



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de una mano biónica mediante medios de
producción de bajo coste

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Biomédica

AUTOR/A: Maneus Salvador, Marina

Tutor/a: Rupérez Moreno, María José

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que han tenido que escucharme mientras hablaba continuamente de mis avances durante el desarrollo de este proyecto. Esta experiencia personal ha sido sumamente satisfactoria y ha sido mi fuente de motivación durante varios meses. En particular, me gustaría extender mi gratitud a mi familia y a mi pareja, quienes, aunque es posible que no comprendieran plenamente los detalles técnicos, siempre estuvieron dispuestos a escucharme y brindarme consejos a lo largo de todo el proceso y se alegraban genuinamente cada vez que les mostraba mis progresos.

RESUMEN

Este trabajo examinará y se podrá en práctica una estrategia de fabricación de una prótesis de mano biónica básica utilizando tecnología de impresión 3D, la cual pueda satisfacer las necesidades y las funciones básicas para las personas con necesidad de una prótesis de mano a bajo costo. Se espera que esta técnica reduzca de manera significativa los costos asociados con la construcción de dicha prótesis. Además, se emplearán elementos electrónicos que son ampliamente accesibles y también de bajo costo, lo que permitirá a cualquier individuo con un conocimiento básico poder ensamblar la prótesis sin dificultad alguna.

Palabras Clave: Mano biónica; bajo coste; prótesis de mano; impresión 3D

RESUM

Aquest treball examinarà i posarà en pràctica una estratègia de fabricació d'una pròtesi de mà biònica bàsica utilitzant tecnologia d'impressió 3D, la qual puga satisfer les necessitats i les funcions bàsiques per a les persones amb necessitat d'una pròtesi de mà a un cost reduït. Es espera que aquesta tècnica reduïska de manera significativa els costos associats amb la construcció d'aquesta pròtesi. A més, s'emplearan elements electrònics que són àmpliament accessibles i també de baix cost, la qual cosa permetrà a qualsevol individu amb coneixements bàsics poder muntar la pròtesi sense cap dificultat.

Paraules clau: Mà biònica; cost reduït; pròtesi de mà; impressió 3D.

ABSTRACT

This work will examine and implement a manufacturing strategy for a basic bionic hand prosthesis using 3D printing technology, which can meet the basic needs and functions for individuals requiring a low-cost hand prosthesis. It is expected that this technique will significantly reduce the costs associated with the construction of such a prosthesis. Additionally, widely accessible and low-cost electronic components will be employed, enabling individuals with basic knowledge to easily assemble the prosthesis.

Keywords: Bionic hand; low cost; hand prosthesis; 3D printing.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

1. Memoria

- Índice memoria
- Índice tablas
- Índice figuras
- Memoria

2. Presupuesto

- Índice presupuesto
- Índice tablas

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO.....	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.3. NOVEDAD DE LA PRÓTESIS.....	12
2. ANATOMÍA DE LA MANO.....	14
3. ESTADO DEL ARTE.....	16
4. CLASIFICACIÓN DE PRÓTESIS EXISTENTES EN EL MERCADO.....	21
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
5.1. CARACTERÍSTICAS E IMPRESIÓN PIEZAS PRÓTESIS BIÓNICA BÁSICA.....	25
5.1.1. DEDOS DE LA MANO.....	26
5.1.2. BRAZO.....	27
5.1.3. SERVO-HOUSING.....	28
5.1.4. PALMA.....	29
5.1.5. TAPA.....	30
5.1.6. ARTICULACIONES DE LOS DEDOS.....	31
5.2. CIRCUITO ELÉCTRICO Y SENSOR DE PRESIÓN.....	33
5.3. ENSAMBLAJE.....	37
5.3.1. MONTAJE MANOS Y DEDOS.....	37
5.3.2. MONTAJE ELECTRÓNICO.....	39
5.3.3. PRÓTESIS COMPLETA.....	41
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
7. CONCLUSIONES.....	46
8. LIMITACIONES DEL TRABAJO Y LÍNEAS FUTURAS.....	48
9. BIBLIOGRAFÍA.....	50

ÍNDICE DE LAS FIGURAS

<i>Figura 1. Huesos de la mano. 1. Radio; 2. Cúbito; 3. Escafoides; 4. Semilunar; 5. Piramidal; 6. Pisiforme; 7. Trapecio; 8. Trapezoide; 9. Grande; 10. Ganchoso. I. Pulgar; II. Índice; III. Dedo medio; IV. Anular; V. Meñique. [4].....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2. Estructuración de las falanges de la mano humana [5]</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3. “El dedo gordo del Cairo” perteneciente a una momia egipcia (entre 1069 a.C y 664 a.C) Posiblemente una de las primeras prótesis funcionales del mundo [7].....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4. Prótesis Biónica I-Limb [8]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5. Prótesis “Luke Arm” agarrando una uva sin malograrla [12]</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6 y 7. Izquierda; Prótesis “Michelangelo hand” con la muñeca flexionada. Derecha; Guante con apariencia de mano humana que se coloca en la prótesis [13].</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8. Prótesis de mano “Bebionic3” [14].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9. Imagen de prótesis estéticas [16].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10. Imagen de prótesis mecánica [8]</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11. Imágenes de prótesis eléctricas [8]</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12. Imagen prótesis neumáticas [8].....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13. Imagen prótesis mioeléctricas [17]</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14. Imagen prótesis híbridas [8].....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 15 y 16. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de los dedos de la mano izquierda. Derecha; Resultado de la impresión de los dedos.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 17 y 18. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics del brazo de la prótesis. Derecha; Resultado de la impresión del brazo.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 19 y 20. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de los dedos del servo-housing. Derecha; Derecha; Resultado de la impresión del Servo-housing.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 21 y 22. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de la palma izquierda, donde se puede apreciar el hueco dejado para integrar el servo-housing. Derecha; Resultado de la impresión de la palma.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23 y 24: Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de la tapa de la prótesis.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25. Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de las articulaciones de los dedos. ...</i>	<i>32</i>
<i>Figura 26. Programa cargado en la placa Arduino para el funcionamiento del servomotor.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27. Mano montada con los dedos unidos mediante las articulaciones y los hilos utilizados para mover el sistema ya integrados en los dedos correspondientes.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28 y 29. Izquierda; dorso de la mano con el mecanismo de los hilos visible. Derecha; dorso de la mano con la tapa posicionada.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30. Servo-housing introducido dentro de la pieza del brazo, con las pestañas diseñadas para la unión de la parte inferior de la prótesis con la mano.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31. Circuito electrónico con los siguientes componentes: batería 2200mAh (7.4V), regulador de voltaje, sensor FSR, resistencia 100kΩ, placa Arduino nano y servomotor.....</i>	<i>39</i>

<i>Figura 32. Montaje del circuito eléctrico.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 33. Servo-housing integrado a la mano con tornillos 3x5mm.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34. Servomotor dentro del servo-housing anclado a la pieza de la mano.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 35. Vista frontal de la prótesis biónica de mano básica completamente ensamblada.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 36. Vista posterior de la prótesis biónica de mano básica completamente ensamblada.</i>	<i>43</i>

ÍNDICE DE LAS TABLAS

<i>Tabla 1. Características para la impresión 3D de los dedos de la mano izquierda.</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 2. Características para la impresión 3D del brazo.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 3. Características para la impresión 3D del servo-housing.</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 4. Características para la impresión 3D de la palma izquierda.</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 5. Características para la impresión 3D de las articulaciones.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 6. Tiempo empleado en imprimir cada uno de los grupos de piezas mencionados y cantidad de material utilizado en la impresión en gramos.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 7. Lista de componentes con sus correspondientes características e imágenes que se han utilizado en el desarrollo de la parta robótica de la mano biónica.</i>	<i>34</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

Actualmente, con el progresivo aumento de la realización de deportes de riesgo, la manipulación de maquinaria industrial pesada, conducción automovilística y los viajes, se han incrementado los accidentes que resultan en traumatismos graves en los que es necesario la amputación de alguna extremidad de la persona afectada. Además de los accidentes, también muchas infecciones, tumores, quemaduras e incluso enfermedades, terminan en la pérdida de la funcionalidad de alguna extremidad, llegando a plantearse como solución la amputación de dicha parte. Por consiguiente, para contrarrestar este problema cada vez más frecuente, se está haciendo más popular la investigación que abarca el desarrollo de las posibles soluciones para ofrecer a las personas afectadas un amplio abanico de posibilidades que les permitan vivir su vida diaria con total normalidad, sin que su condición les genere ninguna limitación.

Una solución que ha sufrido un progreso exponencial debido a la creciente innovación en su diseño, desarrollo y accesibilidad, es la utilización de prótesis. Esta, está entre numerosas otras opciones; como la del reimplante de la extremidad afectada. Este reimplante es una intervención que se basa en la reparación del segmento corporal amputado en su totalidad, utilizando la revascularización como medio de restauración del flujo sanguíneo en el segmento lesionado [1]. Sin embargo, la primera opción comentada, está siendo cada vez más elegida por los afectados.

En particular, la tecnología que ha ido aumentando su peso en el mercado y se está haciendo cada vez más conocida y valorada es el uso de las prótesis biónicas. Esto es debido al gran avance que han supuesto respecto a las otras opciones actualmente presentes, no obstante, son conocidas también por tener un coste considerablemente elevado. Las prótesis biónicas se caracterizan por combinar sistemas electrónicos y biológicos para potenciar las características de la simulación del funcionamiento o modelo de los seres vivos [2]. Existen diferentes prótesis biónicas y pueden ser más complejas y con mayor similitud al funcionamiento de una extremidad anatómica, o mucho más sencillas que cubran las necesidades básicas de la extremidad a la que imitan. De forma general, la complejidad de la prótesis biónica va estrechamente ligada al tiempo de producción, al tiempo de acondicionamiento del usuario con la nueva prótesis y, más fuertemente, a su coste final. La prótesis desarrollada en este proyecto se clasificaría como prótesis biónica al contar con un servo-motor que activa el sistema.

Por tanto, debido a la creciente necesidad de una solución respecto al aumento en la pérdida de extremidades y el difícil acceso a una prótesis biónica por su elevado costo, he encontrado motivador el estudio del desarrollo de una prótesis biónica básica funcional que ayude a disminuir las limitaciones que las personas que han sufrido una amputación pueden experimentar en su día.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: La sección 2 presenta la anatomía de la mano. La sección 3 realiza una revisión del estado del arte de la tecnología utilizada, llevando a cabo comparaciones con algunos ejemplos. Luego, la sección 4 presenta la clasificación de los distintos tipos de prótesis existentes en la actualidad, describiendo las características más destacadas de cada una y proporcionando un ejemplo de cada tipo. En la sección 5 se expone los materiales y métodos que se han llevado a cabo en la elaboración de este proyecto, donde se incluyen las características y la preparación de las piezas necesarias para la impresión del brazo biónico, así como el desarrollo del sistema eléctrico utilizado en la creación del prototipo y el proceso de ensamblaje de la prótesis. La sección 6 presenta los resultados y discusión de la elaboración del proyecto. Finalmente, se manifiestan las conclusiones en la sección 7.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es poner en práctica una estrategia de fabricación de una prótesis de mano biónica básica utilizando tecnologías de bajo costo y accesibles, además de utilizar elementos eléctricos simples e igualmente accesibles que disminuyan la complejidad del desarrollo del circuito eléctrico necesario para activar el sistema. Esta estrategia también debe satisfacer las necesidades y las funciones básicas para las personas con necesidad de una prótesis de mano. Se espera que la técnica utilizada en el proyecto reduzca de manera significativa los costos asociados con la construcción de la prótesis. Además, al emplear elementos electrónicos ampliamente accesibles, permitirá a cualquier individuo con interés, ensamblar la prótesis sin dificultad alguna.

1.3. NOVEDAD DE LA PRÓTESIS

La novedad que presenta la prótesis desarrollada en este proyecto sería la fabricación de las piezas de la prótesis con material de impresión 3D de bajo costo, el montaje de un circuito sencillo y básico que permita el movimiento de dichas piezas con pocos elementos, y estos elementos siendo también de bajo costo y considerablemente accesibles. Por lo que, el motivo por el que este trabajo se ha centrado en poder conseguir desarrollar esta prótesis con un presupuesto deliberadamente reducido y que sea todo verdaderamente accesible, es para que cualquier individuo que decida reproducir el proyecto, no tenga una limitación económica o de accesibilidad a los elementos necesarios para su construcción, y que, por consiguiente, estos factores no contribuyan a que personas que han perdido una mano o cualquiera que esté interesado en el desarrollo de una mano biónica básica, tengan la oportunidad de empezar por aquí con su desarrollo añadiendo un poco de investigación personal.

