores mucho más bajos que la frecuencia de corte, tendremos una respuesta de fase tendiente a cero. Si la frecuencia fuera igual a la frecuencia de corte, tendríamos una respuesta de fase de -45°. Y por último si la frecuencia recoge valores más grandes que la frecuencia de corte, la respuesta tenderá a los -90°.

Luego antes de realizar el diagrama de Bode para la respuesta de fase, podremos analizarlo matemáticamente mediante la siguiente función:

$$\phi = \arctan\left(\frac{0}{1}\right) - \arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) = -\arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (13)$$

A continuación, podemos proceder a conformar el diagrama de Bode de la respuesta de fase:

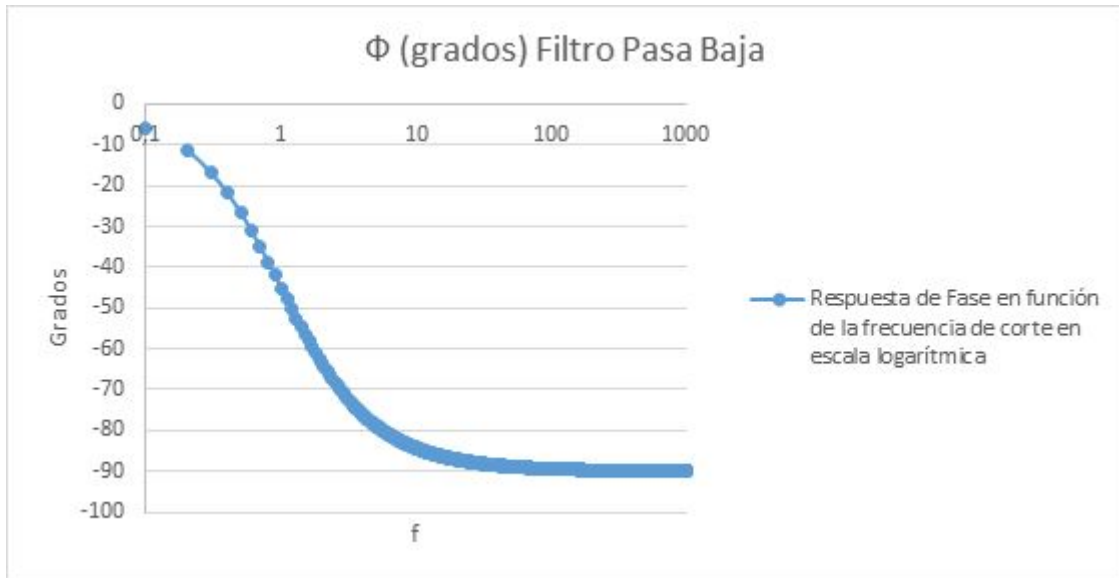


Tabla 2.- Diagrama de Bode respuesta en Frecuencia filtro pasa baja.

→ Filtro pasa altas: En este caso la función principal de este tipo de filtro es eliminar el offset existente, o dicho de otra manera, intenta limitar el paso de señales de continua (DC).

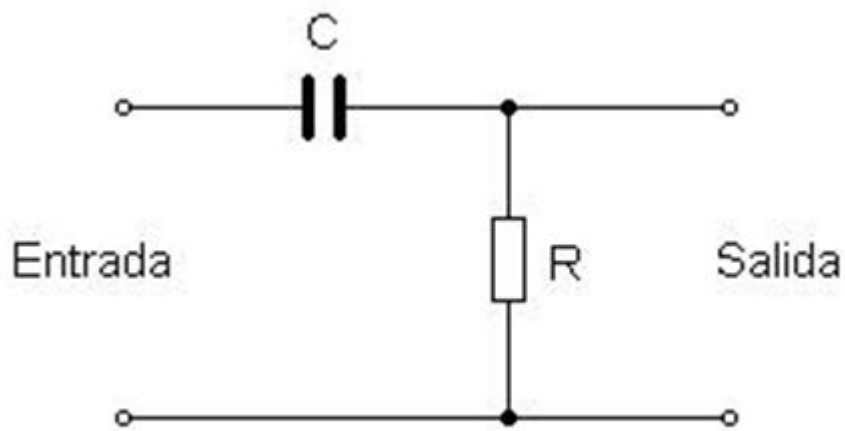
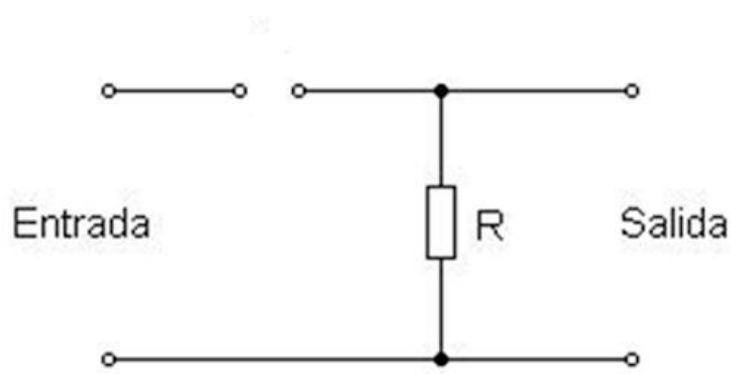


Figura 34.- Esquema filtro pasa alta.



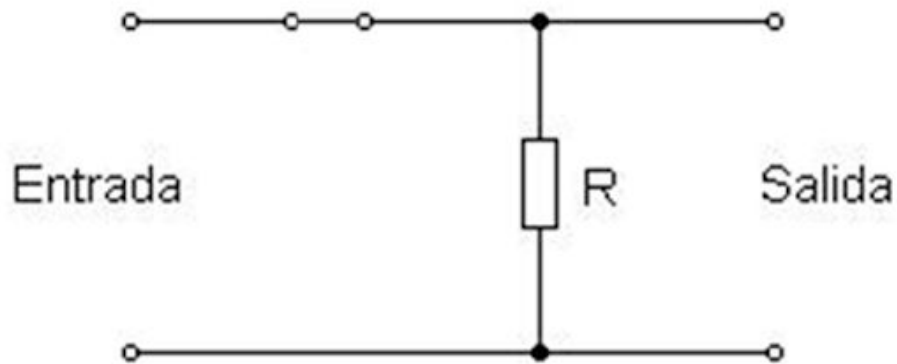
De la misma forma que hicimos para analizar el filtro pasa bajas, veamos cómo es su comportamiento para entender realmente cómo funciona.

a) Circuito equivalente a frecuencias bajas:



Como ya hemos visto anteriormente estamos suponiendo que el valor de tensión en la entrada es un valor senoidal, además, el condensador en bajas frecuencias se comporta como un circuito abierto al considerar que la frecuencia angular es igual 0 rad/s . Por tanto si analizamos el circuito equivalente que obtenemos, vemos que la tensión a la salida es nula. Es por ello por lo que podemos confirmar que este filtro limita el paso de señales a frecuencias bajas.

b) Circuito equivalente a frecuencias altas:



Teniendo en cuenta la entrada senoidal que hemos supuesto, determinamos que a altas frecuencias, es decir, una frecuencia angular tendiente a infinito, el condensador se comporta en este caso como un cortocircuito. Luego podemos confirmar que el valor de la tensión de salida será igual al valor de la tensión de entrada. Este aspecto nos permite ver que el filtro permite el paso de señal a altas frecuencias.

Seguidamente, veamos cuál es la función de transferencia de este filtro:

$$T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{j\omega RC + 1} \quad (14)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \rightarrow T(j\omega) = \frac{\frac{j\omega}{\omega_0}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right) + 1} \quad (15)$$

Seguidamente veamos cómo va a ser la respuesta en magnitud de este filtro. Seguiremos los mismos pasos que hicimos para el filtro pasa bajas:



$$\omega = 2\pi f; \omega_0 = 2\pi f_0 \rightarrow T(jf) = \frac{\frac{jf}{f_0}}{\left(\frac{jf}{f_0}\right) + 1} \quad (16)$$

$$|T|(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{f^2}{f_0^2} + 1}\right) \quad (17)$$

Con estos datos ya podemos empezar a conformar el diagrama de Bode, correspondiente a la respuesta en magnitud de este filtro:

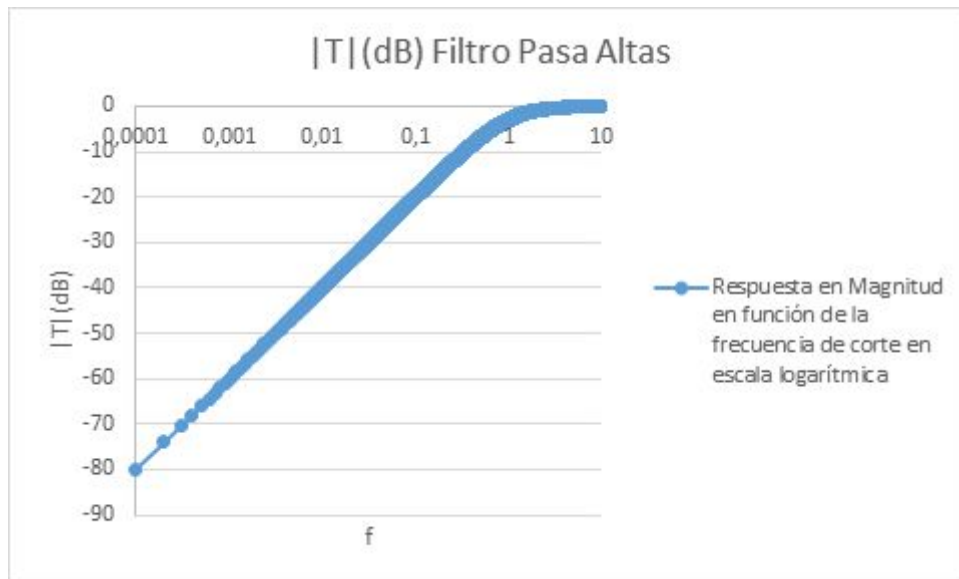


Tabla 3.- Diagrama de Bode respuesta en Magnitud filtro pasa altas.

Realizando un análisis de lo que hemos realizados, podemos ver que en el eje de las abscisas hemos representado la frecuencia en función de la frecuencia de corte en una escala logarítmica. En el eje de las ordenadas se ha representado la magnitud en decibelios. Como podemos observar a medida que la frecuencia aumenta, la respuesta en magnitud aumenta 20db/década, hasta el momento en el que llegamos a la frecuencia de corte, donde la tendencia de ascenso de 20db/década se frena, y comienza a tender a un valor cercano a los 0db. Luego podemos determinar que a frecuencias mucho más bajas que la frecuencia de corte, la magnitud se comporta de la siguiente manera: (lo que da forma



a la pendiente de +20db/década). Y por otro lado vemos que para frecuencias mucho más altas que la frecuencia de corte, la respuesta en magnitud tiende a cero.

Seguidamente, vamos a ver cómo será la respuesta de fase. Como ya hemos visto debemos coger inicialmente la función de transferencia:

$$\Phi = 90^\circ - \arctan\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (18)$$

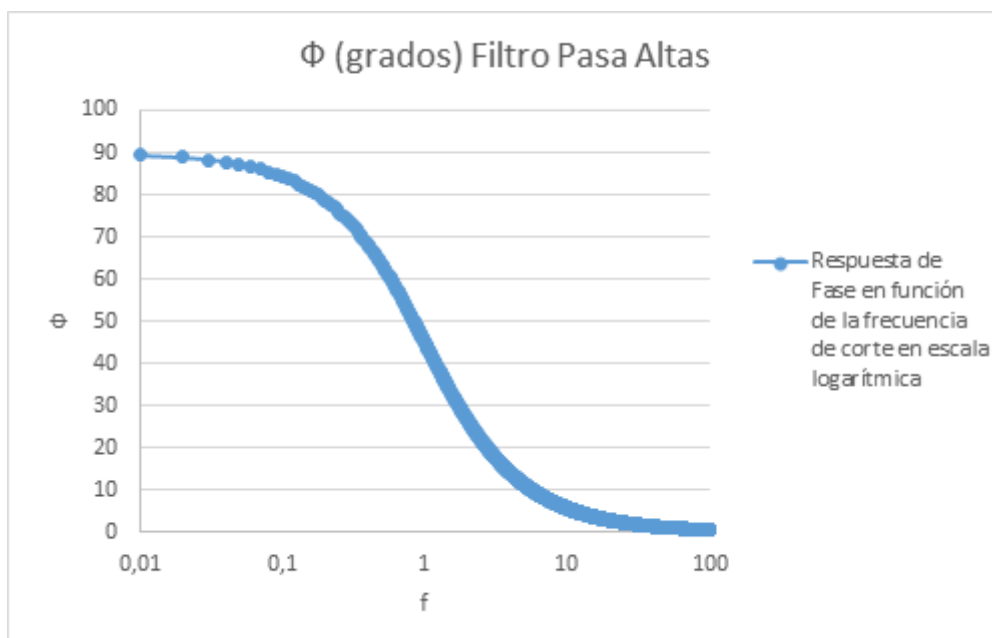


Tabla 4.- Diagrama de Bode respuesta en Frecuencia filtro pasa altas.

De la misma forma que realizamos para el filtro pasa bajas, analizaremos qué ocurre en el diagrama de Bode del filtro pasa altas. Para conformar el diagrama inicialmente debemos fijarnos en la función de transferencia. Lo que podemos comprobar es que en dicha función, hay un cero en el origen y un polo real. Por tanto, el cero en el origen proporciona un desplazamiento de fase de +90°, es por ello que el diagrama a frecuencias bajas comienza a +90°. La existencia del polo real lo que no muestra es que existe un cambio de fase, que hará que la curva



que se forme en el diagrama cambie de 90° a 0° , con 45° a la frecuencia de corte.

- Filtro Notch: Por último para conseguir una señal mucho más limpia hacemos uso del filtro Notch, cuya misión es impedir el paso de las señales que contengan frecuencias establecidas entre la frecuencia de corte superior y la frecuencia de corte inferior. Es decir, se encarga de eliminar el ruido de inducción eléctrica.

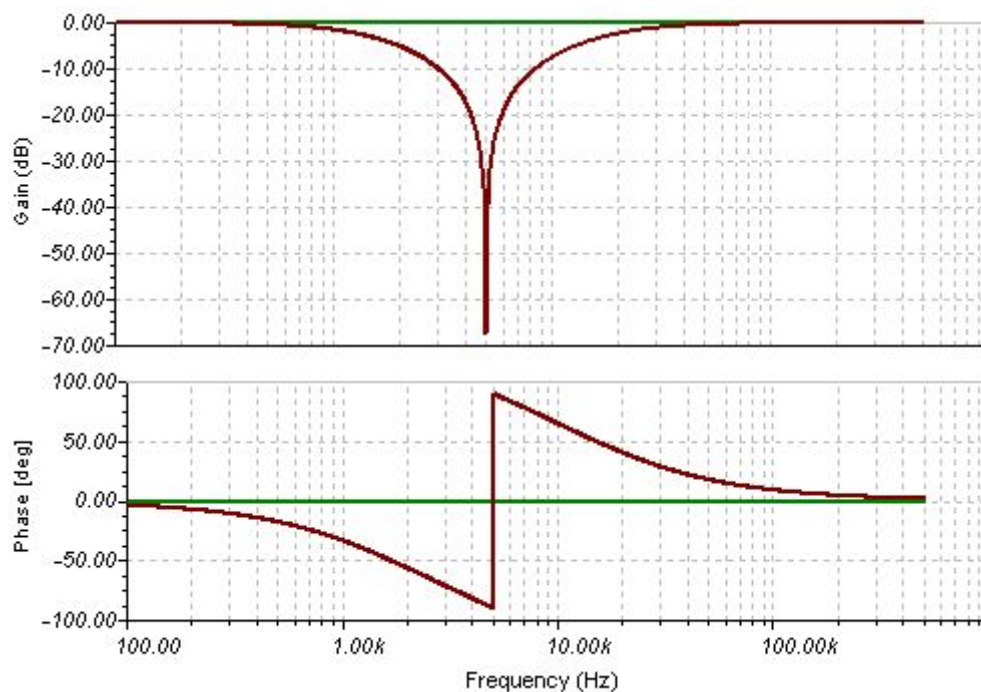


Tabla 5.- Diagrama de Bode respuesta en Magnitud y Frecuencia filtro notch.

Amplificación.

Para este proceso volveremos a utilizar el amplificador de instrumentación INA, ya explicado anteriormente, en el que recogeremos la señal que ya ha sido filtrada.



Conversión Analógico-Digital.

Al salir de la última etapa de amplificación, se obtiene una señal analógica con la que se puede trabajar. Pero este tipo de señal no puede ser interpretada por el microcontrolador tal y como sale de la etapa de amplificación. Es por ello, que se debe pasar la señal por un conversor analógico-digital.

Lo que realiza este conversor es convertir el voltaje analógico entrante en palabras binarias. Para ello pasa por tres pasos:

- Muestreo: se hace uso del Teorema de Muestreo o también denominado como Teorema de Nyquist-Shannon. El teorema establece que se puede conservar la totalidad de la información de una señal analógica, generando una sucesión continua de valores de amplitud analógica en instantes de tiempo discretos a partir de una señal continua en amplitud y tiempo. Dicho de otra forma, convertimos una señal en tiempo continuo en una señal en tiempo discreto, la cual se consigue mediante muestras periódicas de la señal continua durante un espacio de tiempo determinado. Por tanto, si tenemos una señal de banda limitada, la frecuencia de muestreo como mínimo debería ser el doble de la frecuencia máxima f_m de la señal.

$$f_s > 2 f_m ; T_s < \frac{1}{2f_m} \quad (19)$$

De la ecuación conseguimos determinar que f_m es la frecuencia de Nyquist (Nyquist frequency) y f_s es la frecuencia de muestreo de Nyquist (Nyquist rate).



- **Cuantificación:** Lo que se realiza en este proceso es la conversión de la señal discreta obtenida anteriormente, en un número finito de niveles de amplitud.
- **Codificación:** este último proceso otorga un valor numérico binario, a los niveles de amplitud representados en la cuantificación.

En este paso debemos tener en cuenta algunos factores, que podrían hacer que aparezcan errores en la conversión, como son: la velocidad de conversión (problema de exactitud en cuanto a la cuantificación), error de cero u offset (desplazamiento de la curva de transferencia de forma horizontal, provocando un error de fondo de escala), error de ganancia (la pendiente de la curva de calibración real y la ideal difieren) o errores de linealidad o no linealidad (teniendo los errores de cero y de ganancia nulos, la máxima desviación entre la curva de transferencia real y la ideal).

4.5.2. Sensor Myoware

Actualmente, podemos encontrar en el mercado una gran variedad de sensores EMG, en los que vienen encapsulados todos los elementos anteriormente mencionados. Uno de los modelos más usados, es el Sensor Muscular Myoware, de la empresa Advancer Technologies.

Se trata de un sensor muy asequible para el consumidor, dado que te ofrece una gran eficiencia a la hora de la realización de proyectos y se trata de un dispositivo cuyo coste ronda los 40€, lo que permite una fácil accesibilidad de adquirirlo por el consumidor.

Tiene muchas aplicaciones como puede ser el campo de los videojuegos, pero es en la rama de la robótica y de la medicina donde adquiere un carácter notable.



Este modelo de sensor muscular permite la conexión directa a un microcontrolador, como puede ser una placa Arduino.

Dada su versatilidad de uso, será la elección preferente de sensor electromiográfico para la realización de la mano biónica.



Figura 35.- Sensor muscular Myoware.

5. Elección de materiales para una mano protésica.

En este apartado comenzaremos a ver qué materiales vamos a utilizar para el proyecto, tanto para la realización de la estructura de la mano como componentes electrónicos.

5.1. Actuadores.

Como bien vimos anteriormente los actuadores son los encargados de realizar la acción de movimiento que transmitirá energía a los dedos



en nuestro caso. Vimos que había una gran variedad, pero para este proyecto utilizaremos servomotores.

- **Servomotores:** Un servomotor es un dispositivo de accionamiento que nos permite tener un control de velocidad, posición y par motor. Se denomina servomotor, a aquel que en su interior tiene un encoder (decodificador), que permite convertir un movimiento como un giro, es decir, un movimiento mecánico, en pulsos digitales que pueden ser interpretados por un controlador de movimiento. A su vez se hace uso de un driver lo que permite tener conocimiento de posición o velocidad. Un servomotor está compuesto por un motor eléctrico (genera el movimiento), un sistema de regulación (formado por engranajes, que permite aumentar o disminuir aspectos como la velocidad), un potenciómetro (nos muestra el ángulo del eje del motor) y un sistema de control (controla el movimiento del motor a partir de señales eléctricas). El sistema de control que contienen muchos servomotores es el sistema de control PID.
- **Sistema de Control PID:** Un control PID consiste en un sistema que permite controlar un sistema en lazo cerrado, para lograr un estado determinado a la salida del lazo. Este sistema se divide en tres secciones:
 - a) **Proporcional:** este apartado del control cumple la misión de minimizar el error del sistema (diferencia entre la referencia, que es el estado que se desea conseguir, y el estado real del sistema). La acción que realiza la parte proporcional es multiplicar el error por una constante, que comúnmente se suele denominar como K_p . Tal y como indica el nombre de la acción de control, se trata de efecto proporcional, dado que si el error del sistema es elevado, esta acción también lo será y como consecuencia habrá una tendencia a minimizar dicho error. Los efectos que lograremos si se aumenta la parte proporcional son el aumento de la velocidad de respuesta del sistema, la disminución del error en



régimen permanente y al mismo tiempo aumentará la inestabilidad del sistema. Por tanto, la idea principal es la de poder conseguir un equilibrio, para obtener una velocidad de respuesta adecuada, así como acortar el error sin que haya una gran inestabilidad en el sistema.

- b) Derivativa: En este caso, la idea de esta acción es la de estabilizar el sistema cuando se hallen grandes oscilaciones en el mismo. Por tanto lo que vamos a controlar en esta ocasión es la velocidad del sistema. Este apartado del control, trabaja con la derivada del error, por lo que si cuando tratamos el error, hablamos de posiciones, la derivada de la posición es la velocidad. Esta sección es importante, dado que al aplicar la acción de control proporcional, el sistema puede llegar a moverse a una velocidad elevada, lo que provoca oscilaciones en torno a la referencia. Es por ello que si se conoce dicha velocidad, el controlador puede ser capaz de frenar previamente y evitar dichas oscilaciones. Si aumentamos la constante de control derivativa K_d , conseguiremos una mayor estabilización del sistema o disminuir en la medida de lo posible la velocidad del mismo. Un problema de esta acción de control es la amplificación de señales con variaciones rápidas como puede ser el ruido de alta frecuencia.
- c) Integral: Si cuando tratábamos la acción de control derivativa, hablábamos de tratar la derivada de la señal de error, en este caso estaremos tratando la integral de esta señal de error. Podríamos determinar brevemente, que dicha integral se puede considerar como la acumulación de la señal de error. Por tanto, con la acción integral conseguiremos disminuir el error en régimen permanente del sistema. Sin embargo, aumentar esta acción de control hace que el sistema adquiera cierta inercia, lo que provoca inestabilidad del mismo y un leve aumento de la velocidad.

