



Implementación de un dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste

Topon Shigui, Edgar David

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Tecnólogo Superior en Electromecánica

Ing. Murillo Mantilla, Luis Alejandro

10 de Agosto del 2023

Latacunga

Reporte de Verificación de Contenido



TESIS DAVID TOPON.pdf

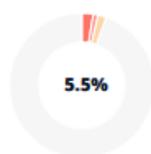
Scan details

Scan time:
August 1th, 2023 at 15:46 UTC

Total Pages:
39

Total Words:
9621

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	2.5%	243
● Minor Changes	1.1%	104
● Paraphrased	1.9%	181
● Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
● AI text
○ Human text



Firmado electrónicamente por:
LUIS ALEJANDRO
MURILLO
MANTILLA

Ing. Murillo Mantilla, Luis Alejandro

C. C.: 180419672-1



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Implementación de un dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste”** fue realizado por el señor **Topon Shigui, Edgar David**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 10 de Agosto del 2023

Firma:



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ALEJANDRO
MURILLO
MANTILLA**

Ing. Murillo Mantilla, Luis Alejandro

C. C.: 180419672-1



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Topon Shigui, Edgar David**, con cédula de ciudadanía n°172421598-1, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Implementación de un dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 10 de Agosto del 2023

Firma

.....

Topon Shigui, Edgar David

C.C.: 172421598-1



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Tecnología Superior en Electromecánica

Autorización de Publicación

Yo **Topon Shigui, Edgar David**, con cédula de ciudadanía n°172421598-1, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Implementación de un dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste**: en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 10 de Agosto del 2023

Firma

.....

Topon Shigui, Edgar David

C.C.: 172421598-1

Agradecimiento

Agradeciendo a cada una de las personas que me acompañaron en esta travesía, a mis amigos y amigas, por todos los momentos de apoyo, a mis mascotas, por su fiel acompañamiento, a mis maestros y maestras, que me formaron y guiaron durante estos años, y a Naruto Uzumaki, que me enseñó a nunca rendirme. ¡Dattebayo!

Topon Shigui, Edgar David

Dedicatoria

Con mucho cariño dedico este trabajo a mis padres Rodrigo y Eugenia por nunca dejarme solo en este camino, a mi hermano Esteban, porque siempre ha sido una motivación para nunca darme por vencido y a mí mismo por la perseverancia.

Topon Shigui, Edgar David

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de Verificación de Contenido	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación.....	5
Agradecimiento	6
Dedicatoria.....	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras.....	13
Resumen	16
Abstract.....	17
Capítulo I: El Problema	18
Antecedentes.....	18
Planteamiento del problema	19
Justificación	20
Objetivos.....	21
<i>Objetivo general</i>	21
<i>Objetivos específicos</i>	21
Alcance	21

Capítulo II: Estado del arte	22
Anatomía de la mano humana	22
Grado de libertad de los dedos	27
Prototipado rápido con impresión 3d	28
Estereolitografía (Sterelithography - SLA).....	32
Sinterización láser (sinterización selectiva por láser - SLS)	34
Deposición por fusión (modelización de depósito fundido - FDM).....	36
Comparación entre técnicas SLA, SLS Y FDM	38
Capítulo III: Diseño y selección	41
Diseño para la impresión 3d de la prótesis	41
<i>Concepción del proyecto</i>	41
<i>Modelado en software</i>	41
<i>Interfaz de impresora.....</i>	42
<i>Impresión 3D.....</i>	42
Construcción de los eslabones	43
<i>Falange distal.....</i>	44
<i>Falange media.....</i>	44
<i>Falange proximal</i>	45
Diseño de las articulaciones.....	45
Diseño de Actuadores.....	47
<i>Transmisión mediante poleas.....</i>	47