En el caso presentado en el siguiente documento, se han combinado diversas tecnologías y dispositivos, como la utilización de técnicas de impresión 3D, para la producción de los distintos elementos en el desarrollo de un sistema basado en la plataforma Arduino, la creación de un sistema analógico que incorpora sensores de fuerza y la gestión de varios componentes electrónicos que

constituyen el prototipo. Como consecuencia del proyecto, se ha logrado desarrollar un prototipo robótico que imita el movimiento de agarre de la mano humana. Este movimiento se ha incorporado en la prótesis con el fin de proporcionar al usuario la capacidad de manipular objetos, reduciendo así las posibles limitaciones que puedan surgir en su vida diaria. Además, las señales eléctricas recogidas a través del sensor de fuerza, se han utilizado para generar el movimiento en el servomotor, lo que se traduce en la apertura y cierre de los dedos para simular el movimiento mencionado de agarre.

Mi aportación general a este proyecto ha sido la integración de materiales ampliamente accesibles y económicos para la impresión 3D de las piezas que conforman la prótesis, la elección de componentes también verdaderamente accesibles y económicos para el montaje del circuito, además de la búsqueda para la simplificación de los conocimientos básicos de la electrónica para la integración de un circuito general y sencillo. Adicionalmente, se ha elegido un sensor de presión, que es uno de los sensores que presentan menor dificultad a la hora del aprendizaje de uso de este tipo de prótesis para el usuario final.

2. ANATOMÍA DE LA MANO

Gracias a su integridad estructural tanto a nivel macro como micro y al abundante tejido cerebral, la mano del ser humano posee habilidades y ventajas que lo distinguen de otras especies. La disposición anatómica de la mano permite realizar diversas adaptaciones funcionales según las necesidades del usuario, tales como la manipulación de objetos, movimientos de oposición y destreza manual fina [3].

La mano está compuesta por 27 huesos, más de 20 articulaciones y más de 30 músculos, lo que la convierte en una estructura compleja y versátil, aunque también vulnerable a sufrir lesiones traumáticas [3]. Además, la estructura ósea de la mano está conformada por catorce falanges, cinco metacarpianos y ocho huesos carpianos, que se conectan entre sí mediante numerosas articulaciones. En primer lugar, los huesos carpianos se organizan en dos filas. La fila proximal de estos huesos incluye los huesos escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. Estos, se articulan con las porciones distales del radio y el cúbito, a excepción del pisiforme, que se ubica en la disposición palmar y se conecta con el piramidal. La fila distal de estos huesos está compuesta por los huesos trapecio, trapezoide, grande y ganchoso. Estos cuatro huesos carpianos distales se unen a los cinco huesos metacarpianos. La articulación de la muñeca es formada por los ocho huesos carpianos, los cuales se sitúan entre el antebrazo y los huesos metacarpianos, generando una estructura compleja [3].

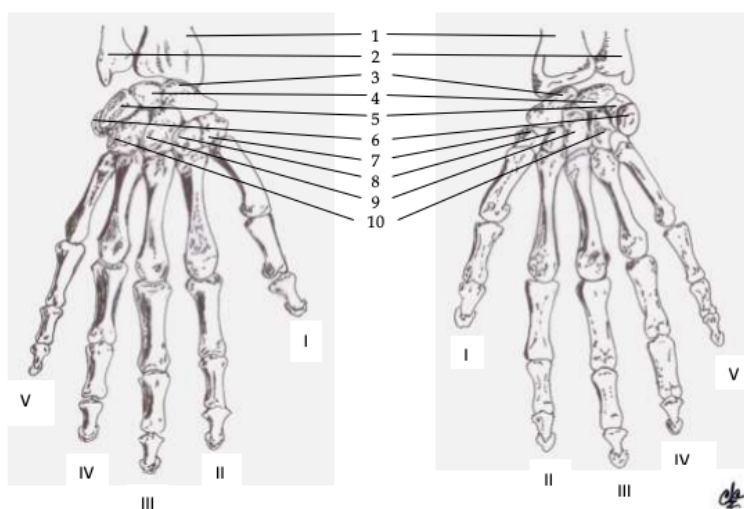


Figura 1. Huesos de la mano. 1. Radio; 2. Cúbito; 3. Escafoides; 4. Semilunar; 5. Piramidal; 6. Pisiforme; 7. Trapecio; 8. Trapezoide; 9. Grande; 10. Ganchoso. I. Pulgar; II. Índice; III. Dedo medio; IV. Anular; V. Meñique. [4]

Los dedos de la mano cuentan con tres falanges (falange proximal, falange media y falange distal) a excepción del pulgar que simplemente cuenta con dos falanges, la falange proximal y la falange distal. El metacarpiano conecta con los huesos carpianos y se articula con la base de la falange proximal, que a su vez se conecta con la falange media y esta conecta con la falange distal. La punta de la falange

distal ya no cuenta con ninguna articulación más, sino que tiene una forma redondeada, que se localiza con la almohadilla palmar del extremo del dedo [5].

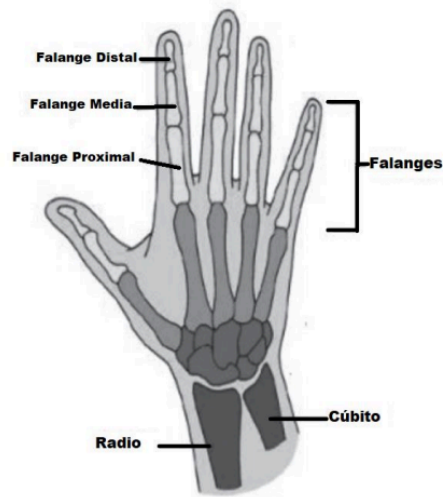


Figura 2. Estructuración de las falanges de la mano humana [5]

En la *Figura 2* se puede observar la disposición de los huesos de la mano. Empezando desde abajo, el radio y el cúbito comunican con los 8 huesos carpianos, concretamente con la fila proximal de estos huesos. Seguidamente, la fila distal de los huesos carpianos comunica con los 5 huesos metacarpianos, que a su vez se comunican con las falanges distales. Estas se conectan con las falanges medias y luego a las falanges distales en el caso de los dedos índice, corazón anular y meñique, y en el caso del dedo pulgar, la falange proximal conecta directamente con la falange distal.

3. ESTADO DEL ARTE

Una prótesis es un elemento fabricado artificialmente con el propósito de sustituir o mejorar una porción del cuerpo humano que esté ausente o presente una función anormal. Durante las últimas décadas ha habido un progreso significativo en el campo de las prótesis, tanto para miembros superiores como inferiores, lo que ha permitido que estas prótesis se parezcan cada vez más a las extremidades naturales que están reemplazando. Este avance ha dado lugar a la creación de prótesis robóticas o biónicas [6].

La tecnología protésica se originó alrededor del 3.000 a.C como respuesta a las necesidades culturales y funcionales de los humanos. A través de la evolución, se han desarrollado diversas tecnologías que mejoran la calidad de vida de quienes las necesitan. Los egipcios fueron los primeros en desarrollar extremidades protésicas rudimentarias utilizando fibras, y aunque su uso parecía estar motivado por la sensación de completitud, recientemente se descubrió lo que se cree que es el primer dedo del pie protésico funcional en una momia egipcia. [7]



Figura 3. “El dedo gordo del Cairo” perteneciente a una momia egipcia (entre 1069 a.C y 664 a.C) Posiblemente una de las primeras prótesis funcionales del mundo [7].

Para visualizar el avance de las prótesis, podemos remontarnos a la Alta Edad Media, donde la protésica se limitaba a dispositivos simples como el gancho de mano y la pata de palo, que a menudo se utilizaban para esconder deformidades o heridas de guerra. Luego, en el Renacimiento, se produjo un nuevo comienzo en la historia de la protésica al retomar los descubrimientos médicos de los griegos y romanos. Más adelante, en 1696, Pieter Verduyn desarrolló la primera prótesis por debajo de la rodilla sin mecanismo de bloqueo, lo que sentó las bases para los actuales dispositivos de articulación y corsé. Sin embargo, durante la Guerra Civil Estadounidense, la cantidad de amputados aumentó, lo que obligó a los estadounidenses a ingresar en el campo de la protésica. Después de la Segunda Guerra

Mundial, el gobierno de los estados unidos cerró un trato con compañías militares para mejorar la función protésica. [8]

Desde hace muchos años, se ha venido trabajando en la fabricación de prótesis de mano. Hay registros de la primera prótesis de mano en el año 2000 a.C. [6]. A lo largo de los siglos, ha habido grandes avances en la fabricación de prótesis de mano, como la prótesis de Ambroise Paré en el siglo XVI (*Le petit Loraine*) [9], los accesorios prostéticos terminales de Gripoulleau en el siglo XX y el Hook de Dorrance en 1912 [10]. Actualmente, países como Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón lideran el desarrollo tecnológico en prótesis de mano [8].

Algunos de los ejemplos de las prótesis más destacadas de la actualidad son la prótesis biónica I-limb, Luke Arm (primer brazo biónico que siente), Michelangelo hand y la prótesis bebionic3:

Prótesis Biónica I-Limb

La prótesis biónica I-limb se utiliza ampliamente en múltiples países debido a su capacidad para realizar la mayoría de los movimientos básicos de la mano humana, lo que facilita la reintegración laboral y mejora la calidad de vida de los pacientes. La prótesis está equipada con una mano biónica cuyos dedos pueden ser controlados de manera independiente, permitiendo una amplia variedad de movimientos, que incluyen la rotación de hasta 90 grados del pulgar, agarres de precisión y de potencia en varias formas [11]. El precio de adquisición de esta prótesis actualmente en el mercado es de alrededor de 20,000€.

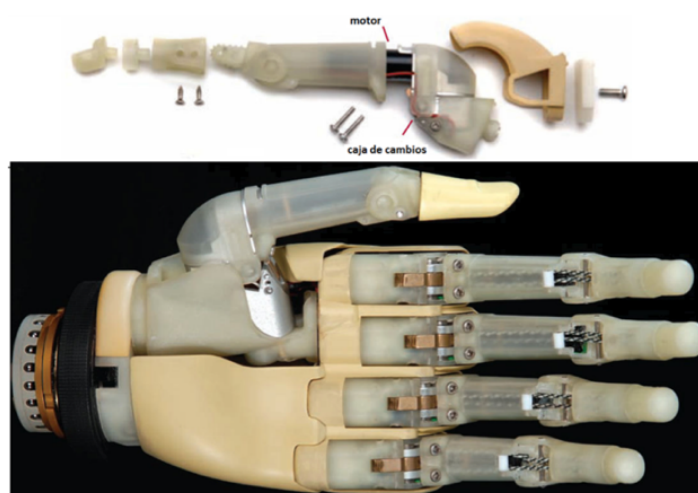


Figura 4. Prótesis Biónica I-Limb [8]

Luke Arm

En 2017 se lanzó al mercado la primera prótesis que tiene la capacidad de enviar la información del tacto al cerebro de sus usuarios y que por tanto interpreten y lleguen a reconocer objetos por su dureza, rugosidad e incluso temperatura. Para conseguir esto, la prótesis está construida con un material con propiedades piezoeléctricas, en otras palabras, propiedades que permiten transformar la tensión mecánica en impulsos eléctricos. Estos impulsos eléctricos luego son pasados por un algoritmo que los traduce y manipula para que lleguen a los nervios periféricos del paciente. El cerebro luego los procesa y llega a sentir el objeto que se está tocando [12]. Cuando se lanzó esta prótesis, se informó de que su precio rondaría los 100,000€, teniendo en cuenta que este precio podía variar según distintos factores, como el tiempo, ubicación geográfica y características para su personalización.



Figura 5. Prótesis “Luke Arm” agarrando una uva sin malograrla [12]

Michelangelo hand

La “Michelangelo hand” es una prótesis fabricada por la empresa Ottobock que es muy conocida por su diseño natural. Además, tiene un peso muy ligero, es potente y muy rápida. Tiene integrada una muñeca que puede girar y tiene una apariencia muy relajada, simulando una muñeca natural. Tiene disponibles unos guantes que cubren la prótesis, pudiendo elegir una opción en la que se ha conseguido una apariencia de una mano humana. También tiene los cuatro dedos movibles y el dedo pulgar que se puede mover de forma independiente a los otros dedos, disponiendo de un total de 7 movimientos de mano funcionales y diseñados para que parezcan de lo más naturales [13]. Esta prótesis cuesta alrededor de 45,000€.



Figura 6 y 7. Izquierda; Prótesis “Michelangelo hand” con la muñeca flexionada. Derecha; Guante con apariencia de mano humana que se coloca en la prótesis [13].