En este proyecto vamos a usar concretamente Servomotores SG90. Se trata de uno de los servomotores que presentan mejor versatilidad.



Además el coste de dichos dispositivos es relativamente bajo, por lo que supone una gran opción en función calidad-precio. Los detalles de funcionamiento y dimensiones de los mismos, viene especificado en los anexos[].

5.2. Baterías.

En este apartado se verá la batería recomendable que se debe introducir en la mano para un correcto funcionamiento. Es cierto que podemos realizar la alimentación, desde el propio microcontrolador, pero a la hora de un uso práctico es necesario una batería externa.

Luego para poder realizar la selección de batería lo primero en lo que nos tendremos que fijar es en la hoja de característica del propio microcontrolador. En este caso se ha comprobado que la alimentación del mismo debe establecerse con una tensión entre 7V y 12V y un amperaje entre 750mA y 1.5A.

Si buscamos podemos encontrar en el mercado una gran variedad de productos que cumplan estos requisitos, y habrá que decidir cuál es el más conveniente para nuestro proyecto. En concreto la idea que se desea conseguir es que se pueda usar la mano en cualquier lugar, por lo que debemos buscar batería que sean portátiles.

Por tanto se ha seleccionado que una buena opción para uso en la mano biónica es una batería de litio que proporcione los 750mA necesarios para el correcto funcionamiento.



Figura 36.- Ejemplo de batería externa de 750mA.

5.3. Material de la estructura.

Dado que vamos a realizar la fabricación de la mano protésica a través de la impresión 3D, es necesario utilizar un material de impresión adecuado denominado filamento. Para este proyecto se hará uso del PLA filamento 1.75mm:

- PLA filamento 1.75mm, empresa BQ: el filamento PLA, cuyas siglas significan poli-ácido láctico, es un material muy práctico para realizar las impresiones 3D. Para poder realizar una buena impresión de un objeto, es necesario que se cumplan ciertos requisitos, por ejemplo, cuando se está imprimiendo, las capas que se van formando, deben estar lo suficientemente frías cada vez que el extrusor (cabezal por el cual sale el filamento derretido y se deposita sobre la superficie), pasa depositando filamento derretido sobre la siguiente capa y que se pueda obtener una impresión de calidad, luego, este filamento proporciona una rápida



solidificación durante su utilización. Otras de las características que presenta este material y que supone una gran importancia para la impresión, es la mínima deformación que presenta, es decir, el PLA contiene una deformación por tensión térmica mínima. Sin embargo, una de las cualidades por las que se ha decidido utilizar este material, es porque se trata de un filamento biodegradable. El fabricante BQ, ha diseñado este tipo de filamento sin necesidad de uso de petróleo y se genera mediante la polimerización del ácido láctico proveniente de la fermentación de azúcares derivados de vegetales.

Por tanto, vamos a usar este tipo de material para la estructura de la mano, al propiciarse una buena calidad de impresión, presenta unas buenas características en cuanto a ligereza, esfuerzo y peso, y además contribuimos a minimizar el uso de plásticos, que en el campo protésico tiene una gran relevancia, y por ello contribuimos a la sostenibilidad del planeta.

5.4. Microcontrolador.

Para poder realizar los códigos con los que crearemos los comandos de movimiento de la mano, vamos a utilizar la placa Arduino.

- **Arduino:** se trata de una plataforma dirigida para la creación de electrónica de código abierto, basada en hardware y software libre, flexible y de fácil uso. Por tanto, lo que pretende es poder crear microcontroladores, en el que los usuarios puedan darle diferentes utilidades. Este proyecto nace en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia, en el año 2003, cuya misión era la de dar acceso y uso electrónico y de programación. El resultado final fue Arduino, que trata de una placa con elementos que permite conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador. Se puede programar a través de Windows, Mac o GNU/Linux. El entorno de programación, que se usa para la creación de códigos, que



interactúan con los circuitos de la propia placa, es Arduino IDE. Arduino, presenta una gran variedad de placas, que dependen del uso que cada creador quiera darle, para la realización de sus proyectos. Una de las grandes ventajas que presenta la plataforma Arduino, es que lleva arraigada una filosofía de software libre, lo que permite que los desarrolladores o creadores de códigos, puedan compartir sus proyectos con el resto de la comunidad, de forma gratuita, así como plataformas de ayuda, en la que los propios usuarios pueden resolver entre ellos, los diferentes problemas que puedan encontrarse ya sea con los microcontroladores o con los propios códigos.



Figura 37.- Placa Arduino.

6. Diseño estructural de mano.

En este apartado del proyecto entramos en el diseño estructural de la mano per se. Es cierto, que el auge de la impresión 3D y la facilidad que nos ofrecen formatos de desarrollo del estilo Open Source o Código Abierto, ha revolucionado también el campo de las prótesis, permitiendo que podamos acceder a modelos creados por otros usuarios. Pero para la realización de este proyecto no vamos a hacer uso de dicha idea, puesto



que la realización de un modelo propio, nos permite adquirir mayor conocimiento sobre el funcionamiento de nuestro modelo protésico.

El primer punto a tener en cuenta es tener una idea general de cómo vamos a estructurar cada sección. Seguidamente planificar los pasos a seguir para la fabricación y finalmente crear un modelo inicial.

6.1. Idea inicial.

En apartados anteriores, describimos los diferentes mecanismos utilizados para la realización de movimientos de los dedos. Tras observar ventajas y desventajas de dichos mecanismos, finalmente se decidió hacer uso de un mecanismo de barras, dado que entre todas las opciones, era la que más fiabilidad y eficiencia nos ofrecía.

Llegados a este punto, debemos estudiar cómo vamos a realizar el diseño de barras para ejecutar el movimiento de flexión y extensión de un dedo. Comprobando las opciones, se llegó a un hipótesis inicial de posible diseño:

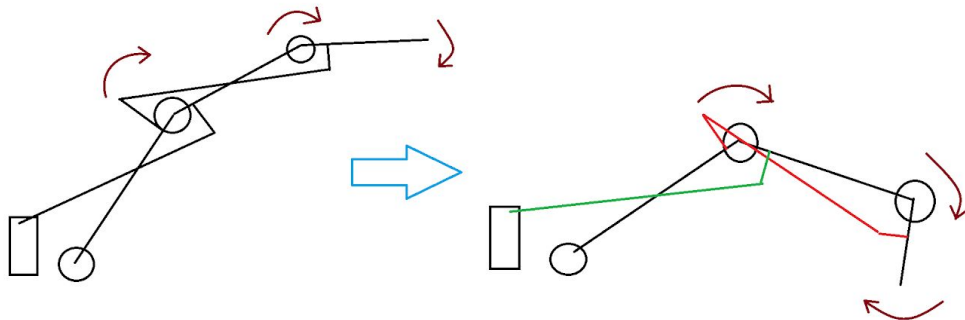


Figura 38.- Croquis del movimiento a realizar por el dedo.

En el diseño hemos querido diseñar el sistema de barras, determinando tres grados de libertad. Tendremos un grado de libertad que rotará sobre su propio eje, pero sin desplazamiento. El segundo grado de libertad y el tercer grado de libertad tendrán movimiento en el espacio, que simularán los movimientos de la falange distal y la falange media. El siguiente punto a tener en cuenta son los ejes de transmisión de movimiento. La función principal de estos ejes son los de guiar el movimiento del dedo.



Principio de Funcionamiento.

La idea inicial es que el origen de la acción motriz suceda en la primera articulación, haciéndolo rotar. Al producirse este movimiento, el extremo opuesto de esta barra con el origen de la segunda barra, que conforman la segunda articulación, comenzará a realizar un movimiento en el espacio X,Y, realizando una trayectoria en forma de arco. Luego, la segunda articulación realiza su función, aparece uno de los ejes de transmisión. Este eje tendrá uno de sus puntos anclados en un punto cercano a la primera articulación y el otro extremo se anclará en la segunda barra. ¿Qué conseguimos con este punto?, pues logramos que con la limitación de longitud que le hemos determinado al eje, hará que cuando la primera barra comience su movimiento, transmite energía motriz al eje y a la segunda barra, siguiendo la trayectoria determinada, pero al llegar a un punto en concreto la trayectoria de la segunda barra, se verá modificada por la del eje, creando el movimiento de la segunda articulación. Visto desde el punto de vista de la mano, se realizará la flexión de la falange media. Al mismo tiempo, que se ejecutan las acciones mencionadas anteriormente también se mueven la tercera articulación y tercera barra. Estas dos seguirán inicialmente la trayectoria seguida por el extremo de la segunda barra, recordemos modificada por la acción de retención del primer eje de transmisión. Luego, para realizar el movimiento de la tercera barra, el funcionamiento sigue el mismo proceso que para el movimiento de la segunda. es decir, en este caso el segundo eje de transmisión deberá ir anclado al extremo final de la primera barra, consiguiendo así que cuando tanto la segunda y tercera barra lleguen a un punto concreto, la limitación de longitud del segundo propiciará la retención de la trayectoria seguida inicialmente por la tercera barra, y por consiguiente, se produce la acción de rotación de la tercera articulación. Luego, podemos concluir que el principio de funcionamiento del dedo para la flexión consiste en un movimiento de rotación inicial y la retención mediante ejes de las barras.

Para la extensión, la rotación de la articulación inicial deberá rotar en dirección contraria a la de flexión. Luego, cuando se inicie dicho movimiento, la primera barra seguirá la trayectoria en forma de arco inicial y llegados a cierto punto, el eje de transmisión inicial empujará a la segunda barra hasta llegar a su posición inicial y lo mismo sucederá entre



la segunda barra, la tercera barra y el segundo eje, hasta que finalmente se complete la extensión del mismo.

Prototipado.

Para llevar a cabo la idea del mecanismo de barras, explicado anteriormente, lo llevamos a la práctica. Mediante un croquis diseñamos las diferentes barras y los diferentes ejes, y teniendo unas medidas aproximadas de estos, los fabricamos a partir de corcho reciclado. Para la unión de los diferentes puntos de sujeción, se hizo uso de pequeños clavos, los cuales permitían mantener de forma estable la estructura, además de permitir la rotación de las diferentes secciones.



Figura 39.- Práctica con piezas que conforman el dedo a partir de corcho

Aunque de forma simple, pero efectiva, podemos observar que el principio de funcionamiento, a nivel práctico, se podía realizar.

6.2. Diseño en 3D.

Una vez planteado el funcionamiento del dedo, en cuanto a mecanismo, se procede al diseño en 3D. Lo principal en este punto es la



selección de un programa de diseño gráfico en 3D que nos permita realizar nuestro modelo.

Tinkercad

Se trata de un software CAD online, que incluye herramientas de software de Autodesk. Permite la creación de modelos gráficos relativamente complejos, a partir de estructuras sólidas simples, por lo que da oportunidad a usuarios principiantes en el modelado 3D, en crear diferentes proyectos. Nos permite a su vez poder descargar el diseño para la impresión en 3D del mismo.

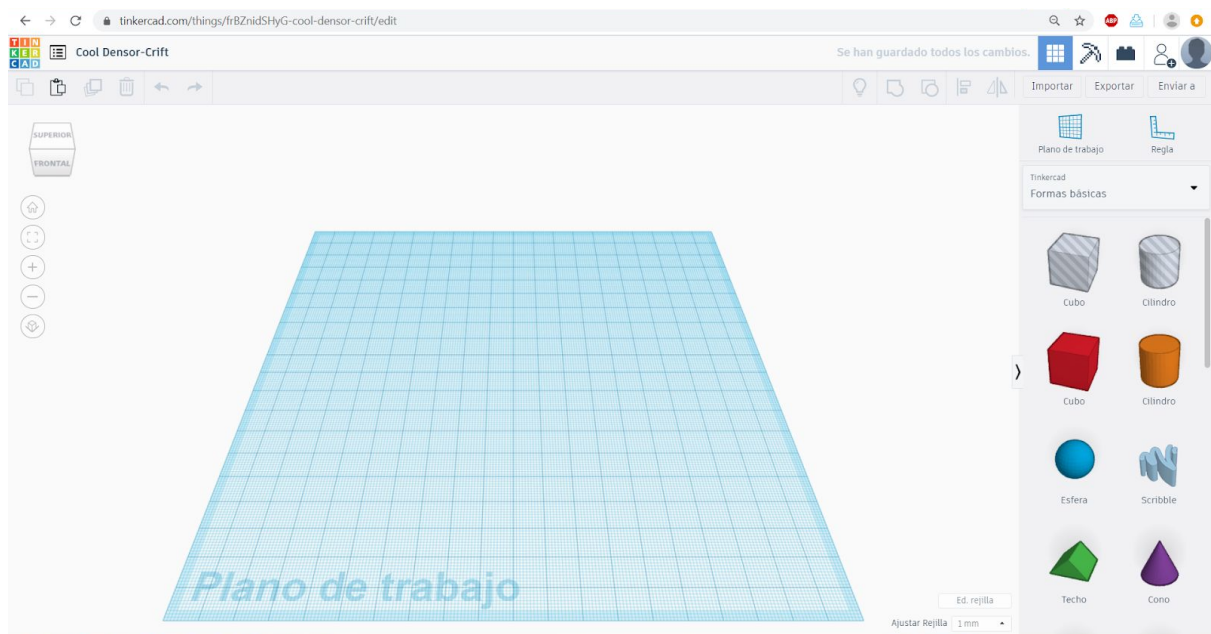


Figura 40.- Plano de trabajo de Tinkercad.

Dada sus sencillez y fácil entendimiento se comenzó a hacer un prototipo en de la mano en 3D.

Lo principal era la familiarización con el programa para el desarrollo del dedo. Una vez se llegó a este punto, se comenzó a desarrollar el dedo a partir del croquis inicial para comprobar que podía funcionar.

Primer prototipo 3D

La idea inicial para este prototipo era la de plasmar exactamente la misma idea planteada inicialmente con el corcho, pero aportándole



volumen. Durante el diseño se procedió a introducir en la misma posición los puntos de unión de los mecanismos de accionamiento y en las secciones que simulan las articulaciones, introducir una zona con forma circular donde estas piezas pudieran rotar. Los mecanismos de accionamiento de movimiento, irían en alguno de los laterales.

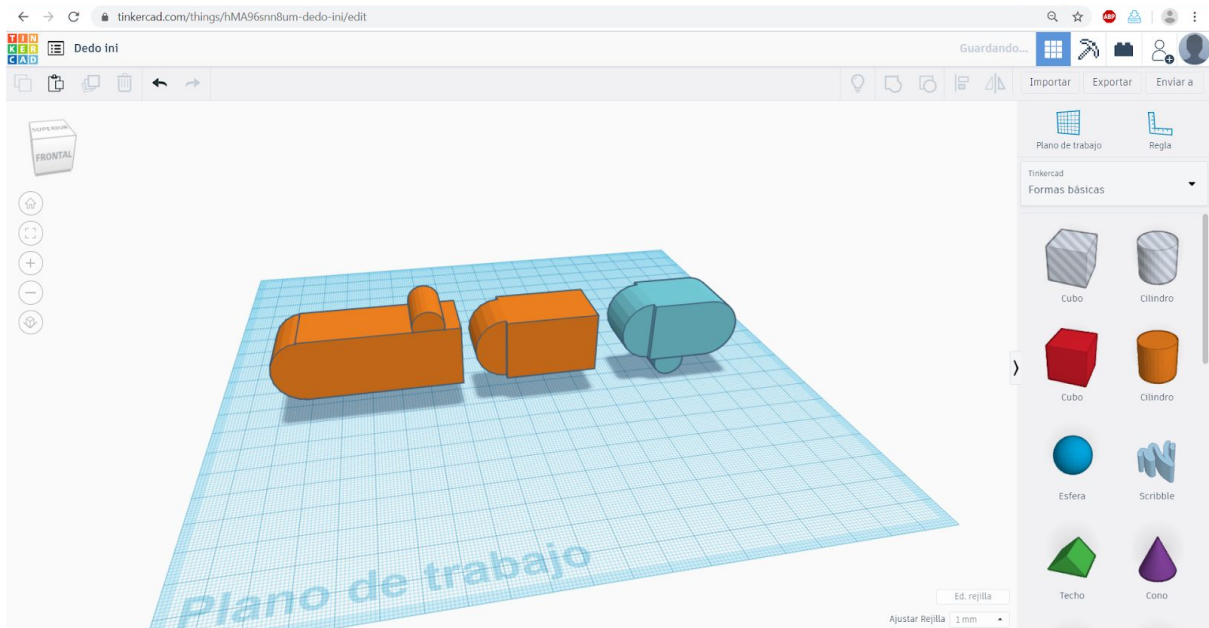


Figura 41.- Primer prototipo

En este primer prototipo, hubo una serie de dificultades. Una vez ensamblado el dispositivo, las zonas curvas no cumplían su función de permitir la rotación, dado que cuando se intentaba ejecutar el movimiento, se producía un rozamiento excesivo entre las paredes de las dos falanges, imposibilitando así el movimiento. Otra de las problemáticas, era qué elemento usar de sujeción entre las diferentes secciones. La idea principal era hacer uso de pasadores para la sujeción de las piezas, pero debido a la situación en la que nos encontrábamos en referente a la pandemia COVID-19, no había disponibilidad de acceder a ferreterías donde encontrar estos pasadores, por lo que de forma provisional se procedió a seguir usando los clavos. Esta idea, permitía la unión de las diferentes secciones, pero presentaba muy poca robustez y una estructura muy endeble.

Teniendo todos estos puntos en cuenta se continuó con el proceso de mejoras del diseño.



Segundo prototipo 3D.

Para este segundo prototipo, lo primero que se realizó fue eliminar esas secciones curvas de las articulaciones. Luego, la idea era continuar con la idea de tener una especie de conexión macho hembra, donde introducir la sección inicial de una de las piezas en la sección final de la anterior. Por tanto, el planteamiento era la de abrir secciones y dejar zonas huecas, por las que pudieran pasar las piezas sin rozar.

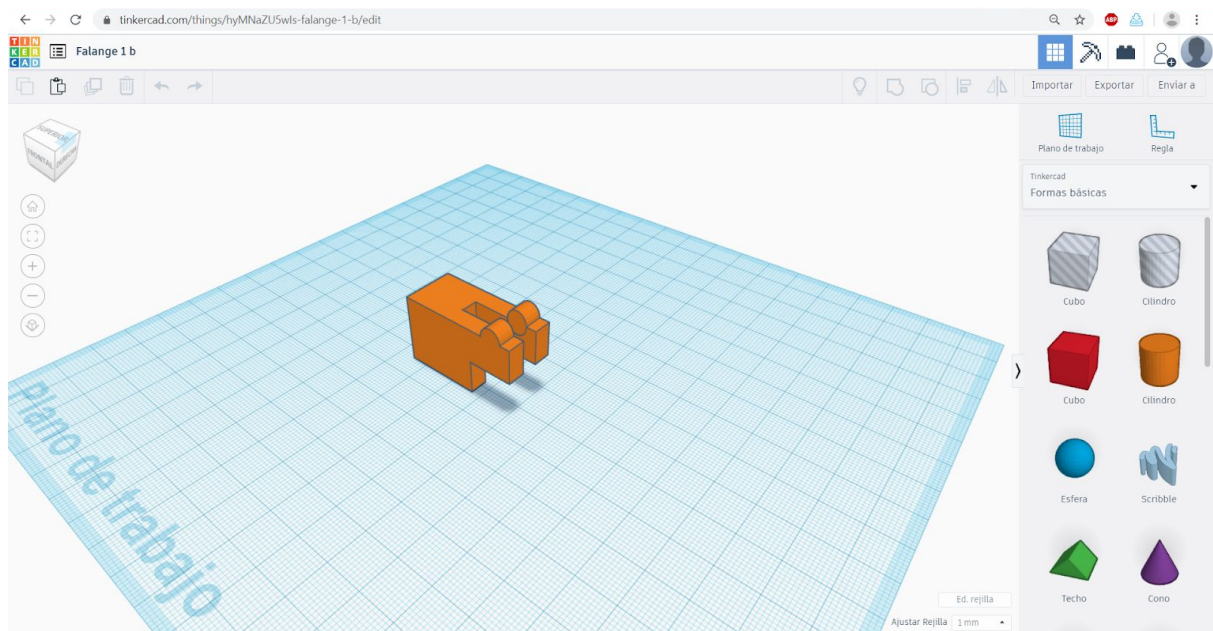


Figura 42.- Primera falange del segundo prototipo.

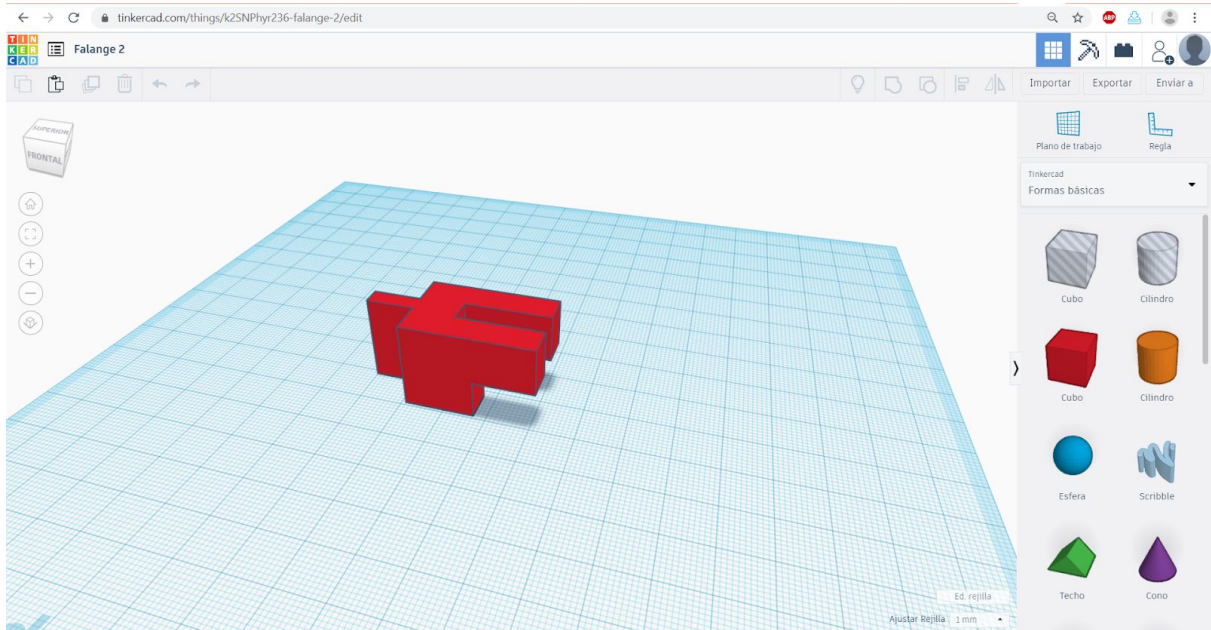


Figura 43.- Segunda falange del segundo prototipo.