Ensamble completo.....	48
Selección de materiales	49
Materiales utilizados en la impresión 3d en la técnica FDM	49
ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno).....	49
PLA (Ácido poliláctico).....	51
Resina.....	54
Comparación entre materiales de impresión 3D	55
Material utilizado en el proyecto.....	57
Servomotores	57
Capítulo IV: Desarrollo del tema.....	58
Construcción del prototipo.....	58
Detalles del maquinado.....	59
Planos de maquinado.....	60
<i>Falange distal</i>	60
<i>Falange media</i>	61
<i>Falange proximal</i>	61
<i>Interfaz de mano</i>	62
<i>Carcasa</i>	62
Construcción de piezas	63
Implementación del sistema electrónico	65
Acoplamiento de poleas con el servomotor	66

Capítulo V: Pruebas y resultados	71
Pruebas de software	71
<i>Prueba 1: Error ESP32Servo</i>	71
<i>Prueba 2: Error de carga en SETUP</i>	71
<i>Prueba 3: Error delay (4000)</i>	72
<i>Prueba 4: Código sin error</i>	73
Pruebas de resistencia y agarre con peso al prototipo	73
<i>Prueba de resistencia y agarre 1: Pelota de tenis</i>	73
<i>Prueba de resistencia y agarre 2: Huevo</i>	74
<i>Prueba de resistencia y agarre 3: Papel</i>	75
<i>Prueba de resistencia y agarre: Bola de papel</i>	77
<i>Prueba de resistencia y agarre 4: Peso máximo</i>	77
Tiempo de procesamiento utilizado en la fabricación del prototipo	79
Análisis económico del proyecto	80
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones	81
Conclusiones	81
Recomendaciones	82
Bibliografía	83
Anexos	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparación de tecnologías de impresión 3D</i>	39
Tabla 2. <i>Propiedades Mecánicas de ABS</i>	51
Tabla 3. <i>Propiedades Mecánicas del PLA</i>	53
Tabla 4. <i>Propiedades Mecánicas de la Resina</i>	54
Tabla 5. <i>Comparación entre materiales de impresión 3D</i>	55
Tabla 6. <i>Costo de los materiales ABS, PLA, y Resina</i>	56
Tabla 7. <i>Especificaciones del servomotor</i>	57
Tabla 8. <i>Lista de materiales</i>	58
Tabla 9. <i>Detalles del maquinado</i>	59
Tabla 10. <i>Lista de gastos</i>	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Huesos de la mano</i>	23
Figura 2. <i>Dedos de la mano</i>	24
Figura 3. <i>Tendones flexores</i>	25
Figura 4. <i>Tendones extensores</i>	26
Figura 5. <i>Fabricación sustractiva y fabricación aditiva</i>	30
Figura 6. <i>Proceso de fabricación aditiva mediante impresión 3D</i>	32
Figura 7. <i>Ejemplificación del proceso de trabajo de la tecnica SLA</i>	33
Figura 8. <i>Construcción real de una pieza con la tecnica SLA</i>	34
Figura 9. <i>Ejemplificación del proceso de trabajo de la tecnica SLS</i>	35
Figura 10. <i>Motor de combustión interna construidos con la técnica SLS</i>	36
Figura 11. <i>Ejemplificación del proceso de trabajo de la técnica FMD</i>	37
Figura 12. <i>Piezas mecánicas impresas con la técnica FMD</i>	38
Figura 13. <i>Impresora 3D</i>	43
Figura 14. <i>Falange media</i>	44
Figura 15. <i>Falange distal</i>	44
Figura 16. <i>Falange proximal</i>	45
Figura 17. <i>Diseño de articulaciones</i>	45
Figura 18 y 19. <i>Ejes</i>	46
Figura 20. <i>Actuadores con el acople de poleas</i>	48
Figura 21. <i>Ensamble Completo del prototipo</i>	49