Bebionic3

La bebionic3 es una prótesis de mano también fabricada por Ottobock, con un diseño ergonómico que logra una apariencia natural. Cada dedo de la prótesis se mueve de manera independiente gracias a motores individuales, lo que permite adaptarse a la forma del objeto agarrado. Además, se puede controlar la velocidad de forma proporcional. El pulgar tiene la capacidad de reposicionarse de manera pasiva en diferentes posiciones, lo que posibilita un agarre trípode o lateral. Un botón ubicado en la parte posterior de la mano permite cambiar entre distintos patrones de agarre preconfigurados. La función de sujeción automática detecta si el objeto que se sostiene se desliza y ajusta la sujeción para mantenerlo seguro. La bebionic3 se fabrica utilizando materiales avanzados y duraderos, lo que le confiere la resistencia necesaria para soportar cargas de hasta 45 kg. Esto brinda al usuario confianza para manejar objetos pesados y apoyarse al levantarse de una silla [14]. El precio de esta prótesis está comprendido de unos 30,000€.



Figura 8. Prótesis de mano “Bebionic3” [14].

Al observar estos ejemplos presentados de algunas de las prótesis más solicitadas en la actualidad, se puede apreciar de manera automática que todas ellas incorporan una tecnología altamente avanzada con el objetivo de brindar el máximo beneficio al paciente. No obstante, también es evidente que estas prótesis tienen un coste considerablemente elevado. Si bien existen más opciones disponibles en el mercado actual, las prótesis biónicas de mano funcional suelen tener precios similares a las mencionadas anteriormente. Si se precisa de una prótesis más económica, la opción más común hoy en día es optar por prótesis mecánicas, que son considerablemente más simples y por tanto más sencillas de desarrollar, lo que se traduce en un costo de adquisición de este tipo de prótesis mucho más reducido al de las prótesis biónicas.

4. CLASIFICACIÓN DE PRÓTESIS EXISTENTES EN EL MERCADO

De acuerdo con la definición propuesta en 1960 por Jack Steele de la Fuerza Aérea de Estados Unidos, la biónica consiste en examinar el funcionamiento real de los sistemas vivos y posteriormente aplicar ese conocimiento en la creación de dispositivos. Esto podría sugerir que Leonardo Da Vinci fue uno de los primeros ingenieros biónicos, ya que estudió los principios de funcionamiento de los organismos vivos para inspirar el diseño de máquinas. Como las prótesis se emplean para reemplazar una extremidad perdida, es imprescindible examinar los principios de funcionamiento particulares de dicha extremidad con el objetivo de poder reproducirlos. Por consiguiente, el diseño de prótesis se encuentra intrínsecamente vinculado a la disciplina de la ingeniería biónica. [15]

Las prótesis pueden clasificarse de diversas maneras según sus características físicas o funcionales, como la forma de colocación, la ubicación en el cuerpo y el material de construcción. Una de las clasificaciones más comunes de las prótesis se basa en el tipo de dispositivo en sí mismo. Según este enfoque, existen varios tipos de prótesis, entre los que se incluyen:

- A) **PRÓTESIS ESTÉTICAS:** carecen de movimiento y tienen como objetivo principal mejorar el aspecto estético de la extremidad amputada. Están fabricadas con materiales livianos y de bajo mantenimiento [8].



Figura 9. Imagen de prótesis estéticas [16]

- B) **PRÓTESIS MECÁNICAS**: tienen como función principal la apertura y cierre de la mano, lo que restringe su capacidad de agarre y precisión en el movimiento. Para su operación, se obtiene una señal mecánica de otro miembro del cuerpo [8].

Partes fundamentales de una prótesis mecánica de brazo

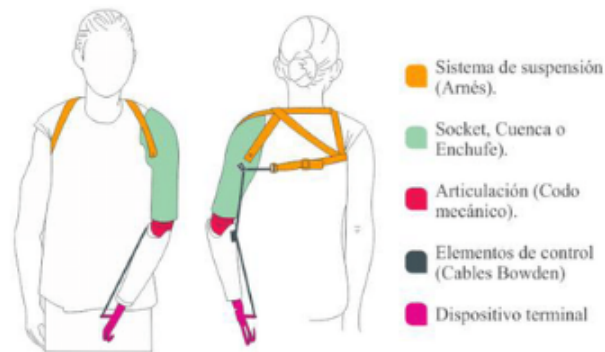


Figura 10. Imagen de prótesis mecánica [8]

- C) **PRÓTESIS ELÉCTRICAS**: utilizan motores eléctricos que pueden ser controlados a través de servo-contróles, pulsantes o interruptores. Aunque tienen la ventaja de la mayor precisión en el movimiento, su principal desventaja es su costo elevado, su vulnerabilidad a ambientes hostiles, y su peso [8].

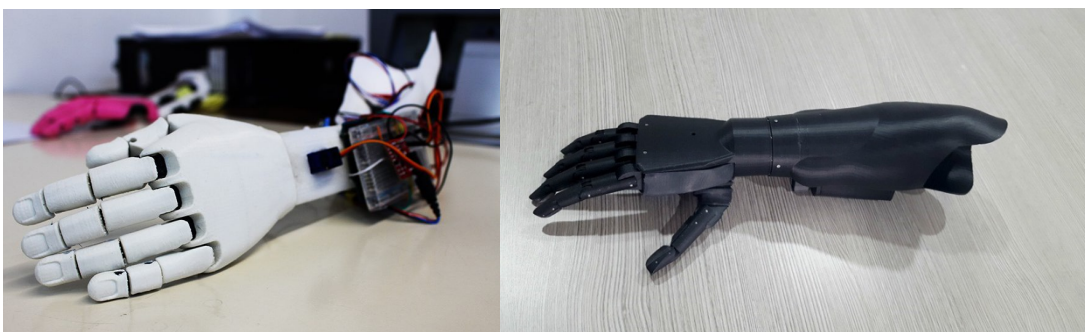


Figura 11. Imágenes de prótesis eléctricas [8]

- D) **PRÓTESIS NEUMÁTICAS**: utilizan aire a presión obtenido mediante un compresor para su funcionamiento. La principal ventaja de estos dispositivos es su capacidad para proporcionar una gran fuerza y rapidez en los movimientos. Sin embargo, su principal desventaja es el tamaño relativamente grande de los dispositivos de control y funcionamiento, así como el costo y la complejidad del mantenimiento [8].

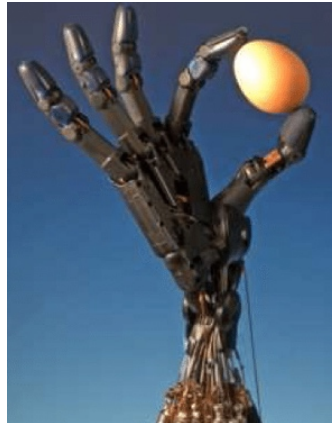


Figura 12. Imagen prótesis neumáticas [8]

- E) **PRÓTESIS MIOELÉCTRICAS**: son ampliamente utilizadas en la actualidad debido a su alta precisión y fuerza, así como a su capacidad para brindar un aspecto más estético. Su funcionamiento se basa en la captura de señales musculares a través de electrodos que amplifican, procesan y filtran la señal para controlar la prótesis [8].

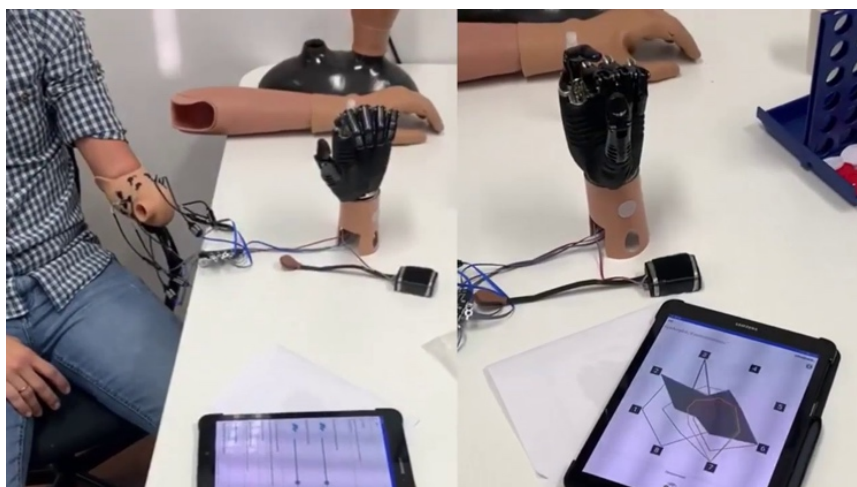


Figura 13. Imagen prótesis mioeléctricas [17]

- F) *PRÓTESIS HÍBRIDAS*: combinan el accionamiento eléctrico con la acción del cuerpo. Este concepto es comúnmente utilizado en prótesis para amputaciones del codo, donde el movimiento del codo es controlado por el cuerpo mientras que el dispositivo terminal, como un gancho o una mano, es controlado mediante señales mioeléctricas [8].



Figura 14. Imagen prótesis híbridas [8]

El prototipo de la prótesis que se desarrolla en este trabajo está clasificado como prótesis biónica de tipo eléctrica, puesto que es un dispositivo electromecánico que se activa mediante un sensor de fuerza que genera impulsos eléctricos que posteriormente recibe el servomotor y que finalmente resulta en el movimiento de la prótesis. Este tipo de prótesis actuales existentes en el mercado son generalmente conocidas por su elevado coste y poca accesibilidad.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. CARACTERÍSTICAS E IMPRESIÓN PIEZAS PRÓTESIS BIÓNICA BÁSICA

Como se ha visto en secciones anteriores, el desarrollo de prótesis biónicas ha sido un tema de interés para la comunidad médica y científica en las últimas décadas. A medida que se han ido utilizando en la práctica, se ha observado una evolución constante en su diseño y producción. La mejora continua de las tecnologías ha sido una de las principales razones detrás de este progreso, permitiendo la creación de prótesis con movimientos y funciones similares a los de una mano anatómica, lo que ha mejorado significativamente la calidad de vida de las personas que han perdido una extremidad.

En este sentido, la robótica y la impresión 3D han desempeñado un papel crucial en el desarrollo de prótesis biónicas más precisas, controlables y personalizables, lo que ha mejorado significativamente su funcionalidad y estética. La robótica ha permitido una mayor precisión en la producción y control de las prótesis, mientras que la impresión 3D ha simplificado el proceso y reducido los costos. Además, ha permitido la personalización de las prótesis, adaptándolas a las necesidades específicas de cada paciente, lo que ha mejorado aún más su funcionalidad y ha aumentado su aceptación por los usuarios finales.

El progreso en el desarrollo de prótesis biónicas ha sido posible gracias a la mejora constante de las tecnologías utilizadas en su producción. La incorporación de la robótica y la impresión 3D ha sido un hito significativo en el desarrollo de prótesis altamente funcionales y estéticamente atractivas, lo que ha mejorado la calidad de vida de muchas personas. Se espera que, con la mejora continua de la tecnología, las prótesis biónicas sigan evolucionando y satisfaciendo las necesidades de los pacientes que las requieren.

En este proyecto, se ha optado por la utilización de técnicas básicas de impresión 3D y robótica para el diseño de la prótesis. En primer lugar, se empleó un conjunto de archivos de código abierto de P4H Bionics para el diseño de la mano. Posteriormente, las piezas se sometieron a un análisis de errores utilizando la herramienta "Netfabb" para identificar los problemas que pudieran surgir durante la impresión. Una vez detectados, se procedió a corregirlos mediante esta misma herramienta para asegurar una correcta impresión en una impresora 3D "Anycubic Predator", puesto que es la impresora que se utilizó para su impresión. Para cada pieza, se tuvieron en cuenta características específicas para su impresión, con el objetivo de asegurar la mejor calidad posible. Para este proyecto, se decidió realizar la prótesis biónica de la mano izquierda, por lo que componentes como la palma, la tapa de la mano y los dedos de la mano están diseñados para esta mano.

5.1.1. DEDOS DE LA MANO

Se procedió inicialmente a realizar la impresión de los dedos de la mano izquierda, la cual permitió obtener una representación fiel de los catorce componentes anatómicos que conforman dicha estructura. Específicamente, se identificaron cinco metacarpianos, los cuales conforman la parte central de la mano, cuatro falanges proximales y medias, que se ubican en la porción intermedia de los dedos, y cinco falanges distales, ubicadas en la extremidad de los dedos y responsables de la flexión y extensión de las falanges proximales y medias.



Figura 15 y 16. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de los dedos de la mano izquierda. Derecha; Resultado de la impresión de los dedos.

Dedos de la mano izquierda		
Material		PLA 1.75mm
Standard quality		0.2mm
Infill	Percentage	20%
	Pattern	Grid
Support	Generate Support	Yes
	Support Structure	Normal
	Structure placement	Touching buildplate
	Pattern	Grid
	Support overhand angle	60°
	Density	20%

Tabla 1. Características para la impresión 3D de los dedos de la mano izquierda.