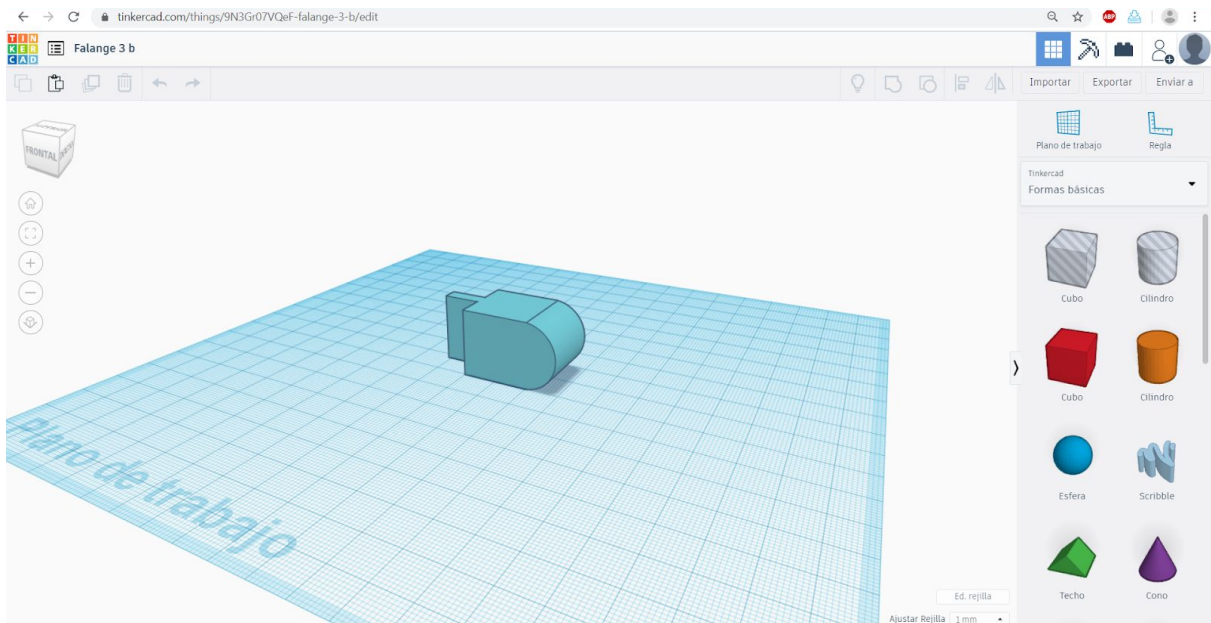


Figura 44.- Tercera falange del segundo prototipo.

Esta idea, favoreció al movimiento de la pieza, aunque por las dimensiones cuadradas, había secciones que rozaban al llegar a una posición determinada. Además en los puntos de unión con los ejes de movimiento, se producía un excesivo contacto que dificultaba el movimiento. Otro punto en cuestión fue el referente a los ejes, dado que



al usar los dos ejes por un lateral del dedo, se debía ejercer demasiada fuerza para moverlo.

Tercer prototipo 3D

Para este tercer prototipo, la idea fue la de corregir los puntos en los que se comprobó rozamiento de piezas. En las piezas principales, el planteamiento fue el de abrir más espacio, por lo que eliminamos porciones de algunas zonas de las piezas. En cuanto a las uniones con los ejes, estos puntos se desplazaron, para evitar el contacto, por lo que las dimensiones de los ejes también se vieron afectadas.

Seguidamente se diseñó un soporte en el que poder hacer una prueba, de todo el movimiento.

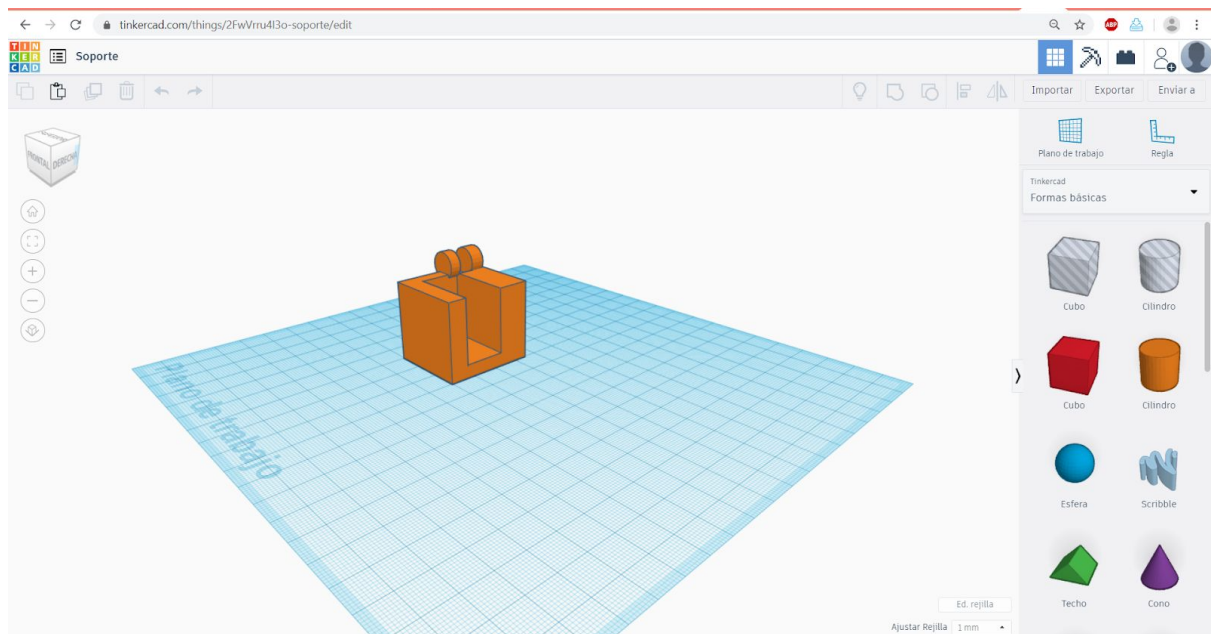


Figura 45.- Soporte dedo.

Las mejoras incorporadas, cumplieron su función. Al realizar las modificaciones en las piezas, evitamos el exceso de rozamiento y permitiendo así mayor libertad de movimiento. En cuanto al soporte, nos mostró varios puntos a tener en cuenta. El primero fue, que el rango de movimiento del dedo se veía afectado por el primer eje, dado que cuando alcanzaba su posición horizontal, chocaba con el soporte, impidiendo así un movimiento completo del dedo. El segundo punto a tener en cuenta,



ya fue planteado en el segundo prototipo, y es el relacionado con la fuerza ejercida al tener solo los ejes en un lateral, y es que al tenerlo de esta forma se debe ejercer demasiada fuerza para efectuar el movimiento.

Manteniendo el diseño del dedo, procedimos a efectuar cambios en el soporte. En este caso, se abrió hueco en el soporte a lo largo de la trayectoria del movimiento del eje y además colocamos ejes en ambos laterales del dedo.

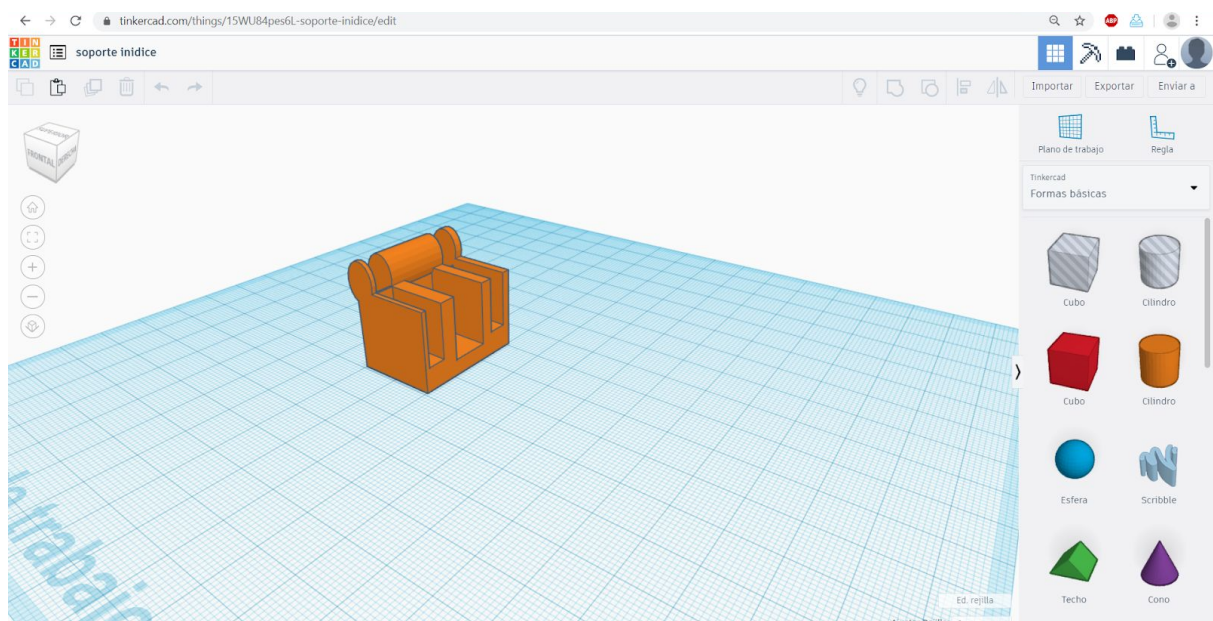


Figura 46.- Segundo prototipo soporte dedo.

Con esta idea, comprobamos que mejoraba el movimiento del dedo. Pero pensando en cómo poder llevar esta idea a la práctica, es decir, a la mano general, presentaba muchas dudas. Primero el espacio que ocupaba todo el dispositivo, puesto que si lo llevábamos a la práctica, quedaría una mano excesivamente grande y donde se incumplirían dimensiones antropomórficas. Otro inconveniente hallado, era el uso práctico de esta idea, porque cuando el dedo se flexionaba, los ejes sobrepasaban a las secciones principales que son las falanges, luego si la idea es poder manipular objetos, no se podría llevar a cabo dado que los ejes impedirían la sujeción de los mismos.



Cuarto prototipo 3D

Para la realización de este cuarto prototipo se pensó en cómo llevar la idea principal a la práctica. Se debía corregir la problemática de los ejes del tercer prototipo y la idea encontrada era la de usar tan solo dos ejes de transmisión, es decir, el eje de movimiento de la segunda falange y el eje de movimiento de la tercera falange, e introducirlo a través del dedo. Lo que se plantea por tanto es, dejar zonas huecas en las falanges por las que puedan pasar los ejes. A partir de esta idea, hubo que cambiar ciertas secciones del diseño del dedo, como los puntos de unión entre las falanges y las uniones entre ejes y falanges. Otra modificación a efectuar era la forma de los ejes, dado que al atravesar el dedo podría rozar las paredes internas de las falanges incluso chocar entre ejes.

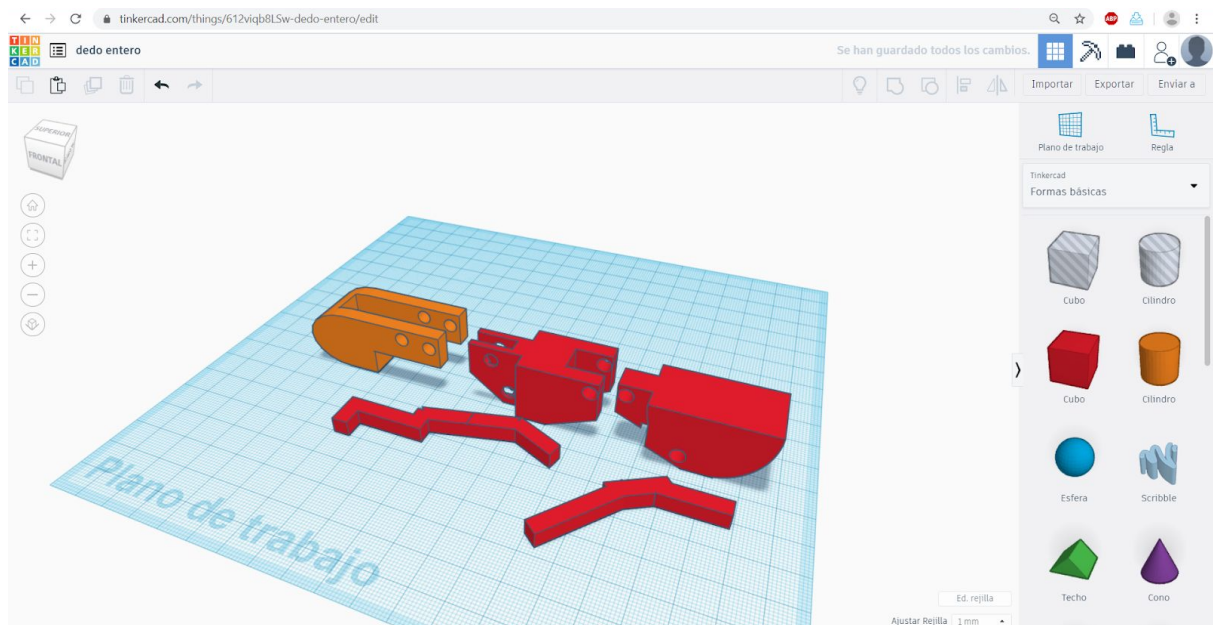


Figura 47.- Cuarto prototipo.

Una vez impreso y ensamblado este prototipo, se comprobó que la idea era posible. Se podía realizar el movimiento con mejor soltura y menos esfuerzo. Sin embargo, hubo problemas con varios puntos. La forma de los ejes, se tuvo que variar para impedir que hubiera contacto entre ellos. A su vez, la forma que tenía ciertas secciones del dedo, eran demasiado finas, por lo que hacían que la estructura fuera endeble, y si se esforzaba demasiado el dedo estos terminaban por partirse.



Quinto prototipo 3D

Lo que se quiso en este prototipo es unificar todas las ideas de mejora anteriormente mencionadas y resolverlas. Para ello se realizaron estructuras más sólidas, además de secciones con curvas en los laterales para que a medida que se realiza el movimiento, las falanges puedan moverse sin rozar unas con otras.

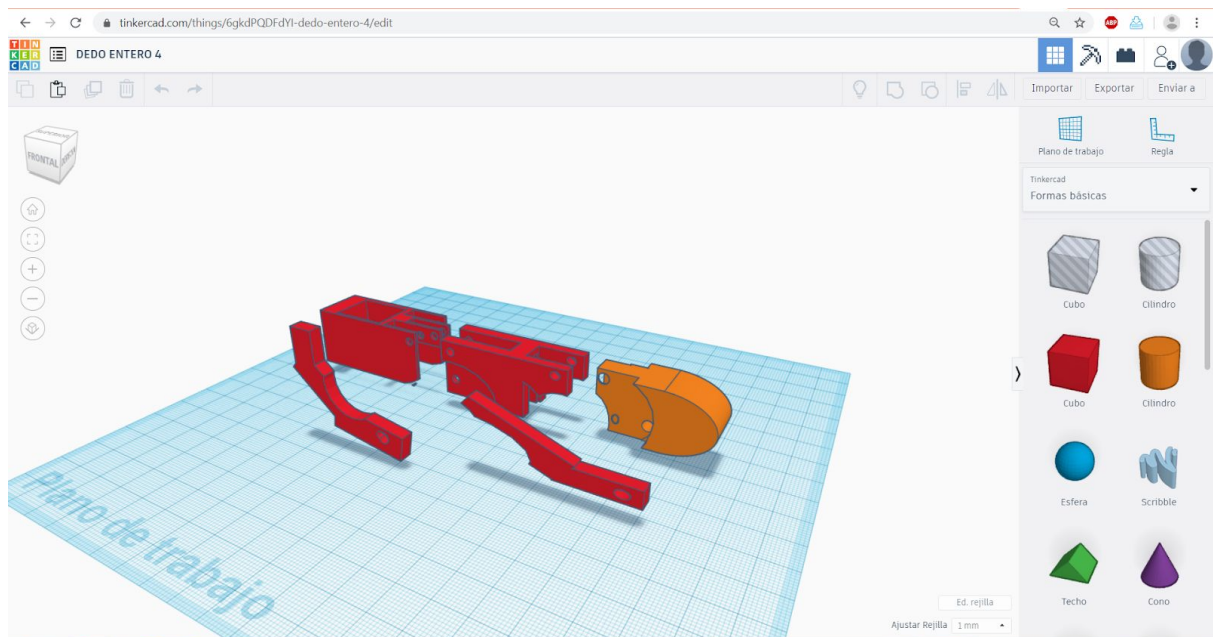


Figura 48.- Quinto prototipo.

Llegados a este punto y con la comprobación de buen funcionamiento, era momento de aportar un diseño más parecido a un dedo real.

Sexto prototipo 3D y diseño final

Este va a ser nuestro diseño final para los dedos índice, corazón, anular y meñique. Se ha mantenido la idea del quinto prototipo, al que se



le ha dado un diseño más similar a un dedo real, tanto en forma como en dimensiones.

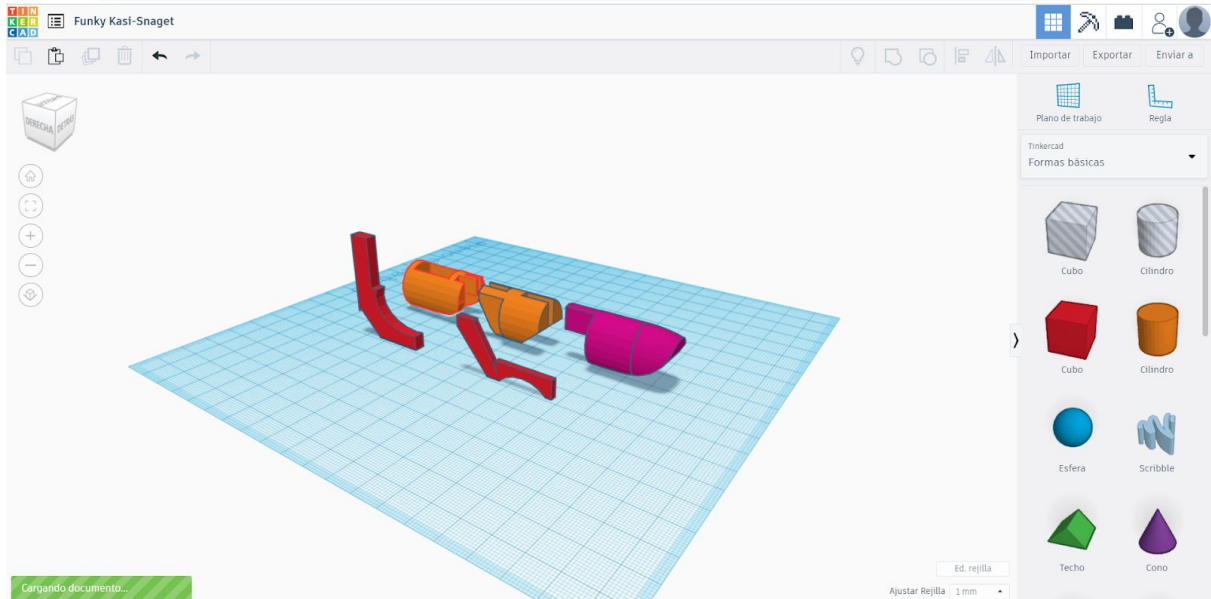


Figura 49.- Diseño final del dedo.

A la hora de imprimir los dedos, los haremos todos iguales a excepción del meñique el cual debemos reducirlo un 20% de su tamaño original. Para ello cuando usemos el programa de impresión, en este caso será el software Ultimaker Cura, debemos seleccionar el objeto, seleccionar la opción de escala y dimensionar el conjunto del dedo al 80%.

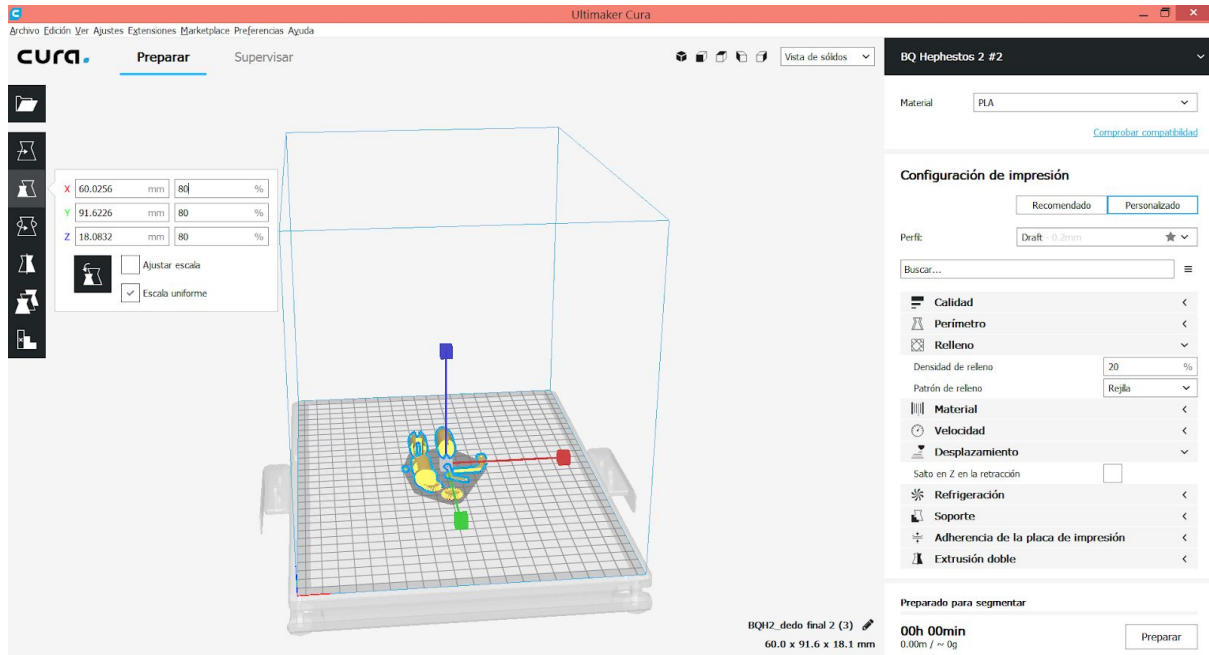


Figura 50.- Pantalla del programa Cura de impresión 3D.