Figura 22. <i>Planos falange distal</i>	60
Figura 23. <i>Planos falange media</i>	61
Figura 24. <i>Planos falange proximal</i>	61
Figura 25. <i>Planos interfaz de la mano</i>	62
Figura 26. <i>Planos Carcasa</i>	62
Figura 27. <i>Falanges e interfaz de la mano impresas</i>	63
Figura 28. <i>Prototipo de prueba instalado</i>	64
Figura 29. <i>Parte delantera de la carcasa (parte 1)</i>	64
Figura 30. <i>Parte posterior de la carcasa (parte 2)</i>	65
Figura 31. <i>Esquematzación del sistema electrónico</i>	66
Figura 32. <i>Armado del prototipo</i>	67
Figura 33. <i>Instalación previa al sistema de control</i>	68
Figura 34. <i>Colocación del sistema de control en la carcasa</i>	69
Figura 35. <i>Prototipo final</i>	70
Figura 36. <i>Prototipo acoplado a la mano</i>	70
Figura 37. <i>Prueba 1</i>	71
Figura 38. <i>Prueba 2</i>	72
Figura 39. <i>Prueba 3</i>	72
Figura 40. <i>Código sin error</i>	73
Figura 41. <i>Prueba de la pelota de tenis</i>	74
Figura 42. <i>Prueba de resistencia y agarre con un huevo</i>	75

Figura 43. *Prueba de resistencia y agarre 3: Papel*76

Figura 44. *Prueba de resistencia y agarre con la bola de papel*.....77

Figura 45. *Prueba de resistencia y agarre 4: Peso máximo*.....78

Resumen

En este estudio se presenta la implementación de un dispositivo protésico para dedo, de cual se trató de asimilar las funciones de extensión y flexión del dedo pulgar, utilizando tecnologías de prototipado rápido y que el costo sea accesible para los usuarios y con el cual se busca mejorar el control de presión de ajuste. Para lograr este objetivo se empleó la tecnología de impresión 3D cuyo material seleccionado fue la resina como una alternativa de bajo costo. El proceso de diseño involucro el modelado de la prótesis en el software Fusion 360, seguido por la impresión 3D del prototipo y la integración de un sistema de control. Para el sistema de movimiento del dedo se utilizaron servomotores los cuales fueron acoplados con poleas para la transmisión del movimiento y mediante el uso de un sensor flexible y un microcontrolador ESP32 para concluir su desarrollo. Los resultados principales de este estudio fueron la creación de un dispositivo protésico para dedo, el cual es económico, ligero y resistente a cargas bajas, permitiendo mejorar el control en la toma de objetos o a su vez a usuarios que hayan sufrido pérdidas parciales de dedo en su mano, en particular del dedo pulgar. Además, se identificaron algunos ajustes necesarios para mejorar el diseño y la impresión de la prótesis para futuros trabajos.

Palabras clave: impresión 3D, dispositivo protésico para dedo, tecnologías de prototipado.

Abstract

This study presents the implementation of a prosthetic device for finger, which tried to assimilate the functions of extension and flexion of the thumb, using rapid prototyping technologies and that the cost is accessible to users and which seeks to improve the control of pressure adjustment. To achieve this objective, 3D printing technology was used and resin was selected as a low-cost alternative material. The design process involved modeling the prosthesis in Fusion 360 software, followed by 3D printing of the prototype and integration of a control system. For the finger movement system, servomotors were used which were coupled with pulleys for the transmission of the movement and through the use of a flexible sensor and an ESP32 microcontroller to conclude its development. The main results of this study were the creation of a prosthetic device for finger, which is economical, lightweight and resistant to low loads, allowing improved control in picking up objects or in turn to users who have suffered partial loss of finger in his hand, particularly the thumb. In addition, some necessary adjustments were identified to improve the design and impression of the prosthesis for future work.

Key words: 3D printing, finger prosthetic device, prototyping technologies.

Capítulo I

El Problema

Antecedentes

En este capítulo se presenta una revisión de la bibliografía para la fundamentación y comprensión de este trabajo.