5.1.2. BRAZO

En segundo lugar, se procedió con el proceso de impresión de la pieza del brazo con la finalidad de producir una pieza que permitiera establecer una conexión entre el miembro anatómico del usuario y la prótesis, haciendo también la función de soporte de la mano biónica. Está diseñada de forma que el servo-housing se posiciona en su interior y conecta esta parte inferior de la prótesis con la parte superior, es decir, la mano.

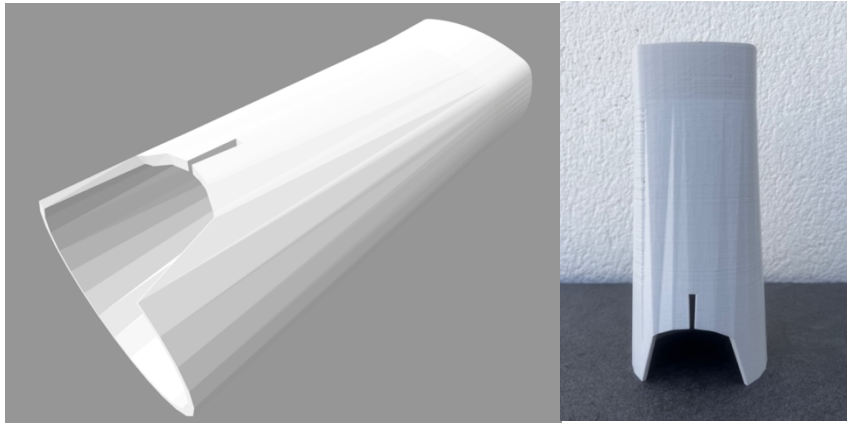


Figura 17 y 18. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics del brazo de la prótesis. Derecha; Resultado de la impresión del brazo.

Brazo		
Material		PLA 1.75mm
Standard quality		0.2mm
Infill	Percentage	20%
	Pattern	Grid
Build plate adhesion	Kind	Skirt
	Skirt line count	3
	Skirt distance	10mm
	Minimum length	250mm

Tabla 2. Características para la impresión 3D del brazo.

5.1.3. SERVO-HOUSING

Se procedió a la impresión del componente denominado "Servo-housing", el cual se caracteriza por constituir una estructura en forma de cámara que alberga al servomotor correspondiente que a su vez es activado por el circuito eléctrico. Este elemento se diseñó de acuerdo a las dimensiones del servomotor utilizado, con la finalidad de asegurar un ajuste preciso y eficiente. Este se integrará dentro de la pieza del brazo, como ya se ha mencionado previamente, y conectará con la pieza de la palma de la mano usando unos tornillos que se posicionarán en ambos lados donde la pieza presenta dos agujeros creados para este fin.

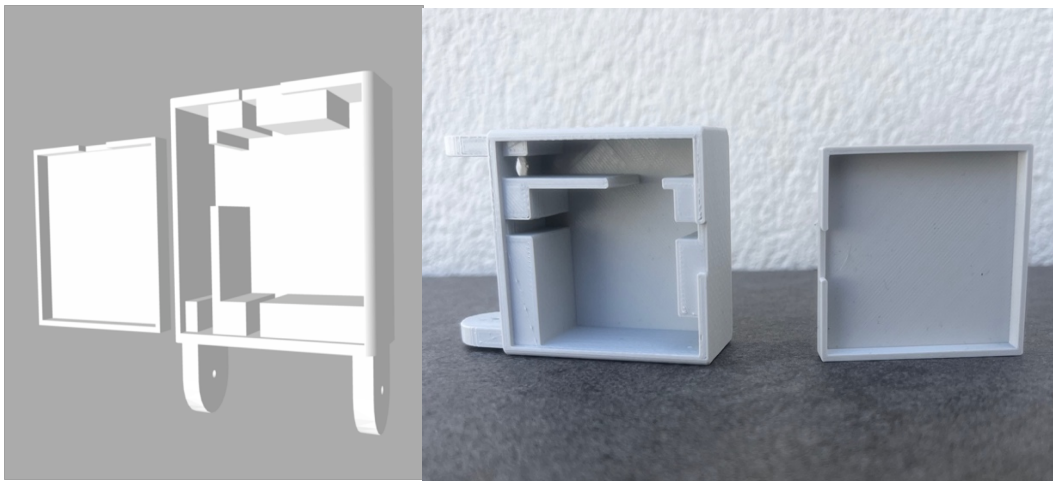


Figura 19 y 20. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de los dedos del servo-housing. Derecha; Derecha; Resultado de la impresión del Servo-housing.

Servo-housing		
Material		PLA 1.75mm
Super quality		0.12mm
Infill	Percentage	50%
Support	Generate Support	Yes
	Support Structure	Normal
	Structure placement	Everywhere
	Pattern	Grid
	Support overhand angle	60°
	Density	20%

Tabla 3. Características para la impresión 3D del servo-housing.

5.1.4. PALMA

Luego, se procedió a la impresión de la palma de la prótesis, la cual se considera posiblemente como la pieza más relevante de todo el conjunto debido a que funciona como el elemento central que conecta y articula todos los componentes de la prótesis. Cabe destacar que la palma es el centro de unión de todas las piezas, ya que todas las piezas impresas están en contacto con la misma; aloja los dedos de la mano, la tapa cubre su dorso, el servo-housing está unido por medio de los tornillos, y el brazo conecta con su parte inferior.

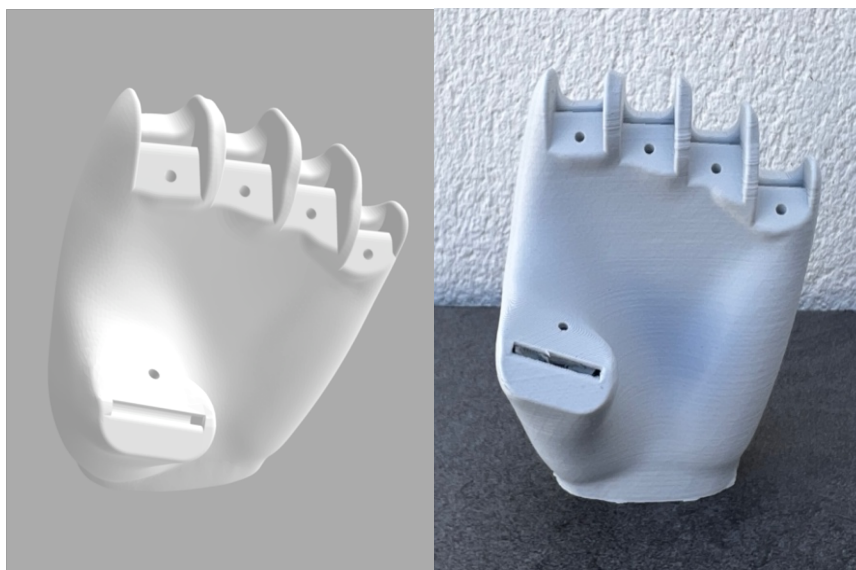


Figura 21 y 22. Izquierda; Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de la palma izquierda, donde se puede apreciar el hueco dejado para integrar el servo-housing. Derecha; Resultado de la impresión de la palma.

Palma izquierda		
Material		PLA 1.75mm
Super quality		0.12mm
Infill	Percentage	30%
Support	Generate Support	Yes
	Support Structure	Normal
	Structure placement	Touching buildplate
	Pattern	Grid
	Support overhand angle	60º
	Density	20%
Material Printing Temperature		210ºC
Speed		50mm/s
Travel	Enable retraction	Yes
	Retraction distance	5mm
Cooling	Enable print cooling	Yes
	Fan speed	100%
Build plate adhesion		Brim

Tabla 4. Características para la impresión 3D de la palma izquierda.

5.1.5. TAPA

Posteriormente, se llevó a cabo la impresión de la tapa que cubrirá la palma de la mano protésica. Esta pieza se diseñó con la finalidad de proporcionar un acabado estético más atractivo y mejorar la apariencia visual de la prótesis, ocultando el mecanismo interno de los hilos que mueven los dedos. Una vez impresa la tapa, se colocará en el dorso de la palma de la prótesis, generando un conjunto cerrado. Cabe destacar que esta tapa no solo aporta un beneficio estético, sino que también contribuye a la protección de los hilos en su interior, garantizando su correcto funcionamiento, protección frente a elementos extraños y durabilidad.

Para su impresión, no se necesitó ninguna especificación especial, por lo que se imprimió con las características que vienen predeterminadas en la herramienta de Ultimaker para la impresión de piezas 3D.

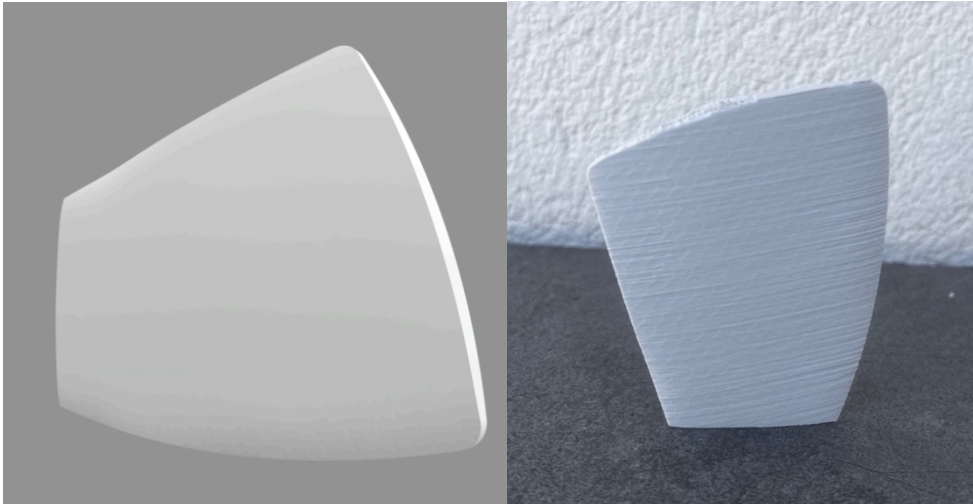


Figura 23 y 24: Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de la tapa de la prótesis.

5.1.6. ARTICULACIONES DE LOS DEDOS

Finalmente, se procedió a la impresión de las articulaciones que conectan los dedos con la palma de la mano protésica. Estas piezas representaron un desafío debido a que son cruciales para el correcto funcionamiento de la prótesis y requieren una fabricación cuidadosa con materiales flexibles, a diferencia de las piezas previamente impresas. La función principal de estas articulaciones es permitir la flexión y extensión de los dedos, permitiendo la capacidad de agarre de la mano, así como su retorno a la posición original. Debido a su complejidad y delicadeza, se requiere un proceso de impresión detallado y preciso para garantizar la funcionalidad óptima de la prótesis. Con la impresión exitosa de estas piezas, se logra la integración completa de la mano protésica, permitiendo al usuario recuperar la capacidad de manipulación y movimiento de la extremidad. Además, son las responsables de que la prótesis tenga un movimiento más similar al anatómico y no tan robótico, y sin ellas, habría que utilizar otro tipo de mecanismo para poder simular el movimiento de agarre de la mano.

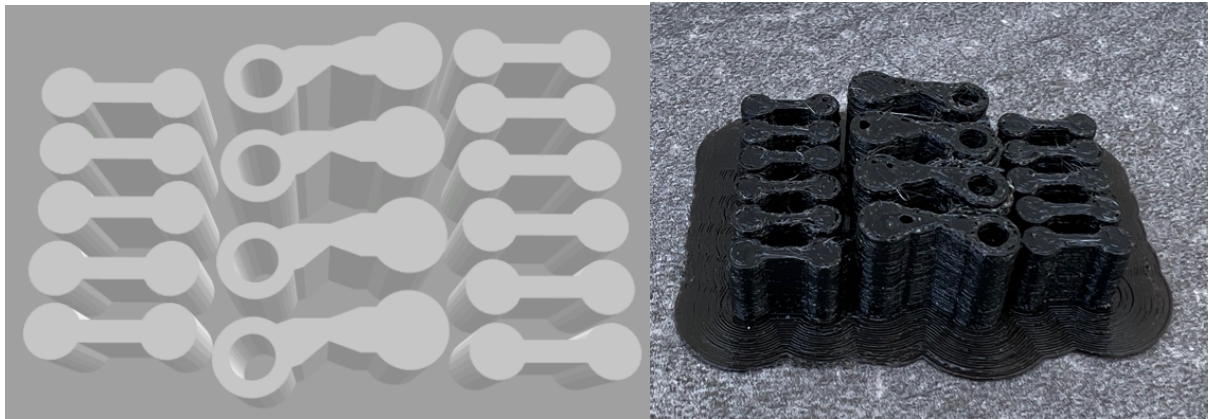


Figura 25. Vista del archivo STL proporcionado por P4H Bionics de las articulaciones de los dedos.