Transmisión de energía desde el servomotor al dedo.

Una vez finalizado el funcionamiento del dedo, era necesario establecer un método que pudiera transmitir el movimiento del servomotor hacia el dedo. La mejor forma para poder controlar el movimiento y además que la carga no fuera tan grande para el servomotor, era la de introducir un engranaje o también denominado ruedas dentadas. Dentro de las variedades que existen, escogimos dos tipos para comprobar cuál era el más conveniente y el que proporcionaba más eficiencia.

Engranaje cilíndrico de dientes rectos

Es un tipo de engranaje compuesto por dos ruedas cilíndricas cuyos dientes se encuentran de forma paralela al eje de giro, es decir, sus dientes están colocados de forma recta. Este tipo de engranaje se usa para transmitir movimiento entre dos piezas cuyos ejes se encuentran paralelos entre ellos.



Engranaje cónico de dientes rectos

Este caso de engranaje dispone dos ruedas cónicas, cuyos ejes están dispuestos de forma perpendicular entre ambas. Los dientes, al igual que en el engranaje cilíndrico de dientes rectos, se disponen de forma paralela a la superficie y de forma recta, por lo que adopta con el conjunto una forma cónica.

Llegado este punto pudimos comprobar que los dos tipos de engranajes, eran adecuados para nuestro sistema. Sin embargo, el engranaje cónico de dientes rectos, presentaba una ventaja respecto al otro sistema, y era el espacio que debía ocupar el servomotor en la zona palmar de la mano para el funcionamiento. Con el engranaje cilíndrico, la colocación de todos los dispositivos, haría ocupar demasiado espacio en la mano, mientras que con el engranaje cónico, reducimos este problema simbólicamente.



Figura 51.- Ejemplos de engranaje cónico de dientes rectos y engranaje cilíndrico de dientes rectos.

Luego la idea era mantener una de las ruedas cónicas en el servomotor y la otra en el extremo fijo de la primera barra del mecanismo del dedo. Abstrayéndonos a la idea de la mano humana, este punto en concreto, sería la articulación que une la palma de la mano y la falange proximal.

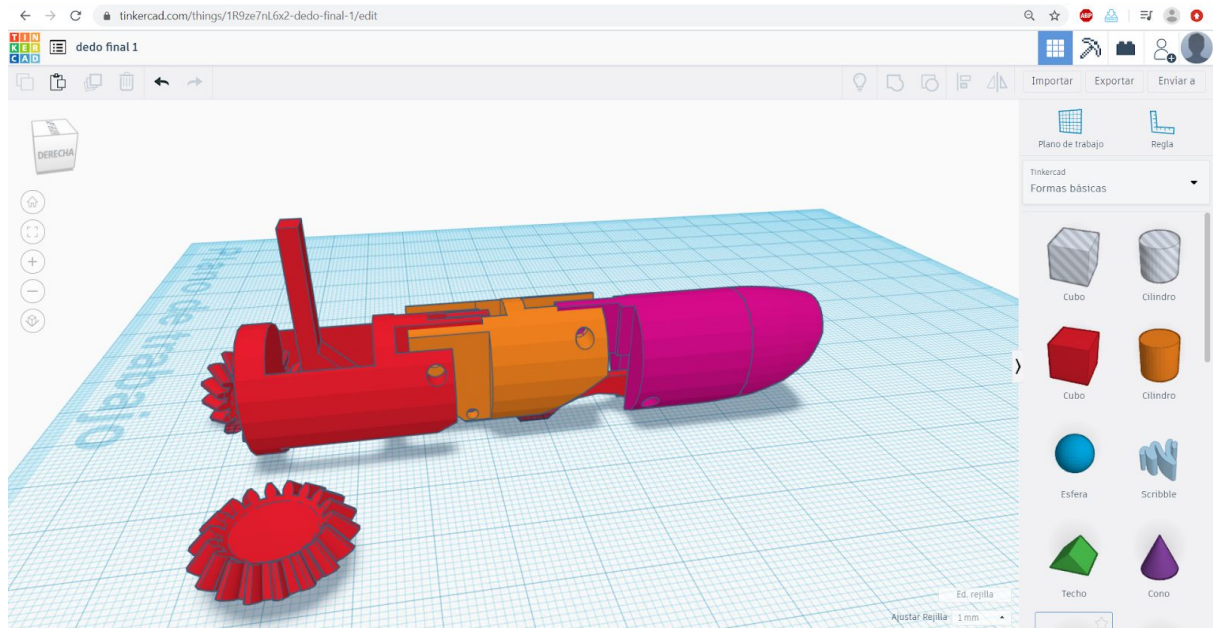


Figura 52.- Dedo completo con engranaje cónico de dientes rectos.

Diseño del pulgar.

Una vez diseñados los demás dedos y cuál iba a ser el engranaje para el movimiento del mismo, se tuvo que pensar cómo iba a ser la forma del dedo pulgar. La peculiaridad de esta parte es que este dedo es oponible, por tanto podemos decir que esta sección realiza dos movimientos extra a los demás dedos, dado que puede flexionarse y estirarse, además de oponerse a los demás dedos y retroceder hasta su estado inicial.

Llegados a este punto se tomó la decisión de mantener el diseño del prototipo de los demás dedos para realizar los movimientos de flexión y estiramiento. Y para el movimiento de oposición, se introduciría un servomotor que movería el dedo desde una posición inicial hasta un punto concreto, donde se efectuaría el movimiento de flexión del dedo para así oponerse a los demás dedos.

Si concretamos en el diseño del pulgar, este a diferencia de los demás dedos está compuesto por dos falanges tan solo. Por tanto



para poder efectuar el movimiento de dicho dedo, haremos uso de dos falanges y un eje de transmisión. En cuanto al engranaje se mantendrá el mismo usado para los demás dedos.

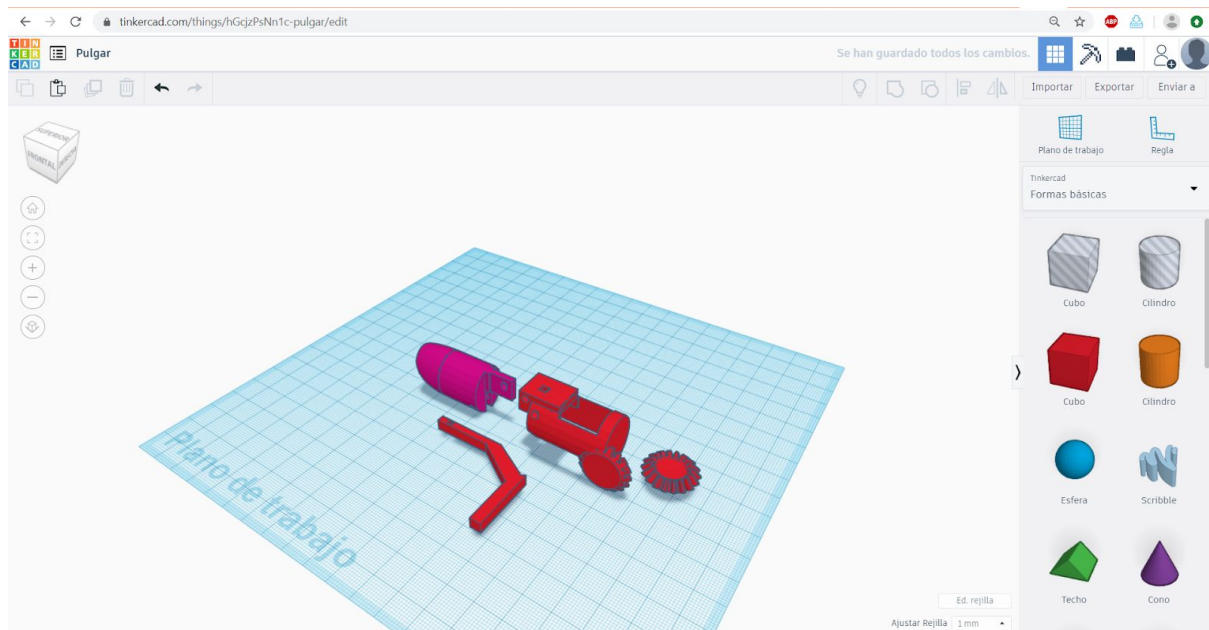


Figura 53.- Diseño dedo pulgar.

Diseño de la palma.

Para este punto lo que tendremos que tener en cuenta es el espacio necesario para los dispositivos que irán en su interior, que básicamente serán los servomotores. Pero debemos tener en cuenta también que para conseguir un resultado más realista, podremos conseguir que el pulgar, como el de la mano humana, sea oponible. Esto lo conseguiremos si una porción de la mano puede doblarse. Luego el diseño se basará, en realizar una palma en la que quepan 6 servomotores, y que ello no suponga obtener una mano de grandes dimensiones.

Dividiremos el diseño de la palma en dos secciones. La primera será la parte inferior, donde irán colocados los dedos índice, corazón, anular y meñique, además de los servomotores que mueven los mismos. Y la segunda parte será la parte superior, que servirá como carcas de



protección de los servomotores y además nos proporcionará el área para introducir el pulgar.

Parte inferior de la palma

Para el diseño de esta parte de la mano, se decidió coger una superficie plana y rectangular. Si hacemos hincapié en la antropometría de la mano, los dedos colocados en la parte superior de la mano, están colocados de tal forma que se crea una ligera curva. Por tanto, para esta sección cogimos unas medidas estándar de una mano para el espacio donde irán colocados los dedos. Dispondremos dichos dedos en diferentes niveles de altura. Al estar simulando una mano derecha, si ponemos la palma vista hacia arriba, y de izquierda a derecha tendremos primero el meñique en el nivel más bajo, seguidamente el anular que será el tercer nivel más alto, a continuación el espacio del dedo corazón que supondrá el nivel más alto y por último el espacio para el índice que será el segundo más alto.

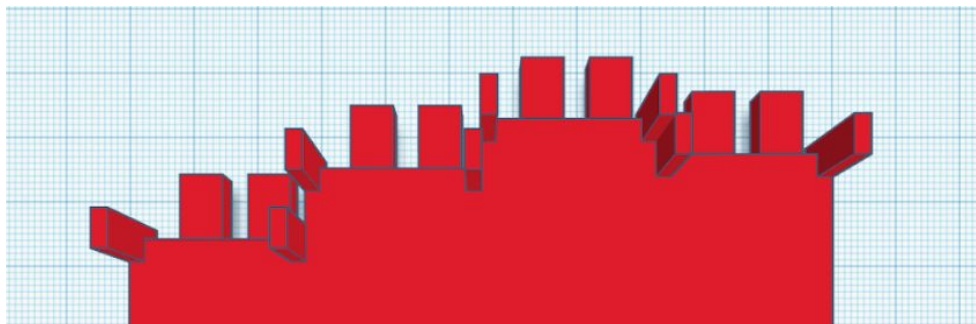


Figura 54.- Soportes de la palma inferior vista alza.

Una vez implementados los espacios para los dedos tendremos que colocar diferentes soportes de sujeción para los dedos. Tendremos que colocar por cada dedo, dos pares de soportes. Dos estarán dispuestos de forma horizontal, que son los que sujetarán el dedo y además será el eje que hará que la pieza rote sobre él, y los otros dos se colocarán verticalmente para la sujeción del eje de transmisión de flexión del dedo.

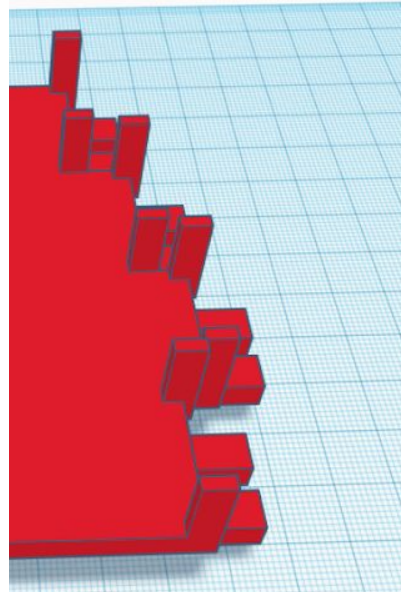


Figura 55.- Soportes de la palma inferior vista lateral.

Por último para el primer prototipo de palma inferior de la mano, se colocaron unas bases, donde se pondrían los servomotores. Sin embargo, se descartó esta idea porque no había forma de sujetar correctamente los servomotores. Por tanto se decidió crear un soporte externo para el servomotor. De tal forma, conseguimos sostener de forma correcta el servomotor. Para el diseño de estos soportes se midió de forma precisa el contorno del servomotor, para que en el momento de introducir el servomotor dentro del soporte encajase perfectamente, además dejamos un espacio en el soporte que nos permite atornillar el servomotor al soporte lo que supone una mejor sujeción. Por último, dejamos un espacio para poder pasar los cables del servomotor a través del soporte y una sección sobresaliente del soporte que será la que se introduce en el interior de la palma, por tanto esta sección es la que une el soporte con la mano. Teniendo esta idea, posteriormente durante el ensamblaje se tendrán que hacer unos huecos para introducir estos soportes, por lo que se tendrán que hacer mediciones para hacer coincidir el servomotor con el engranaje del dedo.

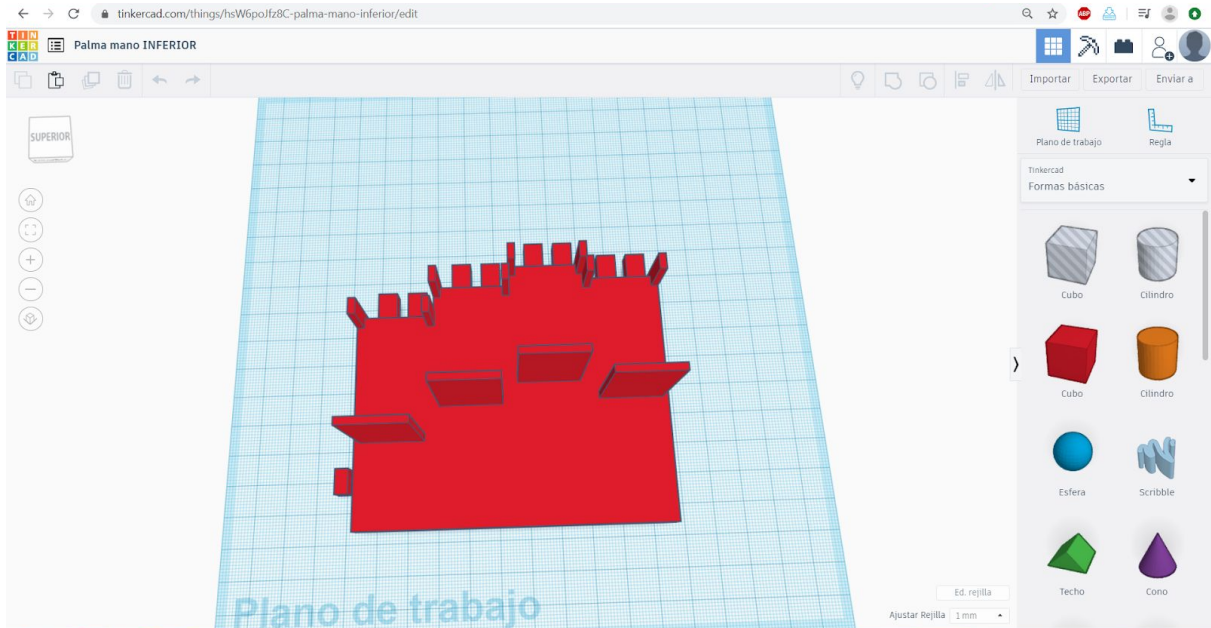


Figura 56.- Palma inferior.

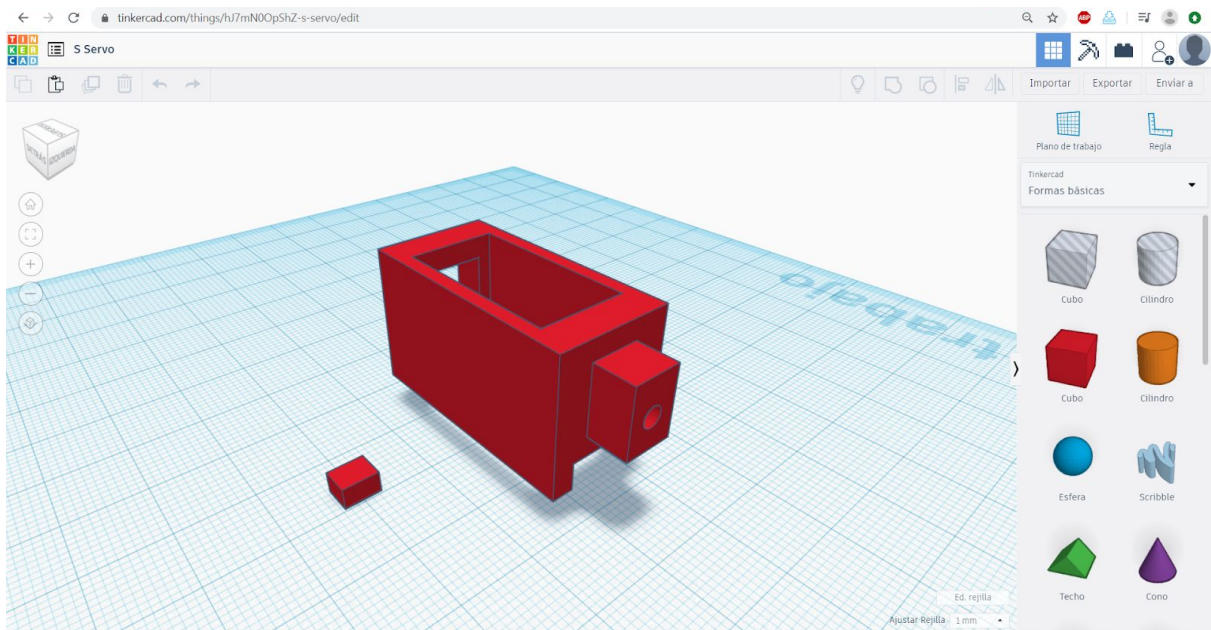


Figura 57.- Soportes servomotores.

Parte superior de la palma

Como comentamos anteriormente, esta sección de la palma servirá como carcasa de los servomotores que controlan los dedos desde el



índice hasta el meñique. Además será la sección responsable de hacer posible que el pulgar pueda ser oponible.

Tomando estas ideas principales nuestro diseño deberá cubrir los servomotores, no deberá bloquear la trayectoria de los dedos y se deberá dejar un espacio para que el pulgar pueda moverse.

Para ello hemos cogido principalmente el modelo de la palma inferior y sobre ella hemos dado volumen y forma a la carcasa, con lo que conseguiremos cubrir los servomotores.

Luego para el pulgar oponible, hemos dejado el espacio para el servomotor que moverá el pulgar. La idea para realizar este movimiento es introducir el cabezal rotatorio del servomotor en una sección de la palma superior, lo que conseguiremos es que, cuando el servomotor actúe, el cabezal debe girar pero como este se encuentra introducido en el interior del agujero, provocará el movimiento del resto del servomotor que será el que esté anclado al pulgar.

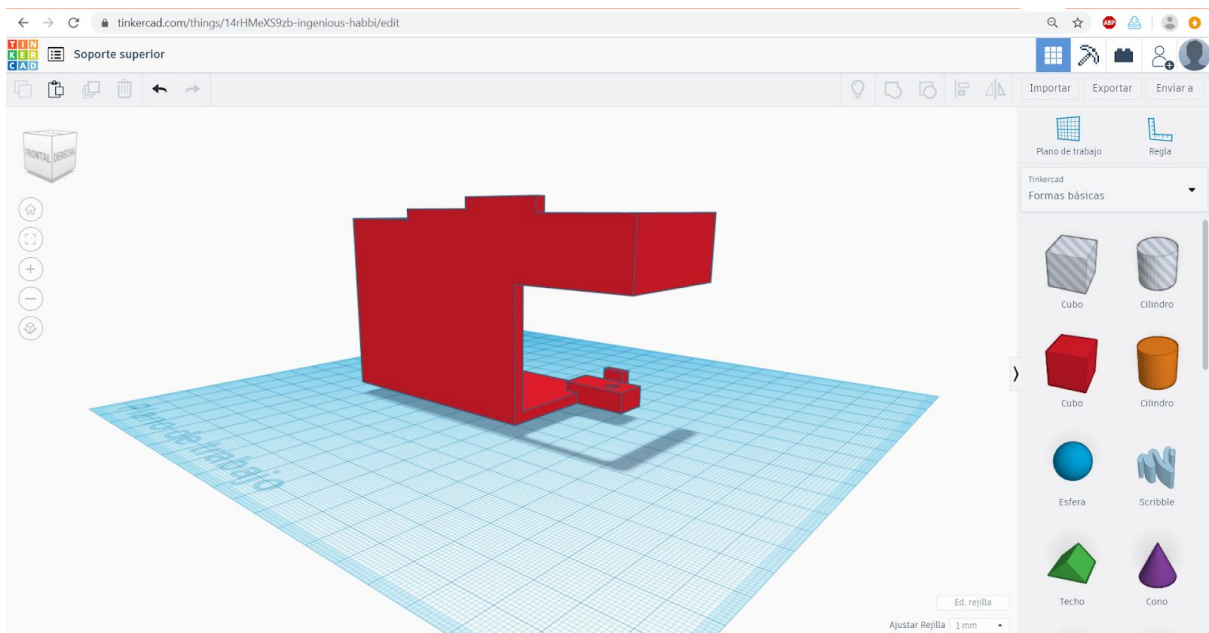


Figura 58.- Palma superior vista delantera.