La Organización Mundial de la Salud dice que el 70% de las amputaciones en América Latina se deben a la diabetes y el 80% de las personas con amputaciones viven en países en desarrollo, mientras que solo del 1 al 3% de estas personas tienen acceso a servicios de rehabilitación apropiados (OMS, 2023). En Ecuador, se estima que cada año se realizan más de 50.000 cirugías de amputación. De ese número, cerca de siete mil corresponden a procedimientos asociados a los miembros superiores, según datos del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS, 2023).

En este contexto, existen actualmente varias empresas dedicadas a la producción de prótesis, utilizando las últimas tecnologías para hacerlos cada vez más precisos y más funcionales, es así que, en el año 2018, la empresa 3D Systems (2017) presentó una encuesta que muestra la evolución constante de las tecnologías utilizadas en el sector salud conocido por la palabra de origen inglés cuidado de la salud, el estudio analiza el período entre 2010 y 2017. Durante este período el número de inversiones en el sector aumentó casi 10 veces, pasando de \$1.200 millones en 2010 a \$11.500 millones en 2017.

En Ecuador, una encuesta realizada por la revista Ecuabot Factory mostró que, en 2015, cerca del 85% de los hospitales planearon invertir en recursos digitales de inteligencia artificial y otras áreas relacionadas con software, hardware y servicios de tecnología y comunicación. Obviamente, esto sucede porque el desarrollo de nuevas

tecnologías en el área de la salud permite entregar soluciones más asertivas, ágiles, de largo plazo y con mayor retorno económico.

Por esta razón, el propósito de este trabajo de conclusión de curso es utilizar una tecnología acertada para el desarrollo de una prótesis de dedo, que por las estadísticas en la actualidad tienen un gran potencial, tanto social como comercial.

Planteamiento del problema

A lo largo de los años, el número de personas con discapacidad física ha ido en aumento en Ecuador, la discapacidad física compromete la independencia y la autonomía, limitando el desempeño de las actividades del día a día.

El uso de tecnologías asistidas, como las prótesis, tiene el papel de mejorar la calidad de vida del individuo y la inclusión social a través del incremento funcional. Sin embargo, según Moya & Magal-Royo,(2019), sólo una pequeña parte de los discapacitados ecuatorianos tienen acceso a prótesis y rehabilitación. El alto costo de las prótesis, debido a la necesidad de importar y personalizar, afecta principalmente a la clase trabajadora, niños, adultos y etc., quienes necesitan cambiar constantemente las prótesis porque están en movimiento.

Así, en este trabajo se propuso el desarrollo completo de una prótesis para un dedo a un costo accesible. Se logró diseñar una prótesis mecánica activa para dedo, utilizando un sistema de control para generar la flexión y extensión del prototipo.

La fabricación de la prótesis fue posible gracias al avance de las tecnologías de fabricación aditiva. Con la impresión 3D, es posible producir rápidamente piezas personalizadas para la prótesis a bajo costo.

Justificación

Pasar por un proceso de amputación puede perjudicar la calidad de vida de las personas, interfiriendo en su capacidad para realizar las actividades de la vida diaria y en el trabajo, generando impactos físicos y psicológicos. Por tanto, el objetivo principal es mejorar la capacidad funcional de las personas, desarrollando habilidades y fomentando la independencia y la participación social.

Por otra parte, la posibilidad de utilizar medios protésicos mejora la función y participación de los individuos y palia numerosas carencias. Sabiendo que la prótesis es un dispositivo de rehabilitación que no solo reemplaza una parte del cuerpo ausente, sino que a su vez puede dar una ventaja a los seres humanos al agregar extensiones artificiales para el desarrollo de habilidades, el objetivo principal es mejorar la capacidad de manipulación, contribuyendo al desempeño de las actividades de la vida diaria, a través de la restauración de las funciones miembro faltantes.