Articulaciones		
Material		Sunlu TPU Filamentos 1.75mm
Super quality		0.12mm
Infill	Density	35%
	Pattern	Grid
Shell	Z sean position	Back
Material	Printing temperature	230°C
	Build plate temperature	50°C
Speed	Print speed	35mm/s
Travel	Retraction distance	0.5mm%
	Retraction speed	35mm/s
Support		No
Build plate adhesion		Grim

Tabla 5. Características para la impresión 3D de las articulaciones.

Una vez finalizada la impresión de todas las piezas que integran la prótesis de mano biónica, se procedió a la eliminación de las imperfecciones generadas durante el proceso de impresión de las piezas debido a la inclusión del soporte, necesario para la correcta impresión de dichas piezas. Como se puede observar en las figuras proporcionadas de los resultados de la impresión, aun imprimiendo

las piezas con las características necesarias para su impresión óptima, estas presentan unas leves imperfecciones, no obstante, esto no afecta a su finalidad.

Piezas	Material	Tiempo de producción		Gramos
		Horas	Minutos	
<i>Dedos</i>	PLA	20	37	117 g
<i>Brazo</i>	PLA	41	26	232 g
<i>Servo-housing</i>	PLA	22	44	50 g
<i>Palma</i>	PLA	4	11	160 g
<i>Tapa</i>	PLA	4	41	29 g
<i>Articulaciones</i>	TPU	10	44	15 g
<i>Total</i>		<i>104 h 23 min</i>		<i>603 g</i>

Tabla 6. Tiempo empleado en imprimir cada uno de los grupos de piezas mencionados y cantidad de material utilizado en la impresión en gramos.

El tiempo total en imprimir todas las piezas fue de 104 horas y 23 minutos, que es equivalente a 4 días, 8 horas y 10 minutos. Además, se utilizó un total de 603 gramos de material, 588 gramos de PLA y 15 gramos de TPU.

5.2. CIRCUITO ELÉCTRICO Y SENSOR DE PRESIÓN

Durante el desarrollo de la parte robótica de la prótesis de mano biónica se han utilizado diversos materiales que han sido seleccionados cuidadosamente para asegurar su funcionamiento óptimo y un bajo costo. Para lograr este objetivo, se evaluaron múltiples opciones en términos de costo y rendimiento, y se identificaron los materiales que mejor se ajustaron a las especificaciones requeridas. Además, se consideró la accesibilidad de estos materiales para garantizar que sean fácilmente adquiridos por cualquier usuario que necesite desarrollar una prótesis de mano biónica. Como resultado, se han utilizado materiales asequibles y eficientes en la fabricación de la prótesis.

La lista de materiales y componentes utilizados en el desarrollo de la prótesis de mano biónica incluye: una batería de litio recargable, cargador de la batería, un regulador de voltaje, un sensor de presión FSR, una placa Arduino nano para el control del servomotor, un rollo de hilo de pesca, un servomotor, una placa mini protoboard, unos pines de conexión, una resistencia y unos tornillos de 3x5mm. Todos estos materiales han sido seleccionados cuidadosamente para cumplir con las especificaciones requeridas y al mismo tiempo ajustarse al presupuesto establecido para el proyecto de prótesis de mano biónica.



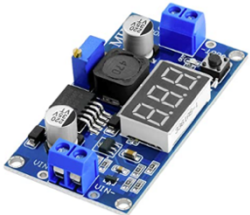

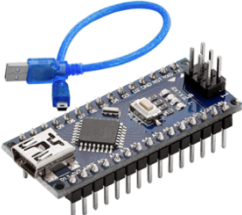


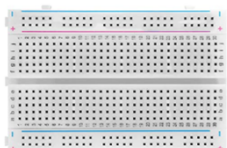
Componentes	Características	Imagen
<i>Batería</i>	7.4V 2200mAh Células 2S	
<i>Cargador de batería</i>	Cargador para baterías: 7.4V Células 2S 2200mAh	
<i>Regulador de voltaje</i>	LM2596 Modulo convertidor reductor Step down DC-DC Voltaje de entrada: 4-40V Voltaje de salida: 3.3-24	
<i>Sensor de presión/fuerza</i>	FSR402 para Arduino: 0.5 pulgadas	
<i>Placa Arduino</i>	Nano Tensión de funcionamiento: 5V Tensión de alimentación: 7-12V	
<i>Cuerda de pesca</i>	Resistencia de rotura: 31kg No elástico	
<i>Servomotor</i>	MG995 Compatible con Arduino	
<i>Mini protoboard</i>	-	

Tabla 7. Lista de componentes con sus correspondientes características e imágenes que se han utilizado en el desarrollo de la parte robótica de la mano biónica.

5.2.1. Instalación de controladores y programación de la placa Arduino

Las placas de Arduino son placas de desarrollo que se basan en un controlador Atmel, siendo estos, circuitos integrados en los que se graban instrucciones por medio de lenguajes de programación usando un entorno de desarrollo integrado, o en la mayoría de los casos, la aplicación Arduino IDE [18]. Por tanto, para comenzar con la programación de la placa de Arduino, primero, se deben instalar los controladores ya que permitirán la identificación de la placa Arduino y la interacción de esta con ordenador al que está conectada por medio de un puerto USB. Por lo que se instaló el controlador “Arduino IDE” de la página oficial de Arduino.

Después de conectar la placa de Arduino al equipo, se procedió a realizar las siguientes configuraciones en el programa “Arduino IDE”:

1. Selección de la placa correspondiente al modelo “Arduino Nano”, se eligió el procesador ATmega328P con antiguo bootloader.
2. Selección del puerto COM3 y el programador “AVRISP mkII” para establecer la conexión entre la placa y el equipo.

La realización de estas configuraciones es crucial para establecer una comunicación efectiva entre la placa de Arduino y el software de programación, lo que resulta imprescindible para el funcionamiento adecuado de cualquier proyecto o aplicación desarrollada en la plataforma Arduino.

Después se procedió a realizar un testeo para comprobar que la placa funcionaba correctamente. Este paso es completamente necesario para comprobar el correcto funcionamiento de la placa y así eliminar la placa como causante de un fallo en caso de que luego la prótesis no funcione o no responda como debería frente al sistema.

El testeo consistió en probar uno de los ejemplos existentes en el programa “Arduino IDE”. En este caso, se eligió “Blink”, que enciende y apaga el LED de la placa por el tiempo que se especifica en el programa. Se comprobó con un tiempo de encendido y apagado de 1, 3 y 0.5 segundos actualizando el programa y se comprobó que la placa de Arduino funcionaba correctamente.

Una vez realizado el testeo, se procedió a cargar en la placa el programa necesario, que habilita el control del servomotor en respuesta a la entrada del sensor de fuerza FSR de manera precisa y exacta, controlando de esta forma indirecta los dedos y, por tanto, generando el movimiento de “agarre” de la mano. Los servomotores son dispositivos actuadores capaces de proporcionar un control altamente preciso en cuanto a la posición rotacional y angular [19]. Tienen un total de 3 pines conectados: el pin de alimentación (normalmente rojo), el pin de tierra (normalmente negro) y el pin de la señal (normalmente naranja). Este último, obtiene la señal de pulso modulada (PWM) de la placa de Arduino

que indica al servomotor la posición que debe generar. Esta señal PWM se obtiene por la duración en la que el ancho de pulso es positivo, es decir, la duración en la que se presiona el sensor de presión. Por lo que, cuando el pulso sea corto corresponderá a un ángulo de giro del motor 0º, cuando el pulso sea intermedio corresponderá un ángulo de 90º y cuando el pulso sea largo corresponderá a un giro de 180º.



```
Knob.ino  readme.md
1  /*
2  Controlling a servo position using a potentiometer (variable resistor)
3  by Michal Rinott <http://people.interaction-ivrea.it/m.rinott>
4
5  modified on 8 Nov 2013
6  by Scott Fitzgerald
7  http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Knob
8  */
9
10 #include <Servo.h>
11
12 Servo myservo; // create servo object to control a servo
13
14 int potpin = 0; // analog pin used to connect the potentiometer
15 int val; // variable to read the value from the analog pin
16
17 void setup() {
18   myservo.attach(9); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
19 }
20
21 void loop() {
22   val = analogRead(potpin); // reads the value of the potentiometer (value between 0 and 1023)
23   val = map(val, 0, 1023, 0, 180); // scale it for use with the servo (value between 0 and 180)
24   myservo.write(val); // sets the servo position according to the scaled value
25   delay(15); // waits for the servo to get there
26 }
27
```

Figura 26. Programa cargado en la placa Arduino para el funcionamiento del servomotor.

El programa utilizado se llama “Knob”, y se encuentra en la biblioteca de programas de "Arduino IDE". Este programa utiliza una entrada analógica del sensor FSR conectado a una de las entradas analógicas del Arduino, y después de medir el valor de voltaje del sensor, se realiza una asignación de valores de posición del servomotor mediante la técnica de mapeo. Luego, el programa envía señales de control PWM a la entrada del servo-motor para controlar su posición, como se ha explicado anteriormente.

En relación a la prótesis, el programa "Knob" se utiliza para controlar la posición de los dedos y permitir el movimiento de "agarre". Es decir, al presionar el sensor de presión, el programa mapea la duración del pulso a la posición del servomotor que controla los dedos de la prótesis. De esta forma, al presionar el sensor, se puede controlar la apertura y cierre de los dedos de la prótesis.

5.2.2. Calibración

Para garantizar el óptimo rendimiento del circuito eléctrico, se llevó a cabo la calibración del modulador de voltaje. Como la batería disponible proporcionaba una potencia de 7.4V, se hizo

indispensable disminuir el voltaje que llegaba al circuito para que no sobrecargase el resto de componentes del circuito. Para lograr este objetivo, se procedió a la conexión del modulador de voltaje a la batería y a un multímetro. Posteriormente, se midió el voltaje suministrado por la batería utilizando el multímetro, el cual tenía una lectura de 7.4V. En consecuencia, se procedió a reducir dicho voltaje a una cantidad de 5.1V. De esta manera, se pudo garantizar que el circuito eléctrico operara de manera eficiente y sin sufrir sobrecargas que pudieran dañar sus componentes.

5.3. ENSAMBLAJE

5.3.1. Montaje manos y dedos

Para esta sección, se procedió a utilizar las piezas que simulaban los dedos y la palma de la mano ya libres de imperfecciones y con el acabado superficial deseado.

Se utilizaron las piezas que simulaban las articulaciones para la construcción de todos los dedos y las partes de la mano. Las articulaciones más pequeñas, se emplearon para cohesionar las falanges entre sí, y las articulaciones más grandes, para la unión de cada uno de los cinco dedos con la palma de la mano. Con el propósito de asegurar una unión firme y duradera, se utilizó un pegamento que se aplicó en las ranuras de las piezas para evitar su movimiento y, por tanto, que se soltasen. Sin embargo, la parte de las articulaciones entre las mismas piezas se dejó libre para que no afectase a su función y permitiese su flexión.

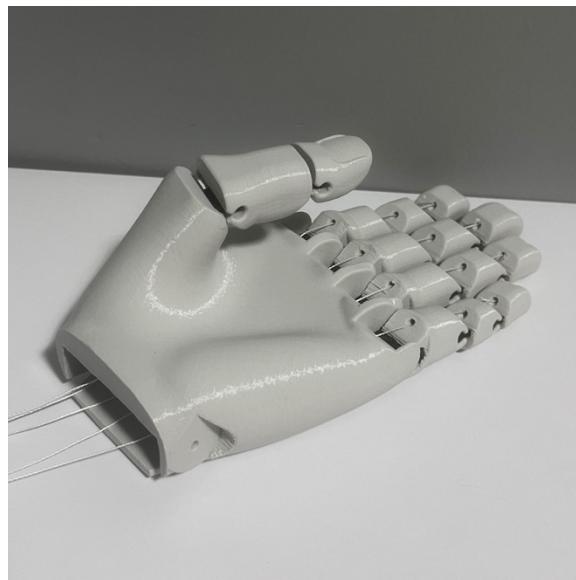


Figura 27. Mano montada con los dedos unidos mediante las articulaciones y los hilos utilizados para mover el sistema ya integrados en los dedos correspondientes.