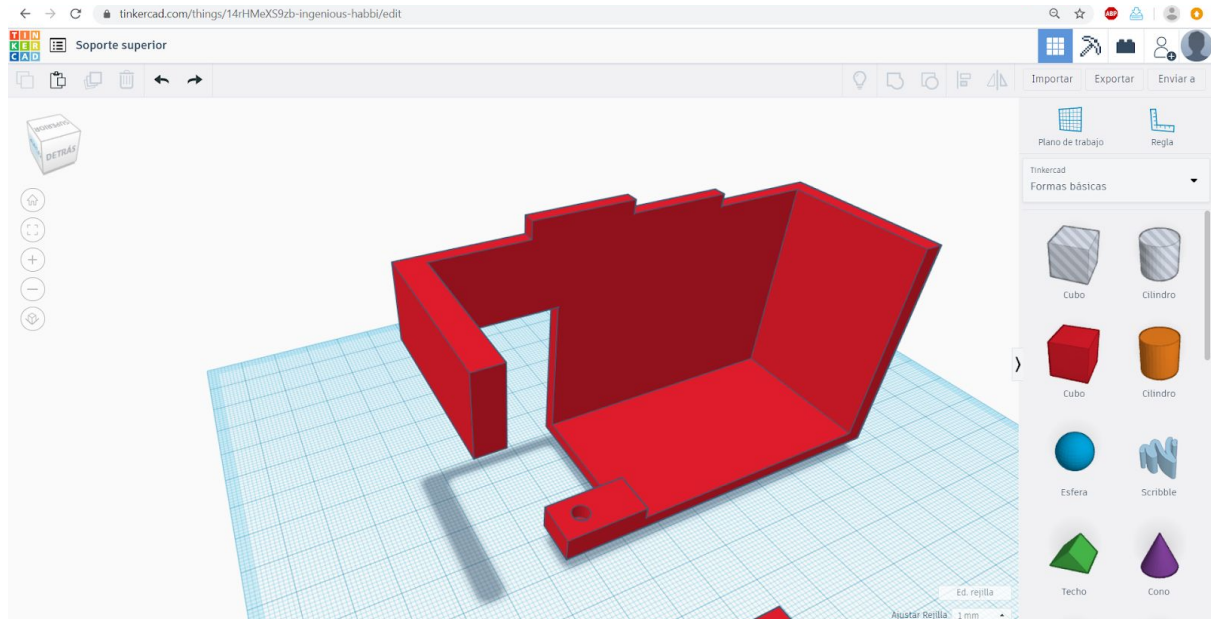


Figura 59.- Palma superior vista trasera.

Diseño soporte del pulgar.

Una vez planteada la idea para poder realizar el movimiento de oposición del dedo pulgar, era necesario realizar el soporte para poder introducir dicho dedo. Hay que recordar que el movimiento del pulgar lo podemos dividir en dos fase, la primera sería la de oposición y la segunda sería la de flexión y extensión del propio dedo. Es por ello, por lo que, como ya se comentó en el apartado anterior del diseño de la parte superior de la palma, este soporte que se diseñará debe moverse.

A través de la experiencia vivida a lo largo del diseño se han establecidos ciertos cambios a diferencia de los anteriores diseños. Uno de ellos es el de establecer como fijos los soportes para los servomotores, es decir, no tendremos que ajustarlos manualmente porque ya están adheridos a la propia base. Otro cambio es la de establecer los huecos para introducir los remaches de ajustes del dedo con el soporte.

A la hora de comenzar el diseño, establecimos, como se hicieron en los diseños anteriores, unas medidas lo más ajustadas a la antropometría de una mano estándar. A continuación planteamos una base sobre la cual introducimos dos soportes de servomotor. Uno de ellos dispuesto de tal



forma, que se pudiera realizar la unión con la sección a la que debe estar unida con la palma superior y la otra orientada hacia el movimiento del propio dedo. Seguidamente introducimos los soportes para el pulgar. Dada las variaciones en algunos aspectos del diseño general, se decidió medir de forma exhaustiva las dimensiones del eje de movimiento para el dedo pulgar, por lo que lo incluimos en el diseño del soporte.

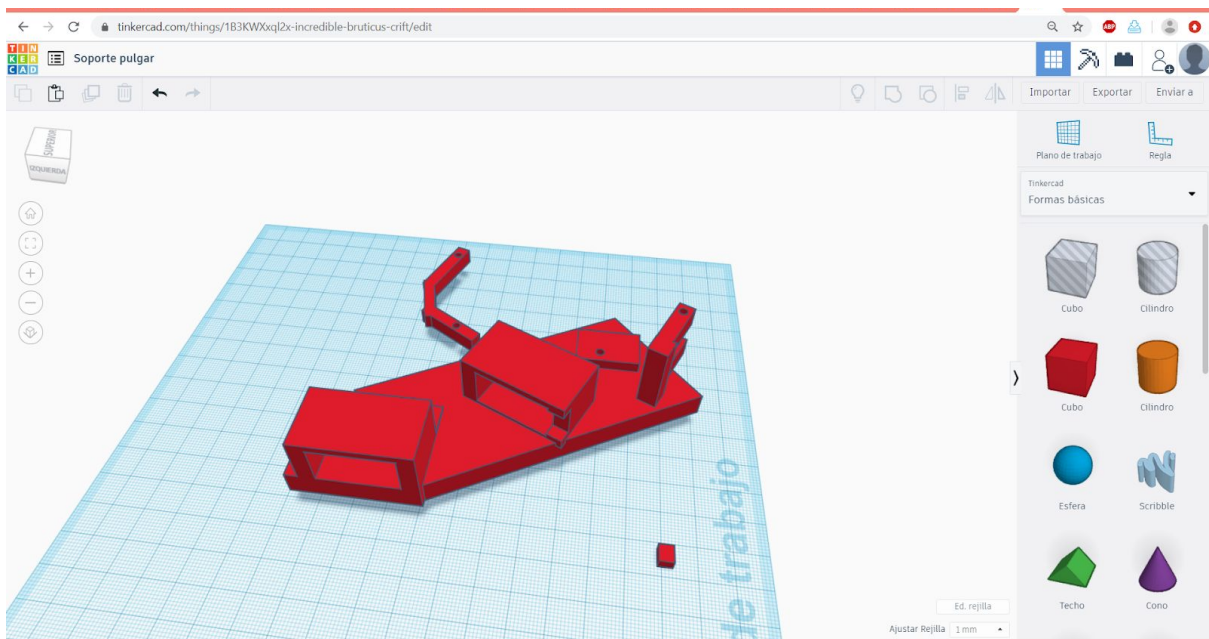


Figura 60.- Parte oponible del pulgar.

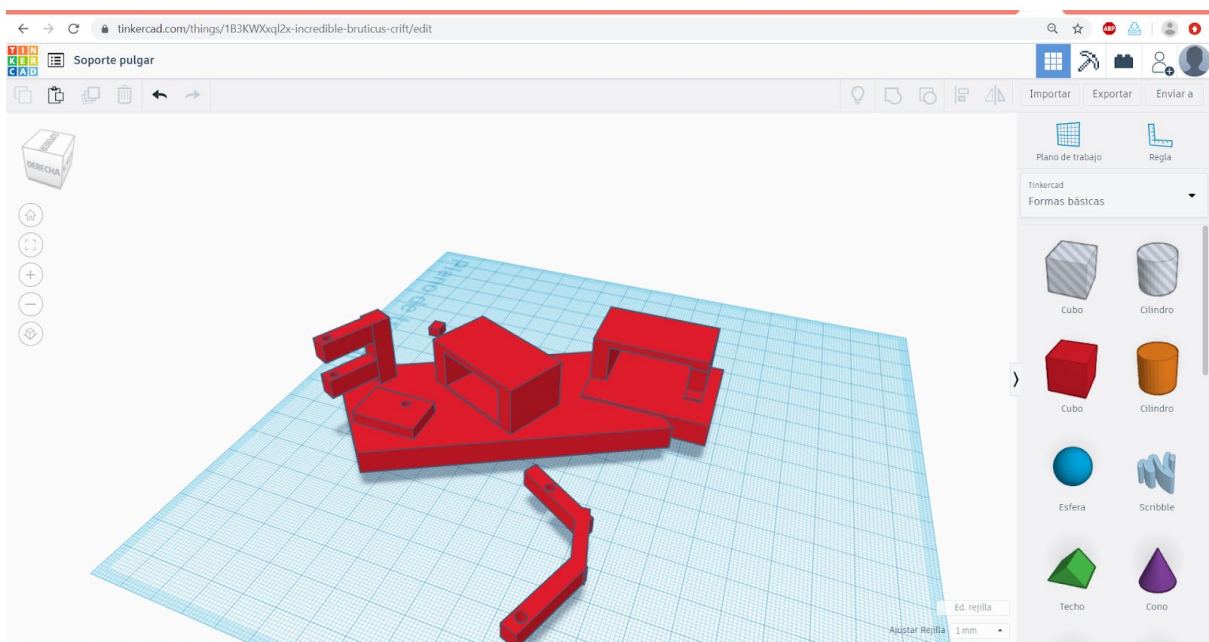


Figura 61.- Parte oponible del pulgar otra vista.



Tras su impresión se comprobaron dos cuestiones que se tuvieron que modificar. El primer punto a tener en cuenta fue los soportes de los servomotores, los cuales impedían que se pudiera meter los mismos, por lo que se optó por tener soportes que no fueran estáticos, este punto se verá más adelante en el ensamblaje. Y la segunda modificación llevada a cabo fue en la forma del soporte, en su área inferior, más concretamente cercano a los servomotores. Esto se produjo porque al realizar la comprobación con la parte superior de la palma, en el momento de giro, ambos chocaban, pero se resolvió cortando la sección que chocaba y conseguimos realizar el movimiento de oposición.

7. Diseño de código.

Planteamiento inicial

Para poder realizar el movimiento propio de la mano, es necesario la realización de un código, que plantee la actuación o el trabajo que se va a realizar. Previamente se ha mencionado el uso del entorno de desarrollo de Arduino, para la realización de dicho código. Por tanto, teniendo dicho entorno de trabajo, debemos comenzar a familiarizarnos con el programa, para poder desarrollar de forma correcta el código.

Inicialmente debíamos comprender cómo es la estructura del entorno. Podemos determinar que se divide en tres secciones: una primera parte declarativa, una segunda sección de inicialización y una tercera parte de ejecución del trabajo en bucle.

1. Declarativa: En esta primera sección estructural del código, debemos incluir las librerías que se harán uso, debemos definir los periféricos de entrada y salida de nuestro proyecto y declarar a qué pines del microcontrolador se han conectado estos periféricos.
2. Inicialización: La segunda área de trabajo comienza en Arduino a partir de la llamada void setup {}. En este punto, se especifica el sistema de arranque del programa, es decir, se determina el comando a ejecutar al comienzo. Una vez se inicializa el programa



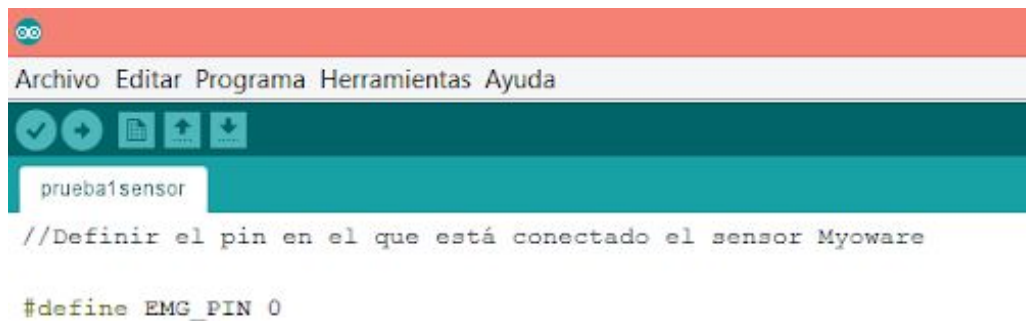
esta sección, no se ejecuta más, es decir, tan solo se ejecuta una vez.

3. Ejecución en bucle: Esta tercera parte del código comienza con la llamada void loop {} y es en este punto en el cual, se introducen los comandos que conforman la función principal del programa.

Esta plataforma, al ser de tipo software libre, permite conocer el entorno y cómo trabajar con él, gracias a códigos aportados por otros usuarios, por lo que permite ir entendiendo poco a poco cómo usarlo. Este es el primer paso que hemos realizado, el de coger códigos muy sencillos y comprender cómo es el desarrollo del mismo. Es por esto por lo que comenzamos con un código que permitía el encendido intermitente de un led y a partir de aquí comenzamos a desarrollar nuevas versiones. Finalmente comenzamos a introducir los servomotores a nuestro código. Comenzamos con el código más sencillo que es introducir el servomotor y decir que una vez conectado se mueva 180°. A partir de este punto se introdujo un nuevo periférico que sería un joystick que usamos para mover el servomotor. Familiarizados con el movimiento del servomotor con el joystick, añadimos un servomotor más. Para el desarrollo de este código el planteamiento era el de mover cada servomotor individualmente dependiendo si movemos el joystick en el eje horizontal o en el eje vertical.

Llegados a este punto, se comenzó a crear una idea inicial para el desarrollo del movimiento de los dedos. Lo primero que se tuvo que plantear era cómo funcionaba el sensor Myoware. Por tanto, un código inicial que nos permitía conocer el funcionamiento era el de lectura de valores del sensor.

Inicialmente lo que hicimos fue definir a qué entrada analógica del microcontrolador conectaremos el sensor. El sensor muscular, tiene un pin de comunicación y dos pines de alimentación. En este caso el sensor Myoware nos ofrece tres opciones diferentes para la comunicación, pero en este caso usaremos el compuesto por los pines SIG, + y -. El pin SIG, es el que nos ofrece la señal de salida del microcontrolador. Y los puntos + y - son la alimentación, donde los 3.3 V que ofrece el microcontrolador se conectarán al + y el - a la tierra.



```
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
prueba1sensor
//Definir el pin en el que está conectado el sensor Myoware

#define EMG_PIN 0
```

Figura 62.- Declaración pin de conexión sensor muscular.

Para transformar la detección muscular en un movimiento mecánico realizado por un servomotor, debemos establecer qué relación encontramos entre la información que nos aporta el sensor y cómo podemos manejar dicha información dentro del editor. El sensor al final nos ofrece señales que las recoge el microcontrolador. A partir de aquí el editor transforma estos datos y trabaja con la tasa de Baudio. Esta tasa se refiere a la velocidad de conmutación que se realiza por segundo, es decir la variación de voltaje o de frecuencia que se encuentra en la señal. Esta se expresa en símbolos por segundo. Por tanto, cada vez que se detecta dicho cambio se genera una variación del baudio.

Luego, en la estructura de inicialización, declararemos el ratio de baudio al que queremos trabajar. Es importante más tarde que cuando ejecutemos el programa, coloquemos el monitor serial en el mismo ratio de baudio que hemos declarado.

```
void setup() {
  //Declaramos el baud rate en 9600.
  Serial.begin(9600);
}
```

Figura 63.- Declaración de inicialización.

A continuación entramos en la estructura bucle, y aquí lo que queremos conseguir es leer los datos recogidos por el sensor. Por tanto la idea es volcar los datos ofrecidos por el sensor a una variable entera que en nuestro código llamaremos "value". Y finalmente para que podamos ver los datos leídos, imprimimos en pantalla dichos valores.



```
)  
  
void loop() {  
  //El valor entero "Value" lee los diferentes valores pedidos por el pin analógico conectado al sensor.  
  int value = analogRead(EMG_PIN);  
  //Podemos observar los valores en el monitor serial.  
  Serial.println(value);  
}
```

Figura 64.- Declaración del bucle.

Para comprobar que funciona debemos compilar, y si todo está correcto volcamos el programa al microcontrolador.

De manera provisional alimentaremos el conjunto del proyecto a partir de la energía que nos ofrece el portátil. Dicha energía y toda la información que vuelca al microcontrolador se realiza a través de un cable USB.

Por supuesto, antes de poder volcarlo en el microcontrolador es necesario, realizar las diferentes conexiones del sensor con el dispositivo Arduino.

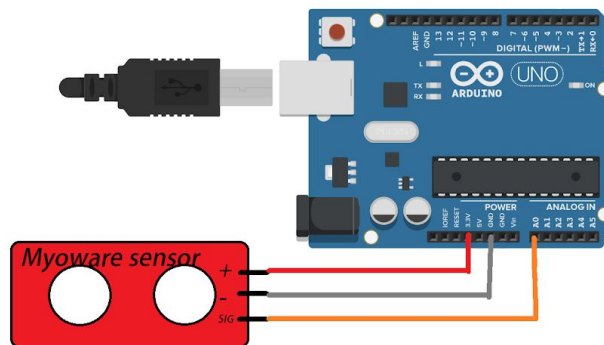


Figura 65.- Esquema conexión sensor muscular y Arduino.

Para la visualización de los valores en pantalla, tenemos dos opciones que nos ofrece el editor. La primera opción es el monitor serial, este lo que nos ofrece directamente es el número leído en el ratio de baudio, es decir, si al valor leído y que se ha transformado para poder comprenderlo es un valor entero de 280, en el monitor serial nos aparecerá impreso el número 280 en cascada o en serie.

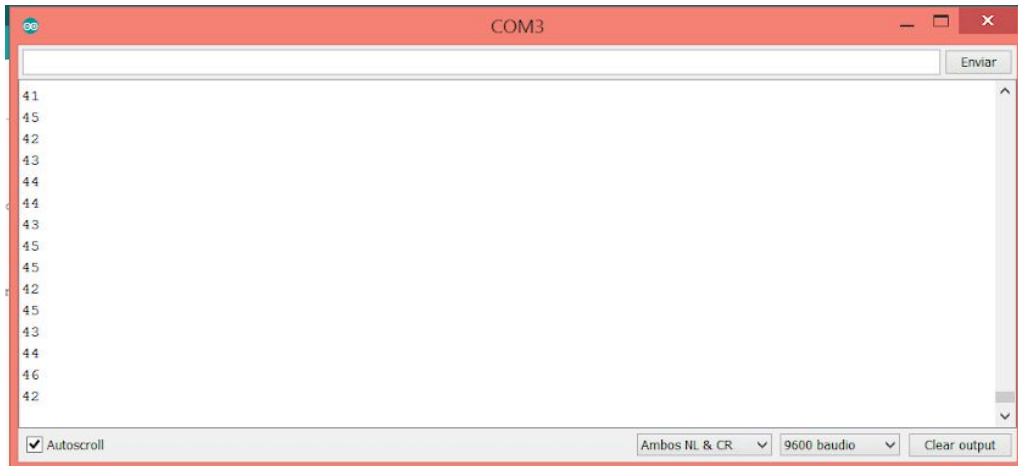


Figura 66.- Gráfica monitor serial.

La otra opción que nos ofrece el editor es el serial plotter. Esta función lo que nos permite es ver de forma gráfica esa lectura de datos.

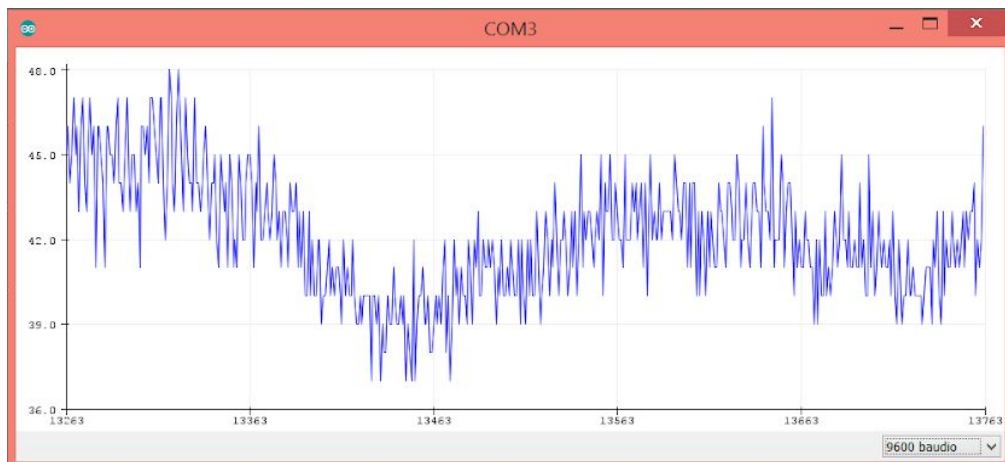


Figura 67.- Gráfica serial plotter.

Los resultados iniciales que salían eran confusos, dado que al ir haciendo varias pruebas durante diferentes días, los resultados que se obtenían eran diferentes. Tras indagar en el tema en cuestión, concluimos en que uno de los puntos de gran importancia para la medición de los datos es la colocación del sensor. Los electrodos correspondientes a la medición per se de la señal muscular, deben estar entre la inervación del músculo y la unión miotendinosa. Colocarlo en el sitio correcto nos proporcionará una lectura más clara y precisa de la señal muscular. De no estar en una posición correcta, obtendremos señales muy bajas en cuanto amplitud, dado que no recoge la señal



potencial del músculo. Es importante a su vez colocar el electrodo de tierra en un sitio adecuado, y lo más apropiado es una superficie cercana a un tejido óseo. En este proyecto la idea es usar el músculo del antebrazo para la captación de la señal, por lo que los electrodos de medición de señal irán colocados en la zona mencionada y comprobando que estén colocados en la sección donde se realiza más fuerza. El electrodo de tierra lo colocaremos en la cara interna del codo.



Figura 68.- Colocación de sensor en el antebrazo.

Viendo como es el funcionamiento del sensor, debemos plantear cómo plasmar la idea de movimiento de los dedos, a partir de la señal captada. Se llegó a la conclusión de que lo más factible era, obtener un valor umbral mediante la observación de la señal muscular, que nos determine que a partir de ese punto el usuario está realizando la acción de fuerza, para poder mover los dedos.

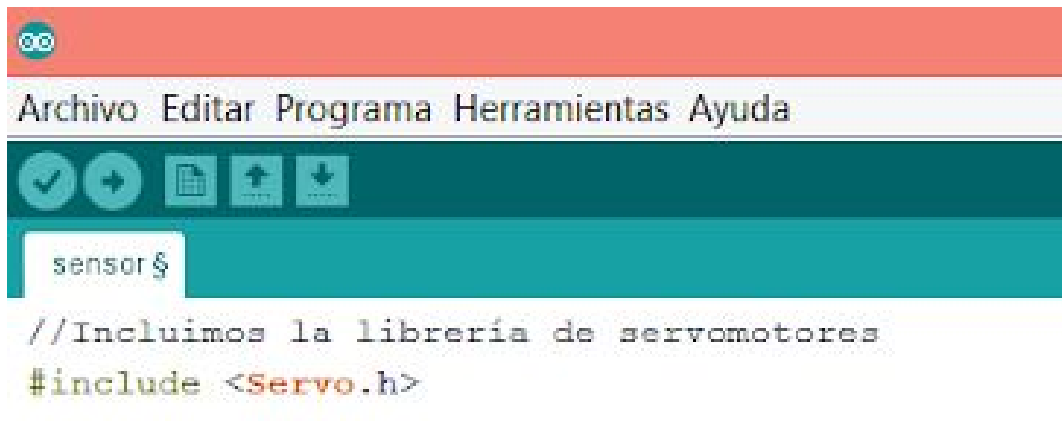
Movimiento de un dedo.