De esta forma, el individuo puede reintegrarse a sus actividades con la ayuda de un dispositivo protésico, capaz de aumentar la funcionalidad de sus capacidades físicas y mejorar su calidad de vida. Este tipo de dispositivo tiene como primer requisito la necesidad de fabricarse con dimensiones y geometrías específicas del miembro.

Es así, que para que las prótesis se adapten a las necesidades de los usuarios, factores como la comodidad, la conveniencia, la estética y la sencillez de uso son características importantes. Sin embargo, parece que los productos en el mercado no siempre siguen estos parámetros mencionados. Las prótesis suelen ser pesadas y caras. Algunos todavía tienen poca funcionalidad y limitaciones de movimiento.

Por ello, los diferentes procesos de obtención de las prótesis, así como la utilización de diferentes métodos y materiales para su fabricación, tienen como objetivo adaptar el producto desarrollado a las necesidades del usuario y mejorar su calidad de vida.

Objetivos

Objetivo general

Implementar un dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste.

Objetivos específicos

- Establecer los diferentes patrones de sujeción
- Implementar la estructura mecánica del dispositivo utilizando software de diseño y manufactura asistida por computador para asegurar la ergonomía con el usuario.
- Realizar el diseño del sistema electrónico y de control mediante la utilización software computacional de simulación para analizar el comportamiento de los elementos constitutivos.
- Validar la funcionalidad del dispositivo a través de pruebas en tiempo real para asegurar el correcto desempeño de los sistemas.

Alcance

El proyecto de integración curricular propuesto, tiene como alcance lograr el desarrollo y funcionalidad de este dispositivo protésico de dedo utilizando tecnologías de prototipado rápido de bajo costo para mejorar el control de presión de ajuste, que permita realizar un agarre óptimo en materiales con una textura rígida como elementos sumamente suaves y frágiles lo que nos permitirá mayor autonomía y seguridad.

Capítulo II

Estado del arte

En esta sección se analizarán los fundamentos teóricos del presente proyecto, para lo cual se ha recabado información documental y bibliográfica de los diferentes repositorios universitarios a nivel nacional e internacional.

Anatomía de la mano humana

La anatomía de la mano humana, así como de otras partes del cuerpo humano, es extremadamente compleja, involucrando articulaciones, tendones, arterias, venas, nervios, ligamentos y huesos (Zancolli, 2014). Para el proyecto de investigación propuesto es necesario comprender el funcionamiento principalmente del cierre y apertura de la mano humana, teniendo en cuenta la cantidad de huesos que componen la mano, y también, el funcionamiento de los tendones para el desarrollo de mejoras del dispositivo protésico del dedo (DPD), para servir como referencia funcional (Guacho, 2018). En la Figura 1 es posible observar la cantidad de huesos que componen el sistema de la mano humana. Según el esqueleto de la mano está formado por carpo, metacarpo y falanges.

Figura 1

Huesos de la mano



Nota. El gráfico representa la anatomía de la mano. Tomado de (Stanford, 2022)

La división que se ve en la Figura 1 es necesaria para la construcción y operación del DPD. En el Capítulo II será posible identificar la misma división en el prototipo del dedo seleccionado para el proyecto. Para aquello, se puede apreciar en la Figura 2, la designación de todos los dedos de la mano humana, en la cual se numeran del primero al quinto, comenzando por el pulgar, cuyo nombre científico es primer dedo.