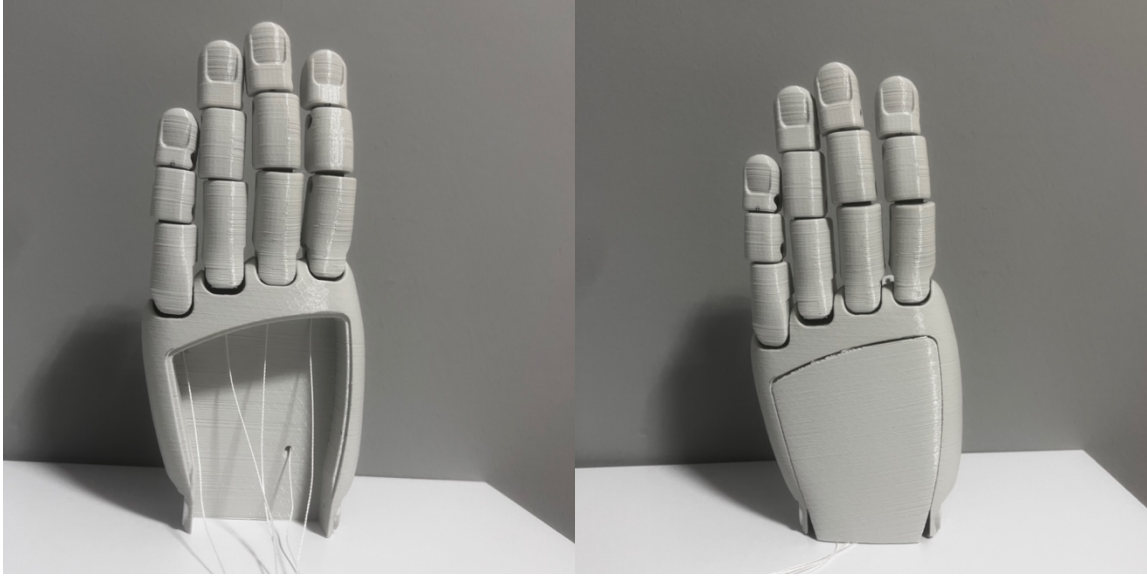


Figura 28 y 29. Izquierda; dorso de la mano con el mecanismo de los hilos visible. Derecha; dorso de la mano con la tapa posicionada.

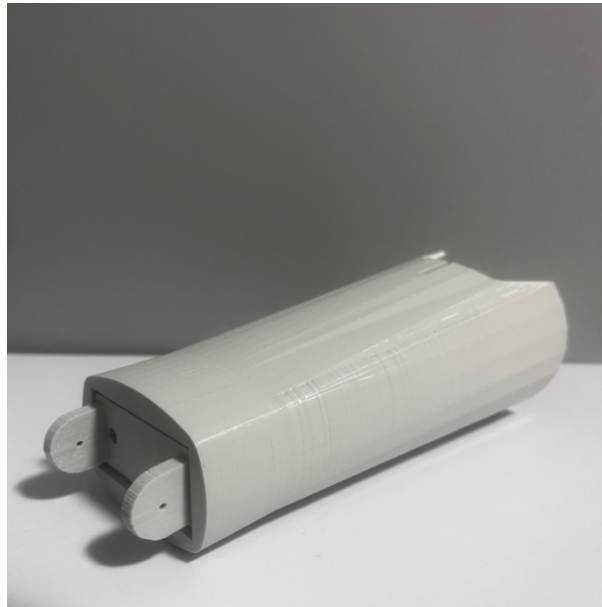


Figura 30. Servo-housing introducido dentro de la pieza del brazo, con las pestañas diseñadas para la unión de la parte inferior de la prótesis con la mano.

5.3.2. Montaje electrónico

Dado que ya se había llevado a cabo la calibración del regulador de voltaje, se procedió al ensamblaje del circuito electrónico directamente. Esta sección es la que supuso una mayor complejidad debido a la cantidad de distintos componentes, previamente descritos, así como sus distintas especificaciones técnicas. No obstante, a pesar de estas dificultades, se logró completar el ensamblaje del circuito de manera exitosa, resultando ser un proceso más sencillo de lo que inicialmente se había previsto. Como resultado, se obtuvo el siguiente circuito completamente armado.

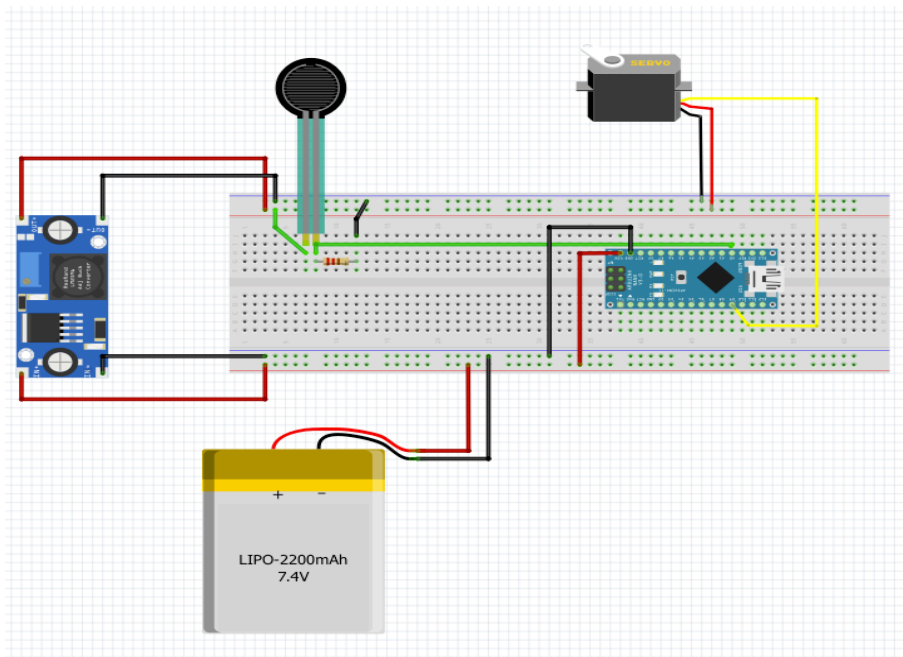


Figura 31. Circuito electrónico con los siguientes componentes: batería 2200mAh (7.4V), regulador de voltaje, sensor FSR, resistencia 100kΩ, placa Arduino nano y servomotor.

En el circuito presentado en la *Figura 31*, se puede observar que la batería se utiliza para suministrar la tensión necesaria para el funcionamiento del servomotor, antes modulando dicha tensión mediante el regulador de voltaje. Luego, el sensor FSR (Sensor de Fuerza Resistiva) se conecta positivamente en la izquierda, que recibirá la tensión ya regulada de la batería, y a tierra en la derecha. Además, el FSR generará una diferencia de potencial con respecto a la resistencia de 100kΩ. Se ha utilizado una resistencia de 100kΩ de acuerdo a las especificaciones del fabricante del sensor FSR. Dicha diferencia de potencial, generará una corriente que traspasará a la placa Arduino a través de la entrada analógica (pin A0) al que el FSR estará conectado. A medida que aumenta la fuerza aplicada al sensor, aumenta la diferencia de potencial y, por lo tanto, se genera una mayor corriente. Esta corriente es recibida por

la placa de Arduino a través del puerto A0 y es la que activará el servomotor gracias al procesamiento del programa previamente instalado en la placa Arduino.

Para conectar la placa Arduino a una fuente de alimentación externa, se debe utilizar el pin V_{IN} de la placa, que permite suministrar una tensión al microcontrolador. Este pin debe conectarse a uno de los terminales de la batería que actúa como fuente de energía para la placa. Es fundamental verificar que el voltaje proporcionado por la batería se encuentre dentro del rango de operación especificado por el fabricante de la placa, ya que una tensión inadecuada podría provocar daños en el circuito.

En cuanto a la conexión a tierra del GND (Ground), es esencial que se conecte al terminal negativo (-) de la batería para crear un punto de referencia común para todos los elementos del circuito. Esto garantiza que las señales eléctricas se transmitan de manera eficiente y evita posibles interferencias electromagnéticas y fluctuaciones de voltaje. Es importante destacar que la conexión a tierra debe ser adecuada para asegurar el correcto funcionamiento del circuito, ya que una conexión deficiente podría afectar la precisión de las mediciones y el rendimiento de los componentes.

En el diseño de este circuito, se hace uso del pin D9 de la placa Arduino como una señal de salida para controlar la posición y velocidad del servomotor. Los pines digitales de la placa se pueden programar para generar una señal de salida PWM que puede ajustar el ancho del pulso para controlar el movimiento del servomotor. El pin D9 se conecta al cable de señal del servomotor, que es el medio de comunicación para la señal PWM desde la placa de Arduino al servomotor. Es fundamental verificar que la capacidad de salida del pin D9 sea compatible con el voltaje y la corriente requeridos por el servomotor antes de conectarlo a la placa. Además, es importante conectar el polo negativo del servomotor al polo negativo de la fuente de alimentación para garantizar que la señal de control del motor sea adecuada y se evite la interferencia en el circuito.

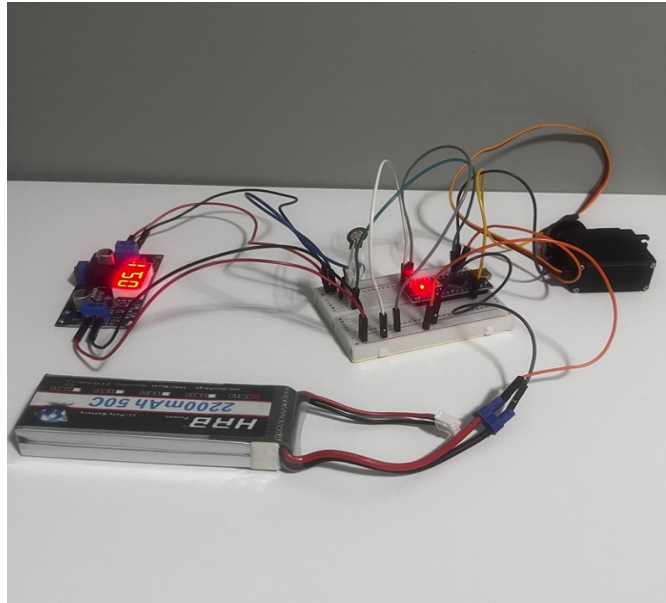


Figura 32. Montaje del circuito eléctrico.

5.3.3. Prótesis completa

En esta última etapa del desarrollo del proyecto, se integró el circuito electrónico a las piezas de la mano y el brazo, creando finalmente la prótesis biónica de mano en su completo. En primer lugar, se ataron los hilos que sirven como mecanismo para el movimiento de los dedos al servomotor. Dado que ciertos dedos, como el pulgar, el índice y el dedo pequeño, requieren una mayor tensión para generar un movimiento de agarre eficiente, se aplica una mayor tensión a estos hilos correspondientes a las falanges de los dedos mencionados. Una vez atados los hilos, el servomotor se alojó en el servo-housing.

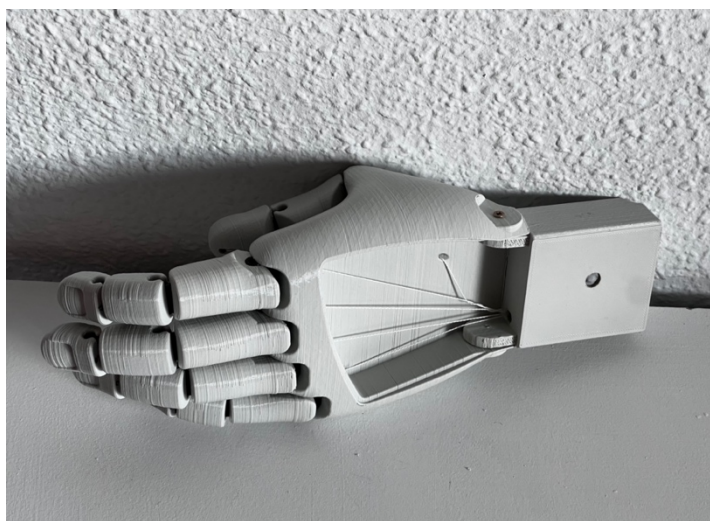


Figura 33. Servo-housing integrado a la mano con tornillos 3x5mm.

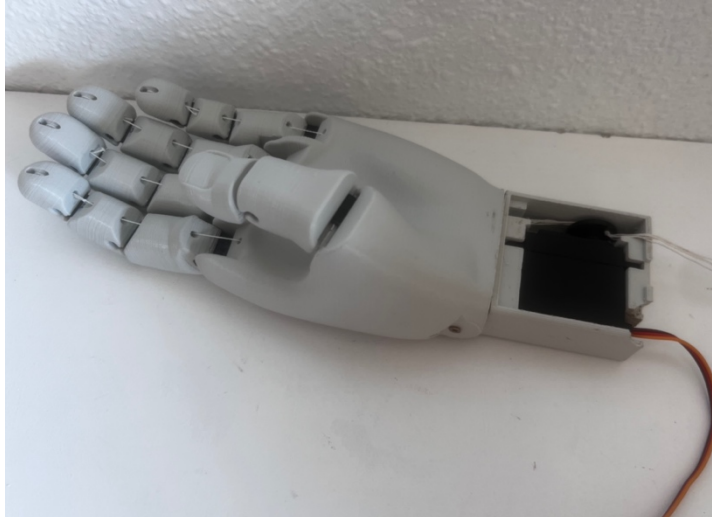


Figura 34. Servomotor dentro del servo-housing anclado a la pieza de la mano

Por último, para unir la mano con el brazo que contiene el servo-housing y el servomotor, se emplearon dos tornillos de 3x5mm por medio de los agujeros en el servo-housing que están estratégicamente ubicados, como se puede ver en la Figura 34. Estos tornillos proporcionan una conexión sólida y segura entre la palma de la mano y, por tanto, toda la estructura de la mano, y el servo-housing, que al encontrarse dentro de la estructura del brazo garantiza una alineación adecuada y estabilidad para el uso de la prótesis. Por último, se colocó la pieza del brazo en la prótesis introduciendo en su interior por la parte superior el servo-housing. Las siguientes figuras muestran el resultado de como quedó la prótesis completamente ensamblada.