Una vez planteada la idea principal para el desarrollo del programa para el movimiento de los dedos, debemos comenzar a crear el código. Para poder realizarlo de forma ordenada, se comenzará por realizar el movimiento de un solo dedo. Para ello, previo a su ensamblaje, lo que hacemos es mover un único servomotor.

Para inicializar el código, lo primero que haremos es hacer uso de una librería que contiene porciones de códigos, que nos permite hacer



más sencillo el programa. En este caso lo que queremos incluir es la librería referente al servomotor.



```
sensor §  
  
//Incluimos la librería de servomotores  
#include <Servo.h>
```

Figura 69.- Declaración librería servomotor.

Seguidamente definiremos los periféricos de entrada y salida que se usarán, así como el pin al que están conectados. Como bien desarrollamos en la prueba del sensor, definimos el mismo sensor y a qué pin está conectado. Mantendremos el pin analógico 0. A continuación, definimos el nombre del servomotor que usaremos y declaramos a qué pin digital está conectado que en este caso será el 3. Al plantear la idea de crear un límite que nos determine cuándo ha de realizarse el movimiento del servomotor, definiremos una variables que llamaremos “THRESHOLD” y diremos cuál es el límite. Debemos tener muy presente esta definición, dado que cuando queramos hacer uso del programa, previo a usarlo debemos realizar una calibración. Esta calibración se debe a que el sensor se colocará cada vez que hagamos pruebas en una zona en concreto pero nunca será el mismo punto, por tanto, los datos de lectura que tendremos serán diferentes y por consiguiente el límite que marquemos también variará.



```
//Se establecerá un límite en concordancia con el valor máximo y mínimo del sensor.
#define THRESHOLD 200

//Definimos el numero del Pin donde estará conectado el sensor. En este caso es el pin analogico 0.
#define EMG_PIN 0

//Declaramos el numero del pin donde estará conectado el servomotor. Será el pin digital 3 (Digital PWM 3)
#define SERVO_PIN 3

//Definimos el servomotor
Servo SERVO_1;
```

Figura 70.- Declaraciones de pines y definición de servomotor.

Luego entramos en la función de arduino void setup(). Tal y como planteamos en el funcionamiento del sensor, en este punto estableceremos la inicialización de operar el puerto serie a la velocidad que deseemos, a través del comando Serial.begin, e indicaremos que el servomotor que hemos definido como SERVO_1 irá conectado al pin que hemos declarado.

```
/*----- void setup -----*/

void setup(){

  //declaramos el baud rate en 9600, remember it to set monitor serial properly.
  Serial.begin(9600);

  //Conectamos la definición del servomotor con el pin donde estará conectado (digital pin 3)
  SERVO_1.attach(SERVO_PIN);
}
```

Figura 71.- Bloque setup.

El siguiente bloque que nos encontramos es el void loop(). En este punto lo que realizaremos es la condición de que si la señal leída por el sensor, supera el umbral que se ha definido, el servomotor debe girar 179 grados y si no se supera, el servomotor se mantendrá en su posición original. Mantendremos la declaración de la variable entera “value”, ya usada para el código de lectura de la señal del sensor. Usaremos las funciones condicionales if y else, para realizar el movimiento del servomotor si el valor leído supera el “Threshold” o que no se mueva si no lo supera. Y finalmente, mantenemos la impresión por pantalla de los valores leídos por el sensor.



```

}

/*----- void loop -----*/

void loop() {

  //El valor entero "Value" lee los diferentes valores leídos por el pin analogico conectado al sensor
  int value = analogRead(EMG_PIN);

  //Si el valor del sensor supera el límite que hemos establecido, queremos que el servomotor rote 180 grados.
  if(value > THRESHOLD){
    SERVO_1.write(179);
  }

  //Si no supera el límite establecido no rota.
  else{
    SERVO_1.write(0);
  }

  //Podemos observar en el monitor serial, los valores para poder ajustar el límite deseado mientras abrimos y cerramos la mano.
  Serial.println(value);
}

```

Figura 72.-Bloque loop.

Al igual que realizamos para la comprobación de funcionamiento del sensor, debemos realizar las conexiones necesarias, compilar el código y comprobar que está todo correcto y volcar el programa en el microcontrolador.

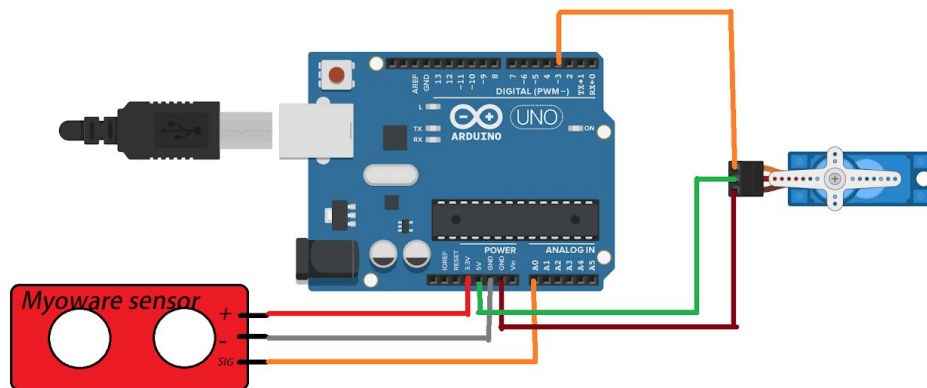


Figura 73.- Esquema sensor y servomotor.

Esta idea inicial, compiló correctamente, pero presentó un problema que en primera instancia no se pudo ver. El problema principal fue que en las diferentes pruebas que hicimos siempre se mantuvo el mismo umbral y como ya explicamos anteriormente, esto es un error. Por



tanto, hallado este problema, concluimos, quedarnos con este modelo de código definitivamente para el movimiento del dedo.

Una vez ensamblado se realizó la comprobación de su funcionamiento, y la única variación que se realizó del código, fue los grados de giro que debía realizar el servomotor. Como se había establecido 179 grados de giro, a la hora de colocarlo con el dedo, esta rotación era muy superior al rango de giro del propio dedo. Por tanto la decisión fue la de decrementar los grados de giro hasta 80 grados, lo que permitía un movimiento correcto del dedo.

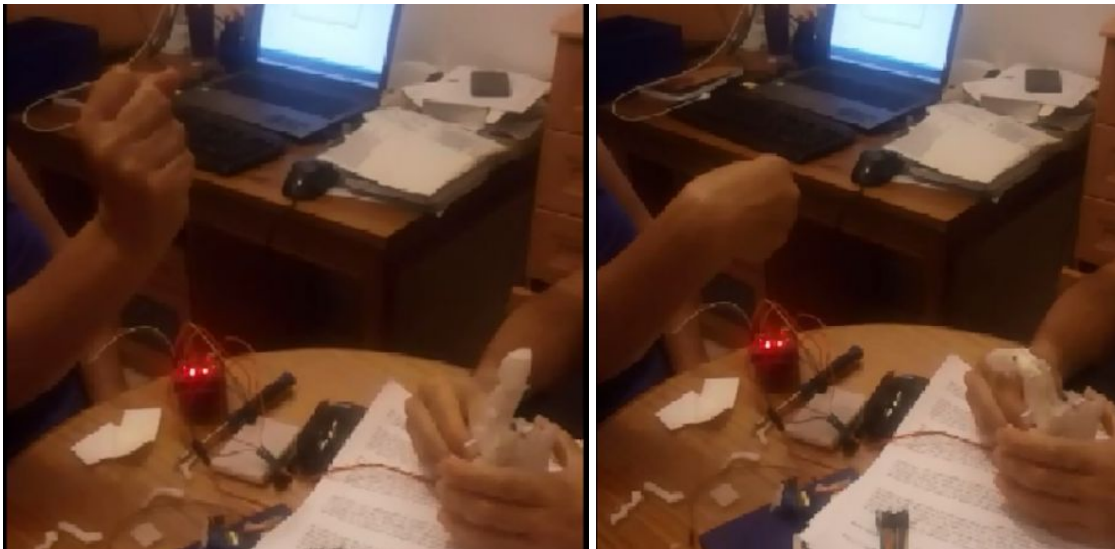


Figura 74.- Demostración práctica del movimiento del dedo con la detección de actividad muscular.

Movimiento varios dedos.

Dado por aprobado el programa de prueba para el movimiento de un solo dedo, lo que haremos es hacer extensivo el mismo código para los demás dedos. Por tanto, conseguimos que todos los dedos actúen de forma simultánea. Esta idea la queremos aplicar para los dedos índice, corazón, anular y meñique.

Por tanto, comenzaremos por introducir la librería de los servomotores, del mismo modo que hicimos para la prueba de un único dedo. A continuación declarar la variable "Threshold" del mismo modo



que en el código anterior. Seguidamente debemos introducir la definición de periféricos de entrada y de salida. Como periférico de entrada seguimos manteniendo el sensor con su mismo pin de conexión que la entrada analógica 0. Tras este paso, definiremos los periféricos de salida que serán los cuatro servomotores, que definiremos del mismo modo que realizamos para la definición de un dedo. Debemos aportar a cada servomotor un nombre diferente e introducir a que pin estará conectado.

```
//Declaramos el numero del pin donde estará conectado el servomotor.
#define SERVO_PIN 3
#define SERVO2_PIN 4
#define SERVO3_PIN 5
#define SERVO4_PIN 6

//Definimos el servomotor
Servo SERVO_1;
Servo SERVO_2;
Servo SERVO_3;
Servo SERVO_4;
```

Figura 75.- Definición de servomotores.

Posterior a este paso, entramos en el bloque `setup()`, donde declararemos las líneas de código a ejecutar al inicio del programa. Por tanto, como en el programa para un solo dedo declaramos el ratio de Baudío y seguidamente debemos introducir la conexión de cada servomotor con su pin correspondiente.

```
/*----- void setup -----*/
void setup(){
  //declaramos el baud rate en 9600, remember it to set monitor serial properly.
  Serial.begin(9600);

  //Conectamos la definición del servomotor con el pin donde estará conectado (digital pin 3)
  SERVO_1.attach(SERVO_PIN);
  SERVO_2.attach(SERVO2_PIN);
  SERVO_3.attach(SERVO3_PIN);
  SERVO_4.attach(SERVO4_PIN);
}
```

Figura 76.- Bloque setup.

A continuación entramos en el bloque bucle, en el que mantendremos las líneas de código incorporadas en el programa de movimiento de un dedo, pero introduciendo en la función condicional las



acciones de los otros servomotores. Mantendremos los grados de giro para todos los servomotores en 80°.

```
/*----- void loop -----*/  
  
void loop() {  
  
  //El valor entero "Value" lee los diferentes valores leídos por el pin analogico conectado al sensor  
  int value = analogRead(EMG_PIN);  
  
  //Si el valor del sensor supera el límite que hemos establecido, queremos que el servomotor rote 180 grados.  
  if(value > THRESHOLD){  
  
    SERVO_1.write(80);  
    SERVO_2.write(80);  
    SERVO_3.write(80);  
    SERVO_4.write(80);  
  
  }  
  
  //Si no supera el límite establecido no rota.  
  else{  
    SERVO_1.write(0);  
    SERVO_2.write(0);  
    SERVO_3.write(0);  
    SERVO_4.write(0);  
  }  
  
  //Podemos observar en el monitor serial, los valores para poder ajustar el límite deseado mientras abrimos y cerramos la mano.  
  Serial.println(value);  
}
```

Figura 77.- Bloque loop.

Finalmente se compiló el código y no hubo ningún error. Una vez realizado este paso se realizan las diferentes conexiones, para poder subir al microcontrolador el programa.

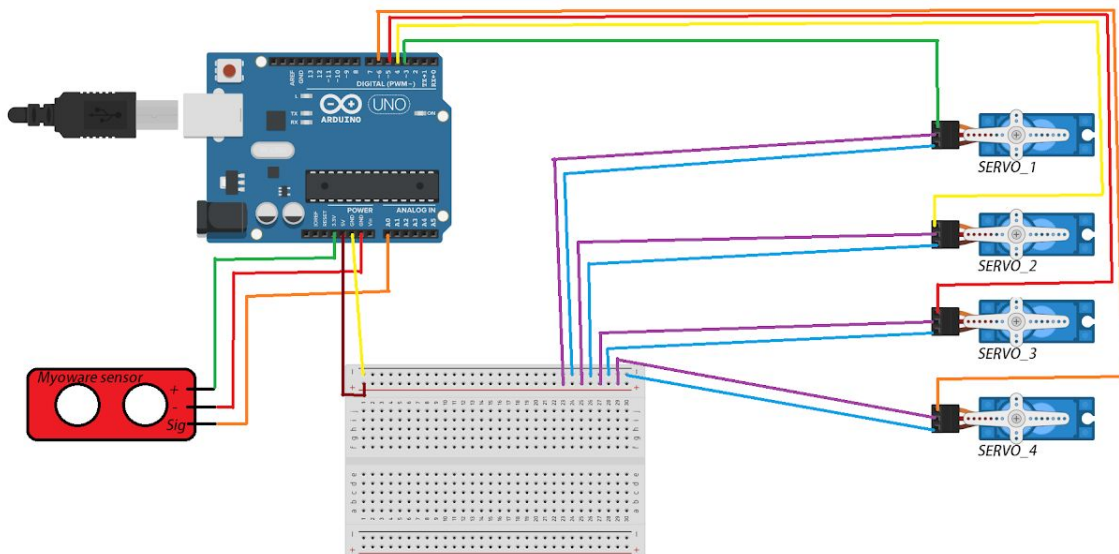




Figura 78.- Esquema sensor y servomotores.

Como podemos apreciar en el esquema, la alimentación de los 4 servomotores está saliendo directamente de la placa Arduino. Para este proyecto como ya comentamos anteriormente, usaremos la alimentación que nos proporciona la propia placa tanto para el sensor como para los servomotores, sin embargo, si se pudiera hacer un uso práctico lo más conveniente es incorporar una batería externa que comentamos en apartados anteriores.

Tras subir el programa en la placa, comprobamos que los servomotores funcionaban de forma correcta, por lo que se procedió a su ensamblaje.

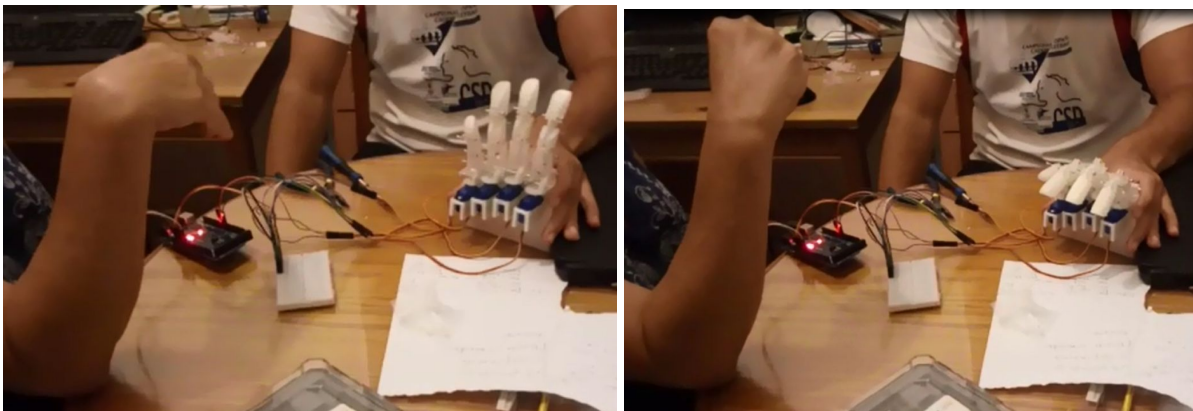


Figura 79.- Demostración práctica de los movimientos de los cuatro dedos.

Una vez montado y realizando diversas pruebas, se comprobó una peculiaridad. Cuando se realiza la fuerza muscular y se pasa el umbral establecido para el accionamiento de los servomotores, estos se mueven de forma correcta, sin embargo, se puede comprobar un pequeño desfase en cuanto al inicio del movimiento de cada uno de los servomotores. Esto se debe a que las acciones dispuestas en el código se ejecutan de forma jerárquica, es decir, se ejecuta la primera línea, después la siguiente y así sucesivamente. Por tanto, cuando se entra en la función condicional, tal y como hemos establecido el código, se ejecutará primero SERVO_1, pasarán unos milisegundos y se ejecutará SERVO_2, volverán a pasar otros milisegundos y se ejecutará SERVO_3 y finalmente ocurrirá lo mismo para SERVO_4. Tras intentar resolver esta situación, se



decidió mantener esta idea, porque la podíamos aprovechar a nuestro favor.

Para que podamos ejecutar correctamente el cierre de la mano, el pulgar debe ser oponible, por lo que el dedo índice y el dedo corazón deben ser los primeros en flexionarse. Por tanto, manteniendo este orden jerárquico, podemos satisfacer de forma correcta que el pulgar será oponible, si las acciones para el mismo las colocamos como últimos movimientos a realizar. Del mismo modo, tendremos que tener en cuenta que para retornar todos los dedos a su posición original, el primer movimiento debe ser ejecutado por el pulgar y tras este las demás acciones.

Cierre de mano en forma de puño.

Como comentamos anteriormente el planteamiento para el código de esta opción de movimiento, será el explicado en el punto de Movimiento de varios dedos. Sin embargo tendremos la peculiaridad del pulgar. Cuando se procede a cerrar una mano con la forma de puño, el pulgar queda superpuesta sobre los demás.



Figura 80.- Mano en forma de puño.

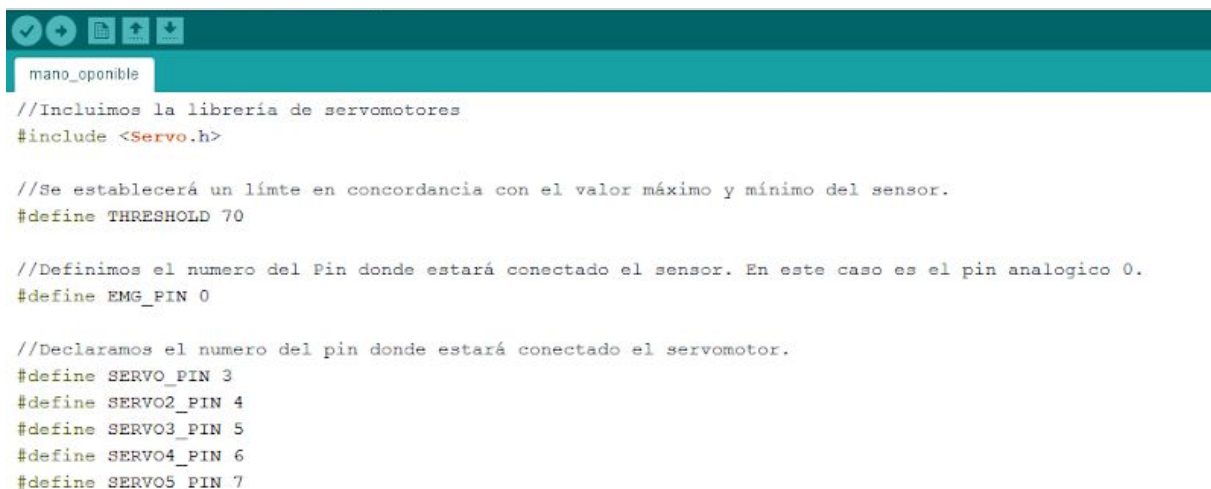
Es por ello que la solución más eficiente para conseguir esta idea de mantener el pulgar sobre los demás dedos, es crear un retardo en el que una vez detectada la señal, el servomotor correspondiente al movimiento del pulgar, se accionará pasados unos milisegundos, lo que permitirá que



los demás dedos lleguen a su posición final y que el pulgar pueda colocarse en la posición deseada.

Prueba oposición del pulgar

Inicialmente antes de poder realizar el movimiento completo del cierre de la mano en forma de puño, se quiso verificar que el movimiento de oposición del dedo se realizaba correctamente. Para ellos comenzamos a desarrollar el código de la misma forma que se han realizado las anteriores estructuras de código. Por tanto, debemos comenzar por introducir la librería correspondiente a los servomotores, a continuación la definición del umbral de detección de fuerza muscular y la definición de los pines a los que van conectados los periféricos de entrada y de salida. En los de salida introduciremos el servomotor nuevo que realizará el movimiento de oposición, que irá conectado al pin digital 7.



```
mano_oponible
//Incluimos la librería de servomotores
#include <Servo.h>

//Se establecerá un límite en concordancia con el valor máximo y mínimo del sensor.
#define THRESHOLD 70

//Definimos el numero del Pin donde estará conectado el sensor. En este caso es el pin analogico 0.
#define EMG_PIN 0

//Declaramos el numero del pin donde estará conectado el servomotor.
#define SERVO_PIN 3
#define SERVO2_PIN 4
#define SERVO3_PIN 5
#define SERVO4_PIN 6
#define SERVO5_PIN 7
```

Figura 81.- Declaración de pines de conexión.

Tras estos pasos debemos definir el nombre que le atribuimos a cada servomotor, pero en este caso a diferencia de los otros códigos, para poder tener un entendimiento más comprensivo y sencillo, se les ha dado los nombre de los diferentes dedos y al servomotor que vaya vinculado al movimiento de oposición se le ha denominado como “oponi”.



```
//Definimos el servomotor
Servo corazon;
Servo anular;
Servo indice;
Servo menique;
Servo oponi;
```

Figura 82.- Nombres de los servomotores.

A continuación entramos, en la estructura de código de inicialización del programa que desarrollamos de la misma forma que los códigos anteriores.

```
/*----- void setup -----*/
void setup(){
  //declaramos el baud rate en 9600, remember it to set monitor serial properly.
  Serial.begin(9600);

  //Conectamos la definición del servomotor con el pin donde estará conectado (digital pin 3)
  corazon.attach(SERVO_PIN);
  anular.attach(SERVO2_PIN);
  indice.attach(SERVO3_PIN);
  menique.attach(SERVO4_PIN);
  oponi.attach(SERVO5_PIN);
}
```

Figura 83.- Bloque setup oponible.

Y finalmente continuando con la estructura de código trabajada anteriormente, se entra en el área de trabajo en bucle e introduciremos la acción de oposición del nuevo servomotor en la función condicional. A diferencia de los otros servomotores, para realizar el movimiento de oposición, el servomotor correspondiente se iniciará en una posición de 80° y en el momento que gire debe girar hasta los 0°.



```
/*----- void loop -----*/  
  
void loop(){  
  
  //El valor entero "Value" lee los diferentes valores leídos por el pin analógico conectado al sensor  
  int value = analogRead(EMG_PIN);  
  
  //Si el valor del sensor supera el límite que hemos establecido, queremos que el servomotor rote 180 grados.  
  if(value > THRESHOLD){  
  
    indice.write(80);  
    corazon.write(80);  
    anular.write(80);  
    menique.write(80);  
    oponi.write(0);  
  
  }  
  
  //Si no supera el límite establecido no rota.  
  else{  
    indice.write(0);  
    corazon.write(0);  
    anular.write(0);  
    menique.write(0);  
    oponi.write(80);  
  
  }  
  
  //Podemos observar en el monitor serial, los valores para poder ajustar el límite deseado mientras abrimos y cerramos la mano.  
  Serial.println(value);  
}
```

Figura 84.- Bloque loop oponible.

Tras realizar la compilación y verificar que no existían fallos en cuanto a sintaxis y demás, se continuó por establecer las conexiones en función del esquema correspondiente

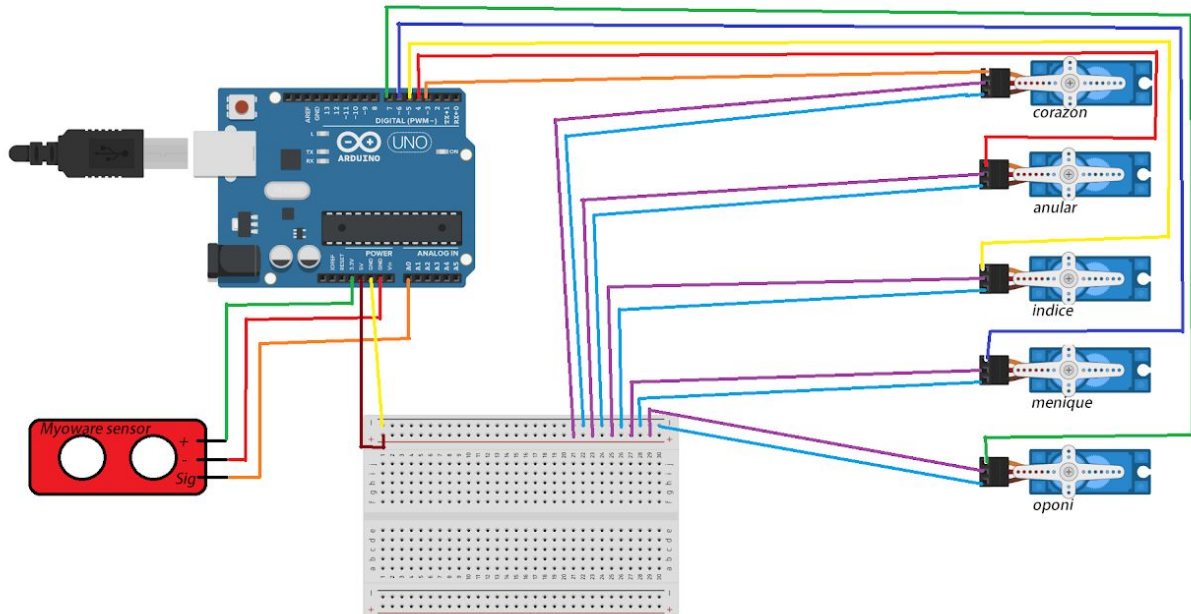


Figura 85.- Esquema con 5 servomotores.

Una vez realizado el montaje, subimos el programa al microcontrolador y comenzamos a hacer las pruebas. Dichas prácticas fueron satisfactorias, dado que se podía apreciar muy bien el movimiento que deseamos, por lo que podíamos pasar a la siguiente prueba que sería realizar el cierre de mano en forma de puño.

Cierre de puño final.

Planteado la estructura del código anterior, debíamos introducir el movimiento de flexión del pulgar que se estructuraría de la misma forma que se ha establecido hasta ahora. Luego siguiendo los pasos introducimos, librería del servomotor, definición de umbral de fuerza muscular y definición de periféricos de entrada y salida y los pines correspondientes.



```
mano_completa_puno
//Incluimos la libreria de servomotores
#include <Servo.h>

//Se establecerá un límite en concordancia con el valor máximo y mínimo del sensor.
#define THRESHOLD 120

//Definimos el numero del Pin donde estará conectado el sensor. En este caso es el pin analogico 0.
#define EMG_PIN 0

//Declaramos el numero del pin donde estará conectado el servomotor.
#define SERVO_PIN 3
#define SERVO2_PIN 4
#define SERVO3_PIN 5
#define SERVO4_PIN 6
#define SERVO5_PIN 7
#define SERVO6_PIN 8

//Definimos el servomotor
Servo corazon;
Servo anular;
Servo indice;
Servo menique;
Servo oponi;
Servo pulgar;
```

Figure 86.- Definición de pines y nombres completo.

Seguidamente entramos en el setup donde vamos a declarar los pines a los que están conectados cada uno de los servomotores.

```
/*----- void setup -----*/
void setup(){

//declaramos el baud rate en 9600, remember it to set monitor serial properly.
Serial.begin(9600);

//Conectamos la definición del servomotor con el pin donde estará conectado (digital pin 3)
corazon.attach(SERVO_PIN);
anular.attach(SERVO2_PIN);
indice.attach(SERVO3_PIN);
menique.attach(SERVO4_PIN);
oponi.attach(SERVO5_PIN);
pulgar.attach(SERVO6_PIN);

}
```

Figura 87.- Definición completa.

Como procedimiento previo a la subida del programa, se compila el código y tras no detectar ningún error, debemos hacer las conexiones pertinentes.



Y finalmente en el área de trabajo loop para introducir como novedad la acción que debe realizar el pulgar en la función condicional.

```
/*----- void loop -----*/  
  
void loop(){  
  
  //El valor entero "Value" lee los diferentes valores leídos por el pin analógico conectado al sensor  
  int value = analogRead(EMG_PIN);  
  
  //Si el valor del sensor supera el límite que hemos establecido, queremos que el servomotor rote 180 grados.  
  if(value > THRESHOLD){  
    pulgar.write(80);  
    oponi.write(0);  
    menique.write(80);  
    anular.write(80);  
    corazon.write(80);  
    indice.write(80);  
  
  }  
  
  //Si no supera el límite establecido no rota.  
  else{  
    indice.write(0);  
    corazon.write(0);  
    anular.write(0);  
    menique.write(0);  
    oponi.write(80);  
    pulgar.write(0);  
  
  }  
  
  //Podemos observar en el monitor serial, los valores para poder ajustar el límite deseado mientras abrimos y cerramos la mano.  
  Serial.println(value);  
}
```

Figura 88.- Bloque loop completo.

Tras realizar la compilación del programa y comprobar que es correcta, procedemos a montar el circuito.

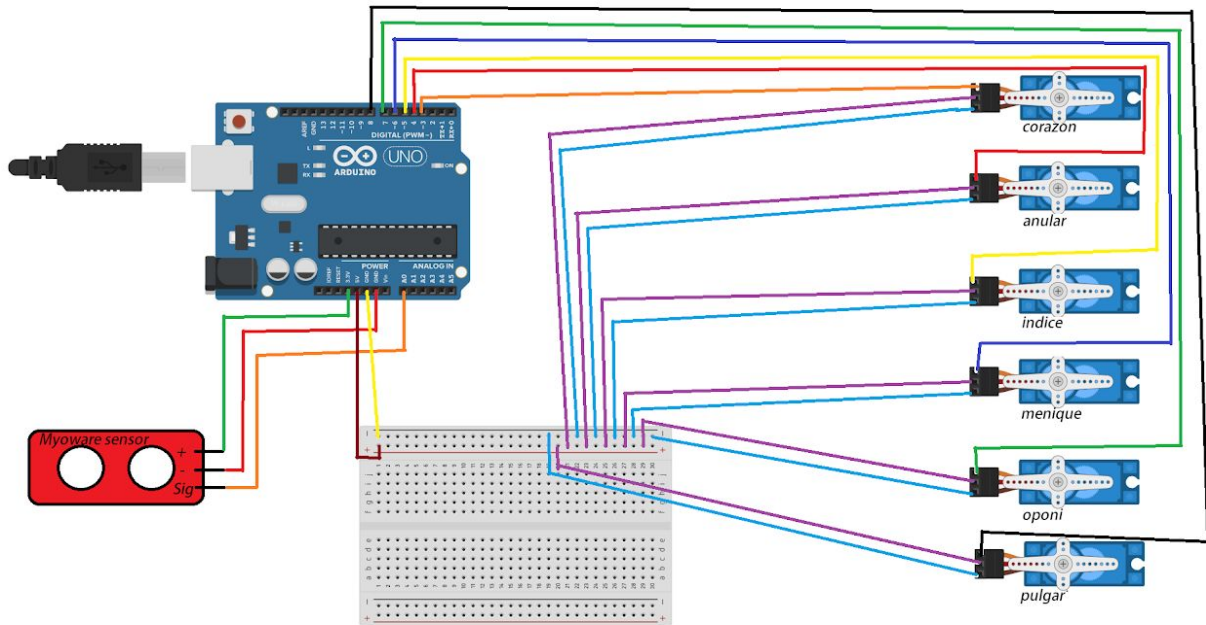


Figura 89.- Esquema completo.

Finalmente realizamos la prueba con los servomotores y comprobamos que en el momento de detección de contracción muscular, los servomotores realizaban su movimiento de giro en el ángulo determinado y en el orden que queríamos que trabajaran.

Es cierto, que a medida que se realizaban las diferentes pruebas, hubo complicaciones al encontrar fallos como la existencia de servomotores que no se movían en algunas ocasiones y en otras sí. Se decidieron hacer diferentes cambios como pudo ser por ejemplo usar otros servomotores o cambiar estos de posición, pero seguían existiendo estos fallos. Tras seguir indagando no podíamos encontrar el error hasta que se decidió hacer una prueba excepcional. Se realizaron pruebas individuales de cada uno de los servomotores y todos funcionaban correctamente cuando se conectaban de forma individual, después se hacían pruebas por parejas y también funcionaban correctamente. Con tres servomotores seguían funcionando correctamente pero fue al introducir cuatro cuando empezaron los mismos problemas en los que a veces funcionaban y en otras ocasiones no funcionaban todos. Luego se llegó a la conclusión que este posible error se debía a la alimentación. Dadas las circunstancias no se dispone del material necesario para terminar de corroborar este punto, pero tras hacer varias pruebas prácticas se puede determinar como correcta esta afirmación. Y es que al



depender de la alimentación que nos ofrece el portátil a través del cable USB, dicha energía no es suficiente para alimentar correctamente la totalidad de nuestro proyecto. Luego lo más correcto para poder realizar pruebas más exhaustivas es la de introducir una fuente de alimentación externa o una batería como se comentó en un apartado anterior.

8. Ensamblaje.

Una vez tenemos todos los elementos necesarios, tanto a nivel estructural como de código, procedemos al montaje de la mano. Es cierto que hay que recalcar, que la elaboración del proyecto se ha ido realizando de forma conjunta, es decir, se iban realizando los trabajos de diseño, impresión, prueba de código y ensamblaje de forma paralela, puesto que se iban realizando pruebas prácticas hasta obtener resultados satisfactorias y se podía seguir avanzando con el desarrollo de la mano.

Comenzaremos mediante la impresión 3D, de los diferentes elementos de la mano. En este caso comenzamos con los dedos. Como ya comentamos en apartados anteriores el diseño de todos los dedos es el mismo a excepción del pulgar. Así mismo, el meñique a diferencia del índice, corazón y anular, se verá reducido un 20% su tamaño original, por lo que se debe proceder a escalar dicha figura en la medida mencionada, que el propio programa de impresión permite modificar.

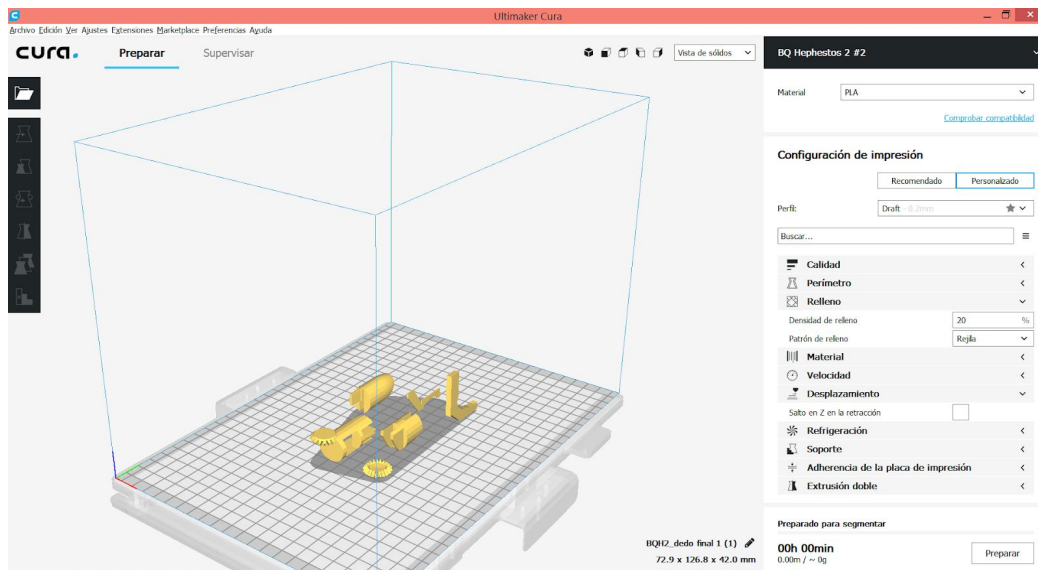


Figura 90.- Programa Cura para la impresión de un dedo.

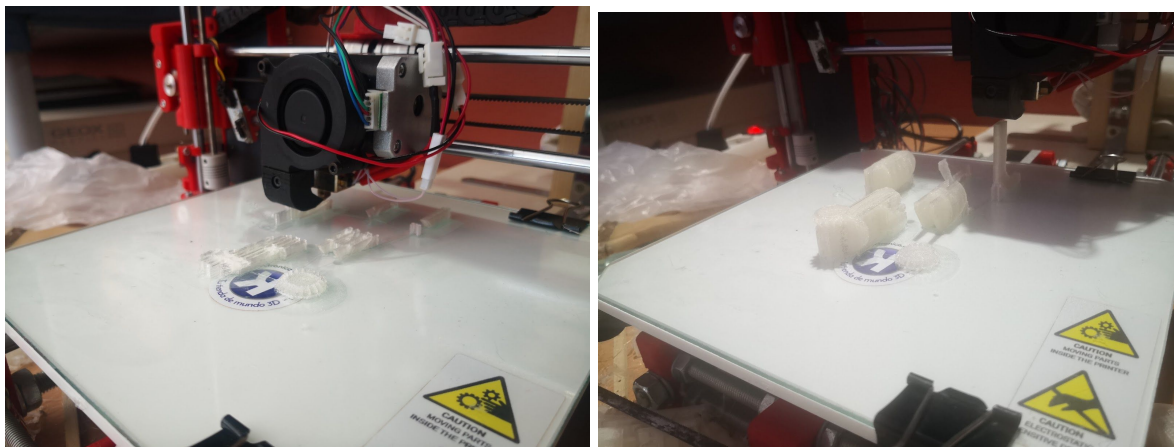


Figura 91.- Impresión de un dedo.

Para ensamblar los dedos se decidió utilizar pasadores para conectar las diferentes secciones. La problemática encontrada es la búsqueda de los pasadores adecuados para el diseño. Finalmente se decidió hacer uso de tornillos con sus tuercas correspondientes y pequeños remaches de acero. Se hizo uso de tornillos de 2,5 mm, para la unión de las secciones más grandes como por ejemplo los puntos de unión entre falanges. Por otro lado, los remaches se usaron para las secciones más delicadas, más concretamente, en las uniones entre los ejes de transmisión y las falanges. Se quiso usar este último para esas secciones dado que podíamos cortar el acero de una manera relativamente sencilla y a su vez porque, al tener su superficie lisa permite



que la pieza en cuestión rotase de forma eficiente y oponiendo menos resistencia. Para los remaches en concreto se tuvo que utilizar un pegamento especial, que se usa habitualmente en marquetería, para poder mantener dicha pieza en la posición deseada.

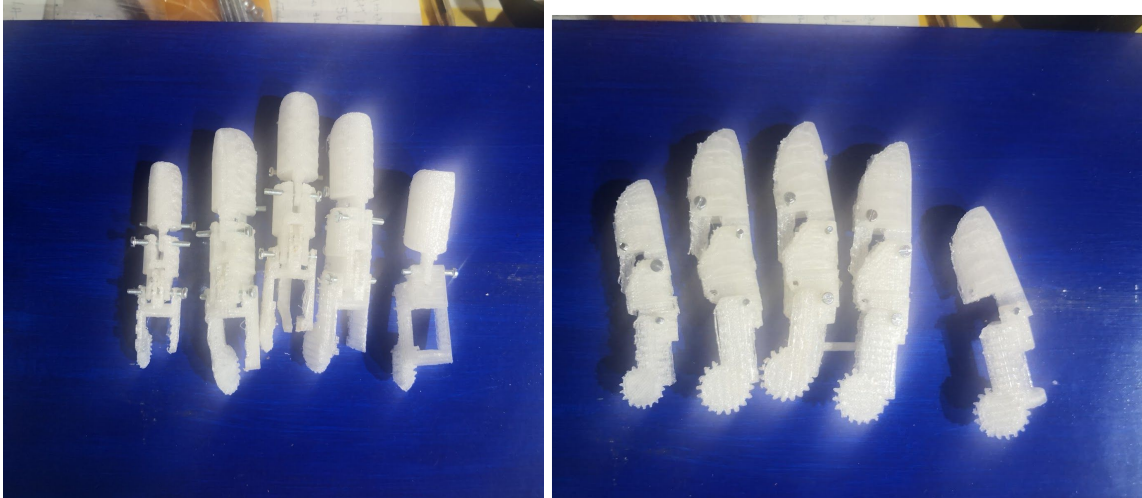


Figura 92.- Impresión completa de todos los dedos.

Una vez ensamblados los dedos, se procedió a la impresión del modelo de la palma inferior. Una vez impreso, comenzamos a conectar los dedos al mismo, para ello empezamos por abrir los agujeros correspondientes en los soportes de los dedos. Realizada esta tarea, se decidió hacer uso de los remaches ya usados en los dedos para hacer coincidir dichos dedos con los soportes de la palma. Y fijamos los remaches con el pegamento de marquetería para una mejor fijación.

Realizado este paso, debíamos introducir los servomotores, pero como comentamos en apartados anteriores, tuvimos que prescindir de las plataformas inicialmente diseñadas porque no permitía una sujeción óptima de los elementos motrices.



Figura 93. Ensamblaje de los dedos con la palma inferior.

A medida que íbamos desarrollando el proyecto, como íbamos realizando pruebas prácticas con todo el conjunto incluido el sensor, el cableado se iba haciendo cada vez más grande y tedioso de conectar, y se encontraron problemas con estos dado que se desconectaban al realizar algún leve movimiento. Por esta razón una de las medidas tomadas fue la de soldar el cableado que conecta el sensor con el microcontrolador. Por tanto se soldó al sensor un soporte para poder realizar las conexiones. Al mismo tiempo, se optó por usar una placa protoboard más grande a la usada con anterioridad, para así poder realizar conexiones más organizadas y así misma más segura para evitar dicha desconexión.

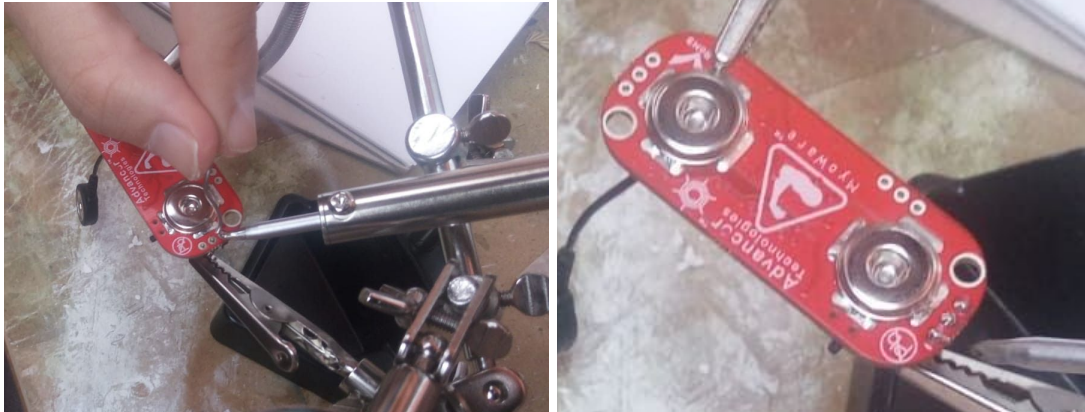


Figura 94.- Soldadura del sensor muscular.

A continuación, se procedió a la impresión del diseño de soporte de servomotor ya explicado en el apartado de diseño 3D.



Figura 95.- Soporte servomotor.

Comprobado que el soporte era correcto, se comenzó a medir, la zona óptima para introducir el servomotor sobre la mano, de tal forma, que el engranaje cumpliera su función de movimiento. Realizado este paso, perforamos la palma de la mano con una fresa, porque el objetivo era el de crear un hueco en la palma para introducir el cabezal del soporte, sin atravesar la anchura total de la palma. Esto se debe, a que un tornillo atravesará el soporte y la palma y con un tuerca realizaremos la sujeción. Si hubiéramos realizado la perforación completa de la palma, la sujeción del soporte se hubiera visto mermada dado que se perdería agarre. Antes de ensamblar el soporte a la mano, debemos introducir el engranaje en el cabezal rotatorio del servomotor. Para ello abriremos, un agujero en el engranaje de tal forma que encaje perfectamente con el



cabezal mencionado, y este agujero debe ser muy preciso y encajar muy bien dado, que si no es así cuando unamos el soporte a la palma y queramos realizar el movimiento del dedo, si el engranaje no está perfectamente anclado, este se moverá y el movimiento de giro no se efectuará.