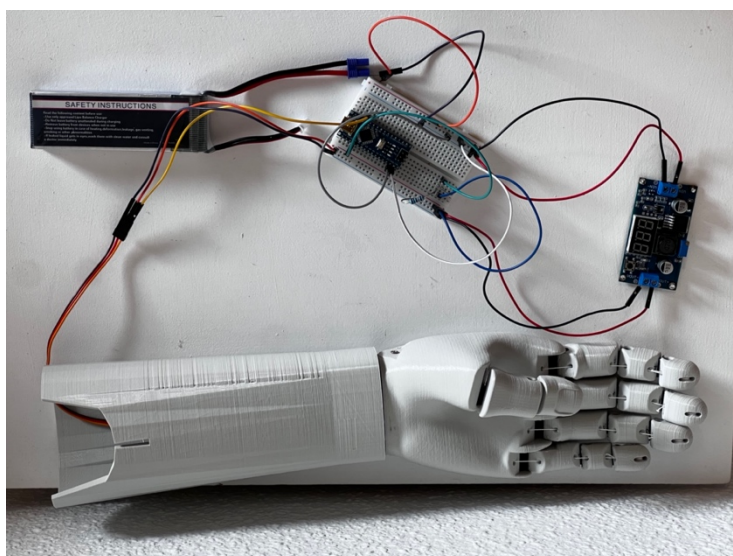


Figura 35. Vista frontal de la prótesis biónica de mano básica completamente ensamblada.

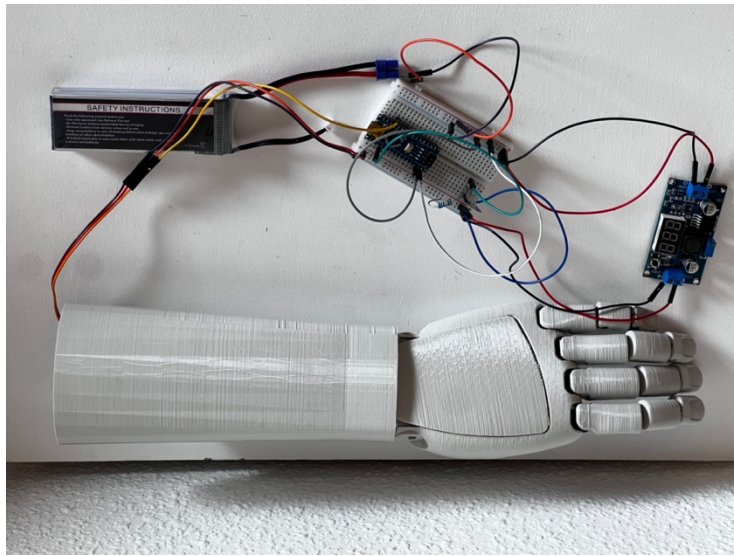


Figura 36. Vista posterior de la prótesis biológica de mano básica completamente ensamblada.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha desarrollado con éxito una prótesis biónica de mano que demuestra un funcionamiento completo. La activación del movimiento de agarre de objetos se logra mediante un sensor de presión integrado en el circuito. Al aplicar una ligera presión al sensor, se activa el servo motor, lo cual provoca la rotación y tensión de los hilos que controlan los dedos. Esta prótesis no requiere una presión específica para su activación, sino que responde de manera precisa al incremento en el tiempo en el que se presiona el sensor, cerrando la mano con mayor fuerza a medida que se aumenta el tiempo de presión ejercida en el sensor.

Además, se ha logrado alcanzar una velocidad óptima para el agarre de objetos, imitando el movimiento humano habitual al manipular objetos. La prótesis es capaz de agarrar objetos de hasta 1 kilo sin mucha dificultad. Sin embargo, se ha identificado que la prótesis no está preparada para objetos de mayor peso, ya que no sería capaz de agarrarlos. Otro desafío observado en esta prótesis es la posible tendencia de los materiales a resbalar de la mano, debido a la naturaleza ligeramente deslizante de los materiales utilizados, un factor que no fue considerado inicialmente.

Durante las pruebas, se ha confirmado que la prótesis resulta cómoda de utilizar. Una ventaja destacada es su capacidad de personalización, ya que puede adaptarse completamente a las medidas y preferencias del usuario. Su manejo resulta muy sencillo y la interfaz entre el usuario y la prótesis es intuitiva. Esta prótesis podría presentarse como una alternativa viable a las prótesis convencionales una vez que los sensores se integren dentro de la prótesis y el circuito se oculte.

Es importante señalar que en el diseño de esta prótesis no se consideraron medidas específicas de personalización, ya que se utilizó un diseño basado en medidas estándar. Sin embargo, todas las partes de la prótesis podrían personalizarse de manera sencilla, como, por ejemplo, la longitud del brazo podría reducirse, el tamaño de la prótesis podría ajustarse y podrían realizarse cambios en el color, entre numerosas otras posibilidades.

Una limitación adicional que se podría identificar en esta prótesis es su durabilidad, ya que se requiere realizar verificaciones periódicas para asegurar la integridad de los hilos y la resistencia de las piezas impresas a golpes y arañazos causados por el uso. Además, se debe considerar que esta prótesis presenta limitaciones al utilizarse en ambientes mojados o húmedos debido a la ubicación del circuito en el exterior de la prótesis (aunque en alguna personalización se incluya algún mecanismo para protegerlo y mejorar su apariencia estética). En caso de que el circuito se exponga al agua, existe el riesgo de dañarlo irreversiblemente.

Otra característica positiva destacable de esta prótesis es su ligereza, atribuida a los materiales utilizados en la impresión 3D y al emplear un circuito simple y reducido. Al aprovechar la tecnología de impresión 3D, se han seleccionado materiales duraderos, adaptables y livianos. A pesar de contar con un circuito integrado, la prótesis no resulta pesada, lo cual es una ventaja considerando que está

diseñada para ser utilizada de manera continua durante largos periodos de tiempo. De este modo, el brazo del usuario no se fatiga y se logra un nivel de comodidad satisfactorio.

Por consiguiente, al lograr un movimiento de "agarre" efectivo, la prótesis cumple con su función prevista, lo que implica alcanzar los objetivos establecidos, puesto que se ha desarrollado una prótesis completamente funcional que utiliza elementos de bajo costo y accesibles, lo cual elimina las limitaciones económicas y de acceso a los materiales para cualquier persona interesada en crear este tipo de prótesis.

7. CONCLUSIONES

Tras una exhaustiva investigación sobre las necesidades actuales de las personas que han sufrido amputaciones a nivel de la muñeca o el brazo, así como el análisis de las distintas prótesis existentes que han ido mejorando e innovando a lo largo de los años, además de exponer la clasificación de los tipos de prótesis existentes hoy en día, se ha llevado a cabo una revisión detallada de los pasos necesarios para desarrollar una prótesis de mano biónica de bajo costo y altamente accesible para cualquier individuo. La tecnología de impresión 3D ha sido seleccionada como una solución avanzada y asequible para la creación de las piezas requeridas en el montaje de la prótesis. Se han utilizado dos tipos de materiales: PLA, altamente accesible y fácil de utilizar, para la fabricación de la mayoría de las piezas y TPU, que proporciona la flexibilidad deseada en las articulaciones de la mano. Además, se han identificado y presentado las características generales de cada uno de los componentes necesarios, así como una guía detallada para la preparación y el ensamblaje del circuito eléctrico. Por último, se han proporcionado instrucciones paso a paso para el correcto ensamblaje de la prótesis, brindando así una solución práctica y accesible para mejorar la calidad de vida de las personas con amputaciones de mano y brazo.

Además, tras haber desarrollado exitosamente esta prótesis biónica de mano utilizando tecnología de impresión 3D, considero que este enfoque representa un avance notable en la creación de prótesis que sean accesibles y con un coste reducido. El uso de la impresión 3D ha demostrado ser una herramienta altamente versátil y eficiente para la fabricación de las piezas. Permite una personalización y una adaptación al usuario que puede que con otras técnicas fuese más complicado de conseguir.

Esta prótesis ha demostrado unos resultados prometedores en cuanto a su funcionalidad para los usuarios. La combinación de materiales como PLA y TPU, ha permitido un rango de movimiento más natural y permite una mayor destreza para realizar actividades diarias. Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen áreas que podrían mejorarse para seguir avanzando en este tipo de métodos de desarrollo de prótesis biónicas de mano de bajo costo, como por ejemplo la durabilidad de las piezas impresas en impresoras 3D, ya que ciertos materiales podrían mostrar cierta fragilidad o plasticidad a lo largo de los años frente a un uso intensivo.

Adicionalmente, continuar mejorando el rendimiento y la precisión del circuito electrónico para el movimiento de la prótesis es crucial. El uso de sensores mioeléctricos en esta prótesis proporcionaría una precisión y una funcionalidad más elevada, permitiendo al usuario una experiencia más avanzada, no obstante, se necesitaría una serie de ajustes en la prótesis para la correcta integración del circuito, además de entrenamiento del usuario para que aprendiese a usarla de manera natural. También se podría explorar la posibilidad de reducir aún más los costos de producción y aumentar la accesibilidad utilizando materiales más económicos y optimizando el proceso de impresión 3D.

Por lo que, aunque hay aspectos que requieren mejora, el método y las herramientas utilizadas en este proyecto para el desarrollo de una prótesis biónica básica de mano tienen mucho potencial para

mejorar la calidad de vida de los usuarios que necesiten este tipo de prótesis, además, es un avance prometedor que promete una solución accesible y de gran utilidad debido a su funcionalidad para personas que han perdido una mano.

8. LIMITACIONES DEL TRABAJO Y LÍNEAS FUTURAS

Durante el desarrollo de este proyecto, se han identificado y enfrentado varias limitaciones que han impactado o amenazado su desarrollo. En primer lugar, se encontraron dificultades al imprimir las articulaciones utilizando los filamentos flexibles de TPU. A pesar de seguir las especificaciones del fabricante, se encontraron dificultades para imprimir las piezas con la flexibilidad y calidad deseada. Se tuvieron que llevar a cabo múltiples pruebas seguidas de una extensa investigación para obtener los parámetros de impresión necesarios que obtuviesen el acabado deseado en la pieza de impresión. Además, otra limitación encontrada es en el circuito de la misma prótesis, ya que tiene un tamaño y una apariencia poco conveniente. A pesar de poder incorporarlo en la parte externa del brazo de la prótesis, el circuito todavía resulta voluminoso y puede crear una apariencia de inacabado, además de estar expuesto a posibles golpes externos que amenacen el circuito.

Con el objetivo de alcanzar una prótesis biónica de mano básica más avanzada que sea completamente funcional, cómoda y útil para el usuario, se proponen las siguientes recomendaciones y mejoras para futuros desarrollos:

1. Integración del sensor de presión: Se sugiere integrar el sensor de presión, o incluso utilizar múltiples sensores, en una diadema colocada en el interior de la prótesis. Esta ubicación permitiría un mejor ajuste y sujeción del sensor, mejorando la efectividad del entrenamiento del usuario para activar la prótesis. Además, esta integración evitaría la pérdida del sensor, ya que estaría siempre conectado a la diadema.
2. Protección estética del circuito eléctrico: Se propone la integración de un circuito eléctrico en la prótesis, mediante la creación de una tapa que cubra y proteja el circuito. Esto proporcionaría un acabado más estético a la prótesis, al tiempo que garantizaría la seguridad y protección del circuito contra posibles golpes o daños externos.
3. Reducción de costes: Aunque se ha logrado desarrollar una prótesis funcional a bajo costo, se recomienda seguir investigando y explorar formas de reducir aún más los costes asociados. Esto podría incluir la optimización de los procesos de fabricación, el uso de materiales más económicos o la búsqueda de alternativas de suministro más asequibles.
4. Utilización de sensores mioeléctricos: Se sugiere considerar la implementación de sensores mioeléctricos en el sistema de activación de la prótesis, lo cual requeriría adaptaciones en el circuito. Estos sensores permiten una activación más precisa y natural, capturando las señales eléctricas generadas por los músculos del usuario. Sería necesario proporcionar un entrenamiento adecuado al usuario para utilizar la prótesis de manera efectiva.
5. Ampliación de los movimientos de la prótesis: Se plantea la inclusión de movimientos adicionales, como el giro o la pinza, en la funcionalidad de la prótesis. Esto permitiría al usuario

realizar una mayor variedad de movimientos y gestos, mejorando su capacidad de interactuar con el entorno de una manera más completa.

Estas dos últimas recomendaciones proponen llevar este proyecto mucho más allá y atreverse a realizar un cambio que permitiese conseguir una prótesis mucho más avanzada, sin embargo, esto supondría un gran reto.

En general, todas las recomendaciones y mejoras propuestas representan puntos clave a tener en cuenta para que el desarrollo de prótesis biónicas de mano impresas en 3D prospere manteniendo siempre un bajo costo y aumentando su funcionalidad, comodidad para la persona que vaya a usarla y accesibilidad para todos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pacheco LRC, Chon AC, Osnaya IC, et al. Reimplante de mano o alguno de sus componentes por amputación traumática. *Rev Hosp Jua Mex.* 2008;75(4):264-27
- [2] Sánchez Navarro, I. (2018). Prótesis biónicas, biología y tecnología. *Panorama Actual Del Medicamento*, 42(411), 256–259.
- [3] Rodríguez, D., Eduardo, C., Ángel Nieto, M., Alejandro, S., & Ángel Gómez, M. (2017). Aspectos anatómicos I. Generalidades, osteología y artrología. *Morfología*, 12 (1), 2020. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/osteologia/la-mano-aspectos-anatomicos-i-generalidades-osteologia-y-artrologia/17426281>
- [4] Amparo, L., López, A., Segundo, M., Maestría, S., & Departamento, H. (2012). *Biomecánica y patrones funcionales de la mano*. 4 (1), 14–24.
- [5] Carlos, J., Luna, B., Martin, J., & Albino, F. (2023). *Parameterization of Physical Therapy for Phalanges of the Human Hand* *Parametrización de terapia física para falanges de la mano humana* *Parameterization of Physical Therapy for Phalanges of the Human Hand*. August 2020.
- [6] Daniela García, S., & María José Espinoza, V. (2014). Avances en prótesis: una mirada al presente y al futuro. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 25(2), 281–285. [https://doi.org/10.1016/s0716-8640\(14\)70039-2](https://doi.org/10.1016/s0716-8640(14)70039-2)
- [7] Galli, K., & Pelozo, S. (2017). Órtesis Y Prótesis. *Auditoría Médica*, 1, 6 y 10.
- [8] Jofre L. Brito, Marlon X. Quinde, D. C. J. I. C. (2013). *Estudio del estado del arte de las prótesis de mano*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/8447>
- [9] García, J. R., & Meza, I. S. Revisión del Proceso de Cambio de las Prótesis de Mano. *PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA*, 66.
- [10] LOAIZA, JAIR L., & ARZOLA, NELSON. (2011). EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE PRÓTESIS DE MANO. *DYNA*, 78(169), 191-200. Retrieved March 31, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000500022&lng=en&tlng=es.

- [11] Puglisi, L., & Moreno, H. (2006). Prótesis Robóticas. *Revista del Departamento de Automática e Informática Industrial*, 1-2.
- [12] Esmachina. (2019, 19 octubre). El brazo biónico que siente: Luke Arm. <https://www.esmachina.com/brazo-bionico-siente-luke-arm/>
- [13] [Artículo sobre la Michelangelo hand]. (s.f.). Ottobock. <https://www.ottobock.com/en-us/product/8E500>
- [14] [Artículo sobre la mano biónica beBionic]. (s.f.). Ortosur <https://www.ortosur.es/catalogo-de-productos/protesis/miembro-superior/mano-mioelectrica/bebionic/>
- [15] Manuel, J., González, D., Murillo, P. R., Flores Luna, I., & Mendoza, A. J. (2004). Robótica Y Prótesis Inteligentes. *Revista Digital Universitaria, Volumen 6 Número 1*(Sustitución por pérdida de miembros humanos por artefactos distintos a los naturales), 15. <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [16] [Artículo sobre prótesis estéticas y funcionales de silicón]. (s.f.). Manos y dedos. <https://www.manosydedos.com/>
- [17] [Vídeo sobre un nuevo reconocimiento de patrones prótesis mioeléctricas] (s.f.) Nuevo reconocimiento de patrones de prótesis mioeléctricas – Ortosur. Ortosur. https://www.youtube.com/watch?v=oqyDxGBb_1w&ab_channel=Ortosur
- [18] Peña, C. (2023). *Arduino IDE: Configuración y uso* (C. Peña (ed.); 1st ed.).
- [19] Sadun, A. S., Jalani, J., & Sukor, J. A. (2016). A comparative study on the position control method of dc servo motor with position feedback by using arduino. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(18), 10954–10958.

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	COSTES PARCIALES	55
1.1.	COSTES DE MANO DE OBRA.....	55
1.2.	COSTES DE OBTENCIÓN DE CONOCIMIENTOS	55
1.3.	COSTES DE EJECUCIÓN.....	56
1.3.1.	COSTES DE SOFTWARES.....	56
1.3.2.	COSTES DE COMPONENTES.....	56
1.3.3.	COSTES DE MAQUINARIA	57
2.	COSTES TOTALES.....	58

ÍNDICE DE LAS TABLAS

<i>Tabla 1. Cuadro de costes de mano de obra</i>	55
<i>Tabla 2. Cuadro de costes de obtención de conocimientos.....</i>	56
<i>Tabla 3. Cuadro de precios de los softwares</i>	56
<i>Tabla 4. Cuadro de precios de los componentes.....</i>	57
<i>Tabla 5. Cuadro de precios de maquinaria</i>	58
<i>Tabla 6. Presupuesto final</i>	58

PRESUPUESTO

En esta sección se presenta toda la información relacionada con el coste económico del proyecto que se ha llevado a cabo. En este proyecto, este apartado cobra mucha importancia ya que uno de los objetivos era rebajar máximamente los costos para el desarrollo de una prótesis biónica básica de mano funcional. Los costos se han clasificado en dos grandes grupos: costos parciales y costos totales.

Se han tenido en cuenta los costes de la mano de obra, los cursos realizados además de los materiales utilizados y la maquinaria necesaria.

1. COSTES PARCIALES

1.1. COSTES DE MANO DE OBRA

Número	Denominación de mano de obra	Precio	Horas	Total
1	Ingeniera biomédica novel	13€/h	450 h	5.850 €
<i>Total</i>				5.850 €

Tabla 1. Cuadro de costes de mano de obra

La Tabla 1 muestra los costes de mano de obra pertenecientes al personal que ha estado implicado en la realización de este proyecto. Los costos se han calculado por hora, especificando el número total de horas dedicadas por cada individuo, lo que permite obtener un costo total de mano de obra de seis mil quinientos ochenta euros.

1.2. COSTES DE OBTENCIÓN DE CONOCIMIENTOS

Número	Denominación de mano de obra	Precio	Cantidad	Total
1	Curso "Tecnología Biónica 3D" por P4H Bionics	200 €	1 ud.	200 €
<i>Total</i>				200 €

Tabla 2. Cuadro de costes de obtención de conocimientos

En la *Tabla 2* se recogen todos costes relacionados con los cursos realizados para adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de la prótesis descrita en este proyecto. Los costos se han expresado en términos de costo por unidad, y el total invertido en estos recursos ha sido de doscientos euros. Además, también evaluó la posibilidad de incluir el costo del Máster en Ingeniería Biomédica, pero finalmente no se ha incluido puesto que no se ha considerado que fuese un coste del proyecto en sí.

1.3. COSTES DE EJECUCIÓN

En esta sección se han tenido en cuenta todos los costes relacionados con los recursos necesarios para el desarrollo de la prótesis, como los programas necesarios, los materiales y componentes utilizados y la maquinaria necesaria.

1.3.1. COSTES DE SOFTWARES

Número	Nombre	Precio	Cantidad	Total
1	Arduino IDE	Gratuito	1 ud.	0 €
2	Netfabb	Gratuito	1 ud.	0 €
3	Ultimaker cura	Gratuito	1 ud.	0 €
4	Meshmaker	Gratuito	1 ud.	0 €
<i>Total</i>				0 €

Tabla 3. Cuadro de precios de los softwares

En este apartado se han tenido en cuenta todos los costes pertenecientes a las licencias necesarias para obtener todos los programas utilizados a lo largo del proyecto. La *Tabla 3* menciona todos los softwares que se han utilizado, los cuales eran todos abiertos y, por tanto, gratuitos. Los costes totales de las licencias de los programas son de cero euros.

1.3.2. COSTES DE COMPONENTES

Número	Denominación del hardware	Precio	Cantidad	Total
1	Protoboard	5 € (1 ud.)	1 ud.	5 €
2	Placa Arduino nano	19 € (1 ud.)	1 ud.	19 €
3	Batería de litio	25 € (1 ud.)	1 ud.	25 €
4	Cargador de batería de litio	20 € (1 ud.)	1 ud.	20 €

5	Sensor FSR	10 € (1 ud.)	1 ud.	10 €
6	Pines	10 € (120 ud.)	13 ud.	1 €
7	Tornillos	8 € (290 ud.)	2 ud.	0,06 €
8	Regulador de voltaje	7 € (1 ud.)	1 ud.	7 €
9	Servo-motor	14 € (1 ud.)	1 ud.	14 €
10	Material de impresión PLA	20 € (1 kg)	588 g	11,76 €
11	Material de impresión TPU	23 € (500 g)	15 g	6,90 €
12	Hilo de pescar	10 € (300m)	5m	0,17 €
13	Pegamento	2 € (1 ud.)	1 ud.	2 €
14	Resistencia	9€ (200 ud.)	1 ud.	0,05 €
15	Multimetro	18 € (1 ud.)	1 ud.	18,00 €
<i>Total</i>				140 €

Tabla 4. Cuadro de precios de los componentes

Los costes correspondientes a los componentes necesarios para el montaje del circuito, la impresión de las piezas en la impresora 3D y su posterior ensamblaje se han recopilado en la *Tabla 4*. Se ha considerado el precio de cada componente en función de la cantidad adquirida, teniendo en cuenta que no se utilizó la totalidad de ellos y que podrían ser aprovechados en futuros proyectos. A pesar de la necesidad de adquirir múltiples componentes que conforman la prótesis, no se ha producido un aumento significativo en el presupuesto gracias a una cuidadosa comparación de precios en diferentes sitios web. Dado que uno de los principales objetivos de este proyecto era desarrollar la prótesis de manera económica utilizando materiales fácilmente accesibles, se llevó a cabo una exhaustiva búsqueda para encontrar todos los elementos necesarios que cumplieran con nuestras condiciones. El costo total de todos estos componentes asciende a ciento cuarenta euros.

1.3.3. COSTES DE MAQUINARIA

Número	Denominación de maquinaria	Coste	Amortización	Tiempo de uso	Total
1	Impresora "Anycubic Predator"	500 €	4 años	104h 23min	4,48 €
2	Mac Book Pro	2.000 €	6 años	450 h	17,12 €
<i>Total</i>					21,60 €

Tabla 5. Cuadro de precios de maquinaria

Los costos relacionados con la maquinaria utilizada se han registrado en la *Tabla 5*. Esta maquinaria incluye la impresora 3D utilizada, específicamente el modelo "Anycubic Predator", así como la computadora utilizada para llevar a cabo el trabajo. Dado que estos recursos son más duraderos y no se adquieren exclusivamente para el proyecto, se ha estimado su vida útil y se ha tenido en cuenta para calcular los costos asociados con su uso y desgaste. Se ha estimado que el costo total al uso de estas máquinas es de veintiún euros con sesenta céntimos.

2. COSTES TOTALES

Basándonos en los costos presentados en las secciones anteriores, se ha de hacer una sumatoria de cada uno de los costos parciales para determinar el presupuesto de ejecución del proyecto.

Número	Denominación	Costo
1	Costos de mano de obra	5.850 €
2	Costos de conocimiento	200 €
3	Costos de softwares	0 €
4	Costos de componentes	140 €
5	Costos de maquinaria	21,60 €
<i>Total (sin IVA)</i>		6.211,6 €
6	21% de IVA	1.304,4 €
PRESUPUESTO FINAL		7.516 €

Tabla 6. Presupuesto final

Se ha determinado que el presupuesto de ejecución del proyecto es de 6.211 € (seis mil doscientos once euros) sin IVA y, aplicando el 21 % de IVA correspondiente dictado por la Agencia Tributaria, el presupuesto final de ejecución del proyecto es de 7.516€ (siete mil quinientos dieciséis euros).

Por tanto, teniendo en cuenta que el coste de las prótesis biónicas de mano actualmente en el mercado ronda los 20000 € a 50000 €, se ha conseguido muy satisfactoriamente una mejora en este aspecto, consiguiendo así uno de los objetivos principales de este proyecto.