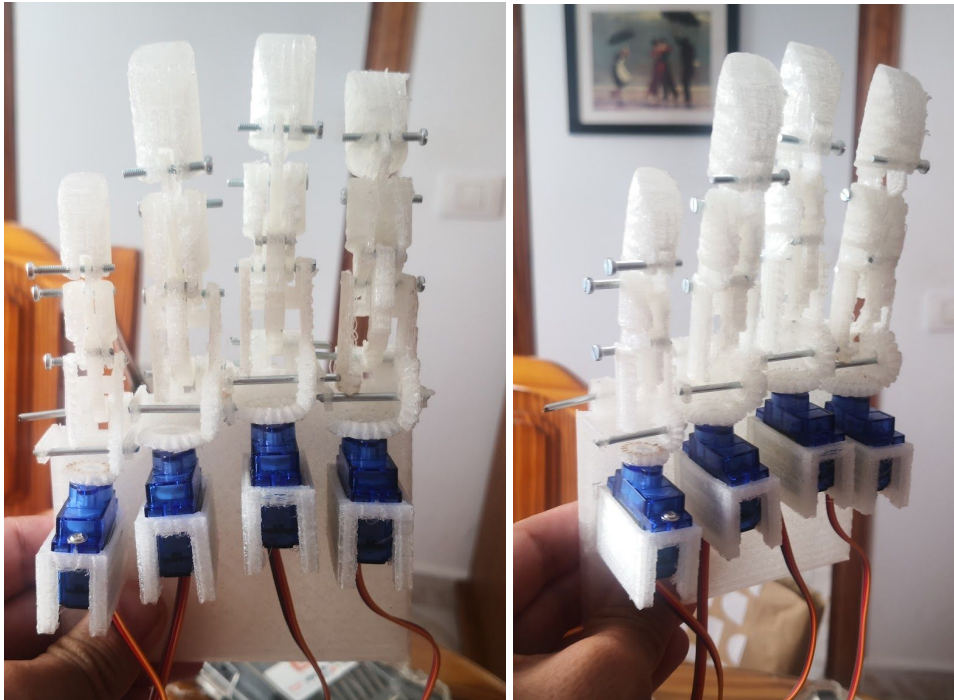


Figura 96.- Ensamblaje de servomotores con la mano.

A continuación debemos comenzar con el ensamblaje de la parte superior de la palma con el soporte de pulgar. Para ello se imprimen las dos piezas en función de los modelos ya establecidos como correctos.



Figura 97.- Palma superior.

Como se comentó anteriormente, en concreto en el punto de Diseño del soporte del pulgar, cuando se imprimió el soporte del pulgar, se comprobó que no se podía completar la rotación, tal y como se exigía por lo que se procedió a cortar una sección del mismo que finalmente fue satisfactoria en cuanto a la realización del movimiento. Así mismo también se tuvo un problema con los soporte de los servomotores, los cuales no permitían que estos encajaran de la misma forma que los soportes de servomotores individuales ya fabricados para los servomotores de los demás dedos. Por tanto, se decidió extraer el soporte del servomotor y anclarlo al soporte base a partir de tuercas fijas y tornillos.

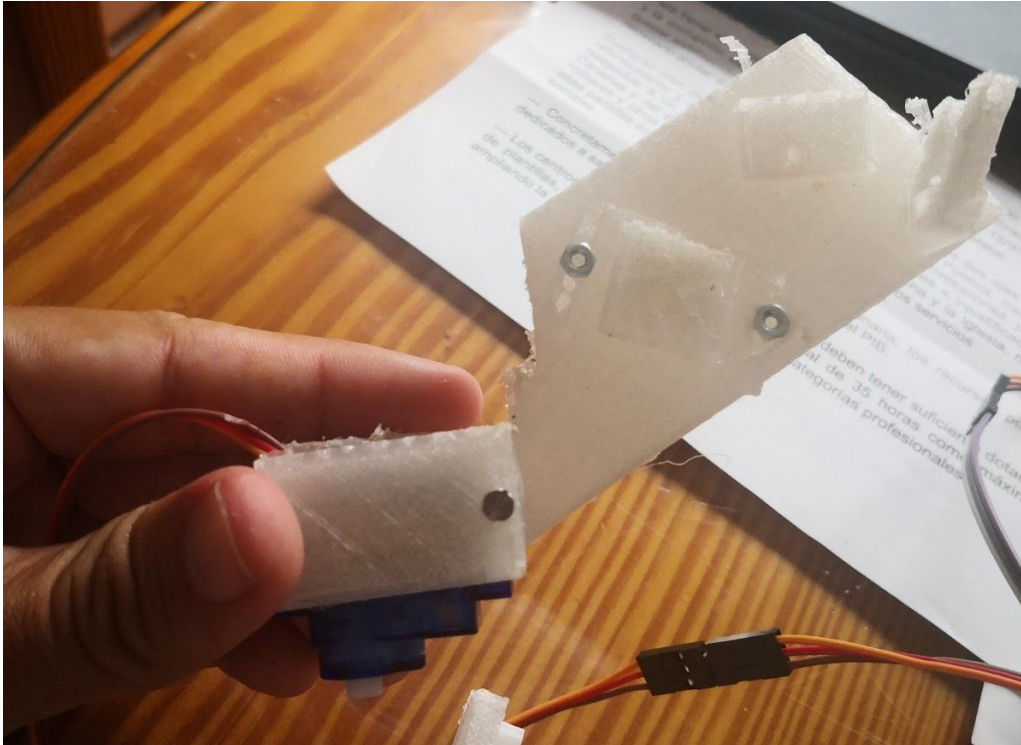


Figura 98.- Soporte pulgar oponible.

Finalmente se juntaron las dos piezas, dejando anclado en la palma superior una pieza correspondiente al cabezal del servomotor y juntando el servomotor al mismo.

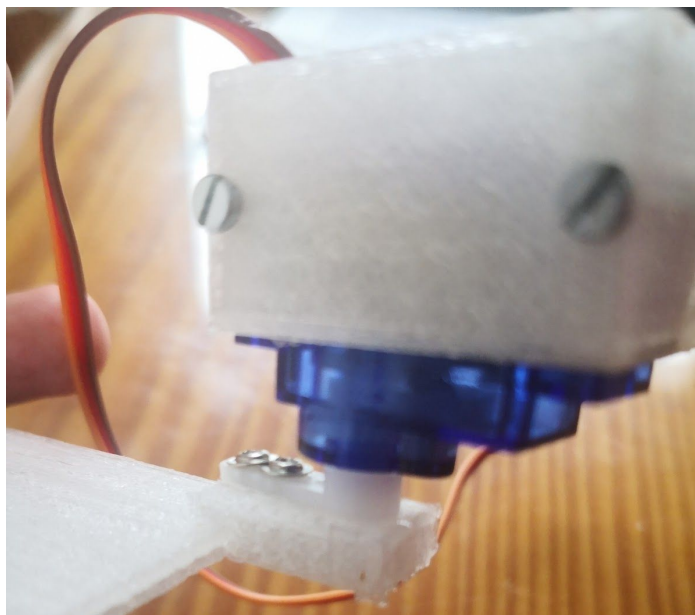


Figura 99.- Anclaje entre el soporte del pulgar con la palma superior.

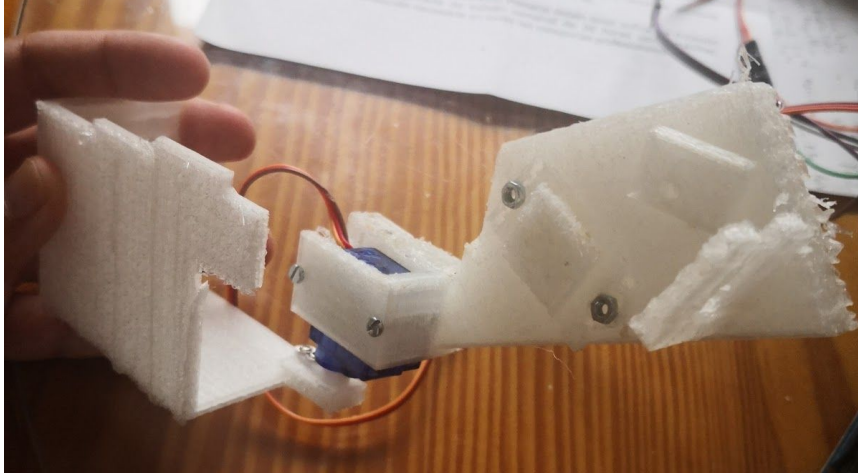


Figura 100.- Vista del superior de la palma superior con soporte del pulgar.

Para finalizar el ensamblado, se introdujo el pulgar en la posición en la que debía estar, y se juntó el conjunto de la palma superior con el conjunto de la palma inferior.

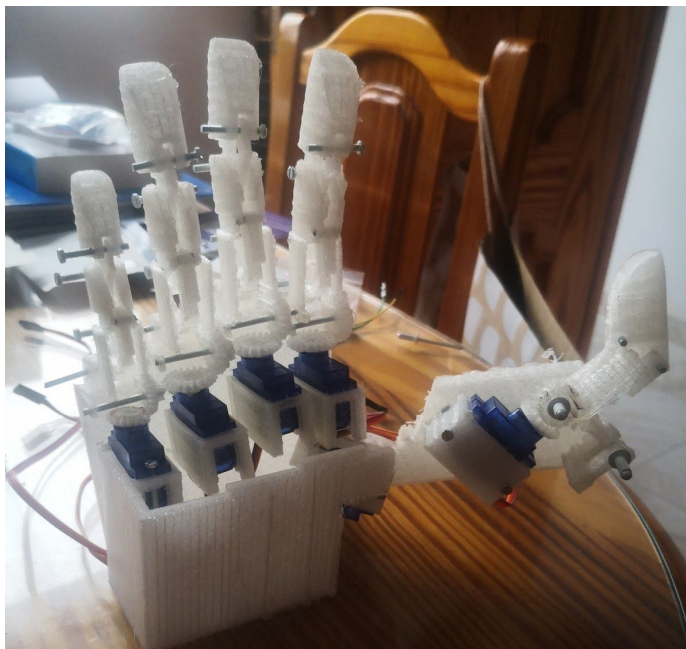


Figura 101.- Ensamblaje completo de la mano.



9. Conclusión.

En este Trabajo de Fin de Grado, el objetivo principal era la fabricación de una mano biónica que tuviera un control a partir de impulsos musculares. Por tanto, para ello era necesario la captación de estas señales musculares, la interpretación de dichas señales y su traducción a un lenguaje entendible por el microcontrolador para poder realizar los movimientos que queremos que realice la mano.

Dada la situación actual en la que nos encontramos en relación al COVID-19, todo el proceso de fabricación, de diseño y de implementación de la parte electrónica que se quería realizar se ha visto perjudicada, pero con los medios que manejamos, se ha hecho todo lo posible por realizar y finalizar el proyecto de la mejor manera posible.

En relación a la parte electrónica era necesario entender cómo interpretar las señales obtenidas por el sensor, para poder tomar una decisión en cuanto al funcionamiento de la mano. Una vez entendido cómo hacer dicha interpretación se llegó a la conclusión, que para efectuar un movimiento en concreto se tenía que sobrepasar un umbral que nosotros marcáramos. Luego, nuestro principio de funcionamiento, en cuanto al código del programa, era el desarrollo de una condición que nos dijera que si la señal muscular sobrepasa un límite, se ejecuta el movimiento y si no se mantiene igual. Al efectuarlo de este modo logramos realizar los movimientos como nosotros queríamos de forma satisfactoria. El inconveniente encontrado es que a través de esta idea la única opción que podemos llevar a cabo es la de cierre de la mano en forma de puño. Si se quisiera realizar otro tipo de movimiento, se debería desarrollar otro tipo de código o bien una solución factible es, usando el mismo principio, hacer uso de un botón con el que seleccionar el modo de uso de la mano, es decir, que al pulsar puedes seleccionar si se quiere realizar un cierre de la mano en forma de puño o bien un cierre de pinza.

Dentro de la parte electrónica en referencia a los servomotores, sensor, cableado y microcontrolador, se halló que se podía hacer de forma correcta el movimiento que nosotros habíamos requerido. Sin embargo, se llegó a la conclusión que la alimentación de todo el conjunto



a través de la energía transmitida por el portátil a través del cable USB, no era suficiente, para que todos los componentes, en concreto los servomotores, funcionasen de forma correcta. Por lo que una solución factible es la introducción de una batería capaz de aportar la energía necesaria.

En cuanto a la parte mecánica, logramos finalmente un diseño tanto a nivel mecánico como estético muy correcto. El movimiento de flexión de los dedos era bastante correcto y permitía realizar un agarre bastante firme. Así mismo logramos conseguir un diseño bastante logrado a lo esperado para una mano biónica impresa en 3D con una impresora convencional.

Podemos concluir que teniendo los medios y los materiales necesarios se puede lograr una mano biónica sencilla de usar y con un coste bajo para cualquiera que lo demande.



10. Conclusion.

In this Final Degree Project, the main goal was to build up a bionic hand controlled by muscle impulses. To do it, it was necessary to get the muscle signal, understand those signals and translate it into a language that the microcontroller could work with to do the movements we want for the hand.

With the actual social situation related to the COVID-19, all the processes of fabrication, designing and the set up of the electronic devices became hard to work with. Otherwise with all the staff and material we could achieve, we did the best we could to finish the project.

In relation with the electronic part of the project, we needed to understand how the signal obtained by the sensor works, to make a decision on the route to take to build up the hand. Once we did it, we established the idea that, to make a specific movement, the signal needed to reach a limit. So to do the sketch of the code, we had to introduce a conditional function, that says that once the signal goes over the limit we settle, the the movement can be done, if not then no movement can be executed. Following this path, we reach the idea we wanted. But the negative side of the idea, that we could only do the movement of closing the hand with a punch form. If we wanted to do more movements, then a new code has to be made or if we continue using this idea, we can use a button to settle which movement we want to do. This means that if we push the button we can select the mode of closing hand.

If we take part in the relation of servomotors, sensor and wiring, we obtained as results, that for the movement we wanted they to do work correctly. Otherwise, it is true that the energy supply given by the laptop through th USB cable, to the circuit, was not enough to make the whole circuit work correctly, much more specific the servomotors. So it could be a good solution to provide a external energy supply that can send the necessary energy to make all the circuit work correctly.



Going to the mechanical side, we have to say that we had a really good result in the mechanic movements and also in the design of the hand. The movement of all the fingers were really good, giving a good grip. And knowing that we used a conventional 3D printer, we had a good looking hand.

So as a final conclusion we could say that, the hand could work correctly and could be used by any user who requires it, by having all the needed materials. We can have an easy hand for practical use, and also obtained a cheap hand that everybody who demands it can afford.



11. Referencias bibliográficas.

- [1] The History of Prosthetics, <http://unyg.com/the-history-of-prosthetics/> (ONLINE)
- [2] The Hand, Inc
Barcharts, https://ebookcentral-proquest-com.accedys2.bbtcl.ull.es/lib/bull-ebooks/detail.action?docID=4877104#goto_toc (ONLINE)
- [3] El cerebro y el sistema nervioso,
<https://kidshealth.org/es/parents/brain-nervous-system-esp.html> (ONLINE)
- [4] Músculos de la mano, Freddy Amilkat Ccori Chambi
<https://es.slideshare.net/freddyamilkarccorichambi/musculos-de-la-mano> (ONLINE)
- [5] Huesos de la mano,
https://www.ecured.cu/Huesos_de_la_mano#Huesos_de_los_dedos_de_la_mano (ONLINE)
- [6] Prótesis miembros superior, Dr. Carlos Arce G., <http://www.arcesw.com/pms1.htm>
(ONLINE)
- [7] Amputee coalition TM,
<https://www.amputee-coalition.org/resources/spanish-materials-prosthetics-part-1/> (ONLINE)
- [8] Amputee coalition TM,
<https://www.amputee-coalition.org/resources/spanish-materials-prosthetics-part-2/> (ONLINE)
- [9] Medical EXPO by Virtual Group,
<https://www.medicaexpo.es/fabricante-medical/protesis-mano-29491.html> (ONLINE)
- [10] Advancer Technologies, <http://www.advancertechnologies.com/> (ONLINE)
- [11] BQ, <https://www.bq.com/es/pla> (ONLINE)



12. Anexos.

ANEXO A. Código cierre de mano en forma de puño.

```
mano_completa_puño
//Incluimos la librería de servomotores
#include <Servo.h>

//Se establecerá un límite en concordancia con el valor máximo y mínimo del sensor.
#define THRESHOLD 200

//Definimos el numero del Pin donde estará conectado el sensor. En este caso es el pin analogico 0.
#define EMS_PIN 0

//Declaramos el numero del pin donde estará conectado el servomotor.
#define SERVO_PIN 3
#define SERVO2_PIN 4
#define SERVO3_PIN 5
#define SERVO4_PIN 6
#define SERVO5_PIN 7
#define SERVO6_PIN 8

//Definimos el servomotor
Servo corazon;
Servo anular;
Servo indice;
Servo menique;
Servo oponi;
Servo pulgar;

/*----- void setup -----*/

void setup() {

  //declaramos el baud rate en 9600, remember it to set monitor serial properly.
  Serial.begin(9600);

  //Conectamos la definición del servomotor con el pin donde estará conectado (digital pin 3)
  corazon.attach(SERVO_PIN);
  anular.attach(SERVO2_PIN);
  indice.attach(SERVO3_PIN);
  menique.attach(SERVO4_PIN);
  oponi.attach(SERVO5_PIN);
  pulgar.attach(SERVO6_PIN);


}
```



```
/*----- void loop -----*/  
  
void loop(){  
  
  //El valor entero "value" lee los diferentes valores leidos por el pin analogico conectado al sensor  
  int value = analogRead(EMG_PIN);  
  
  //Si el valor del sensor supera el límite que hemos establecido, queremos que el servomotor rote 180 grados.  
  if(value > THRESHOLD){  
    pulgar.write(80);  
    oponi.write(80);  
    menique.write(80);  
    anular.write(80);  
    corazon.write(80);  
    indice.write(80);  
  
  }  
  
  //Si no supera el límite establecido no rota.  
  else{  
    indice.write(0);  
    corazon.write(0);  
    anular.write(0);  
    menique.write(0);  
    oponi.write(0);  
    pulgar.write(0);  
  
  }  
  
  //Podemos observar en el monitor serial, los valores para poder ajustar el límite deseado mientras abrimos y cerramos la mano.  
  Serial.println(value);  
}
```



ANEXO B. Datasheet sensor Myoware.



3-lead Muscle / Electromyography Sensor for Microcontroller Applications


MyoWare™ Muscle Sensor (AT-04-001) **DATASHEET**

FEATURES

- *NEW* - Wearable Design
- *NEW* - Single Supply
 - +2.9V to +5.7V
 - Polarity reversal protection
- *NEW* - Two Output Modes
 - EMG Envelope
 - Raw EMG
- *NEW* - Expandable via Shields
- *NEW* - LED Indicators
- Specially Designed For Microcontrollers
- Adjustable Gain

APPLICATIONS

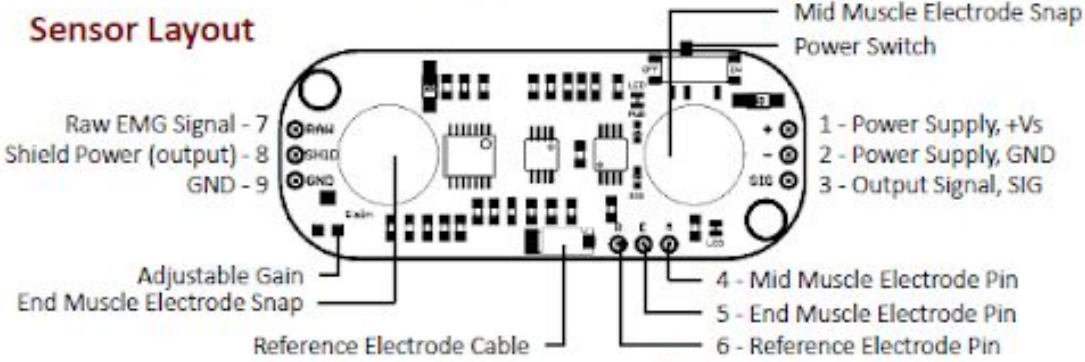
- Video games
- Robotics
- Medical Devices
- Wearable/Mobile Electronics
- Prosthetics/Orthotics



What is electromyography?

Measuring muscle activation via electric potential, referred to as electromyography (EMG), has traditionally been used for medical research and diagnosis of neuromuscular disorders. However, with the advent of ever shrinking yet more powerful microcontrollers and integrated circuits, EMG circuits and sensors have found their way into prosthetics, robotics and other control systems.

Sensor Layout




Raw EMG Signal - 7
Shield Power (output) - 8
GND - 9

Adjustable Gain
End Muscle Electrode Snap
Reference Electrode Cable

Mid Muscle Electrode Snap
Power Switch

1 - Power Supply, +Vs
2 - Power Supply, GND
3 - Output Signal, SIG

4 - Mid Muscle Electrode Pin
5 - End Muscle Electrode Pin
6 - Reference Electrode Pin

EMAIL: support@advancer.co **Advancer Technologies**  www.AdvancerTechnologies.com



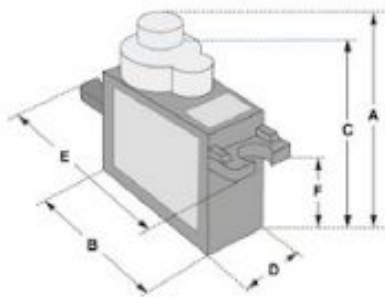
ANEXO C. Datasheet servomotor SG90.

SERVO MOTOR SG90

DATA SHEET



Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but smaller. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.



Dimensions & Specifications

A (mm) : 32

B (mm) : 23

C (mm) : 28.5

D (mm) : 12

E (mm) : 32

F (mm) : 19.5

Speed (sec) : 0.1

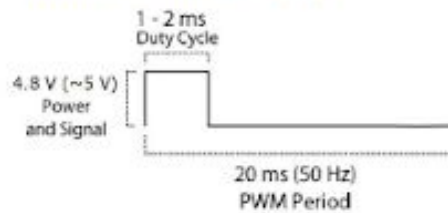
Torque (kg-cm) : 2.5

Weight (g) : 14.7

Voltage : 4.8 - 6

Position 0° (1.5 ms pulse) is middle, 90° (~2ms pulse) is middle, is all the way to the right, ~90° (~1ms pulse) is all the way to the left.

PWM=Orange (⌋⌋)
Vcc = Red (+)
Ground = Brown (-)





ANEXO D. Características filamento PLA.



PLA filamento: ficha técnica

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	2600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Además de las propiedades descritas, hemos realizado los ensayos de tracción tanto de probetas inyectadas como de probetas impresas con nuestro PLA, para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la siguiente tabla se recogen estos resultados:

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas ^a	Probetas impresas ^b	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO 527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO 527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

^a Estirado en dirección paralela a las capas.

^b Estirado en dirección perpendicular a las capas.

Probetas	Altura de capa (mm)	Grosor pared exterior (mm)	Grosor parte inferior/superior (mm)	Densidad del relleno (%)	Diseño de impresión
Probeta impresa en dirección paralela a las capas	0,2	2	0,2	100	
Probeta impresa en dirección perpendicular a las capas	0,3	1	0,3	100	

bq