Figura 2

Dedos de la mano

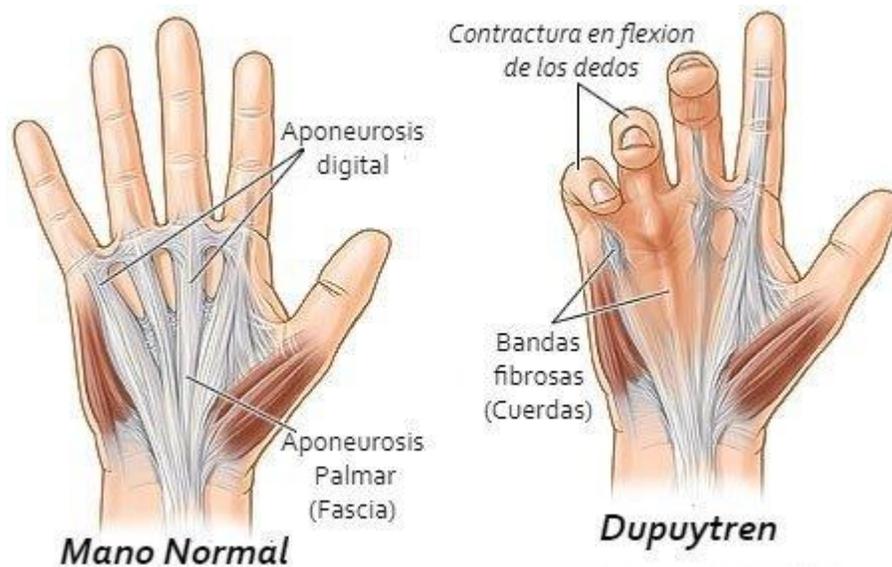


Nota. Podemos distinguir cada dedo que forma nuestra mano. Tomado de (CeiAcademy, 2016)

Otra comprensión necesaria es el funcionamiento de cerrar y abrir la mano, como lo describe Moore y Dalley (2009, p. 825), el músculo flexor superficial de los dedos actúa principalmente para flexionar las articulaciones interfalángicas proximales, a través de sus inserciones en las falanges medias. Sin embargo, en cada dedo hay una acción sobre la articulación metacarpofalángica. Esta información servirá como referencia para el paso y fijación que se denominará en el dispositivo prototipo DPD como tendones flexibles, encargados de abrir el dedo de la mano mecánica. Como puede verse en la Figura 3, la posición de los tendones flexores en la mano humana.

Figura 3

Tendones flexores



Nota. La figura no muestra los tendones flexores que posee la mano. Tomado de Tran Plastic Surgery

Según Moore y Dalley (2009, p. 825), la apertura de la mano se realiza con la extensión de las articulaciones interfalángicas distales, proximales y metacarpofalángicas, en las cuales la mano cuenta con un ingenioso mecanismo que permite que esto ocurra. Las leyes de la mecánica sugieren que se necesitaría un motor para cada articulación, además de otro motor para el montaje. Todo ello asociado a algún tipo de mecanismo de control para asegurar que la cadena de articulaciones se mueva de forma conjunta y coordinada (Moore y Dalley, 2009, p. 825).

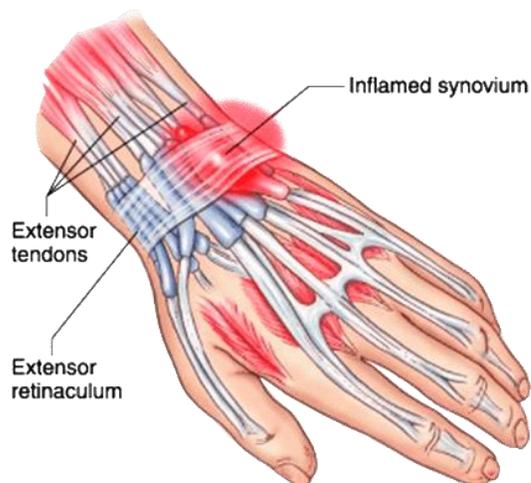
En la mano humana, el movimiento se obtiene a través de un dispositivo extensor que reduce al mínimo el número de motores necesarios, permitiendo que los músculos actúen sobre más de una articulación, y vinculando diferentes niveles en el mecanismo para que el movimiento sea controlado. Los tendones del músculo extensor

de los dedos corren distalmente sobre las cabezas de los huesos metacarpianos, formando el componente principal del aparato extensor.

Esta información servirá de referencia para el paso y fijación que en el dispositivo prototipo DPD se denominarán tendones rígidos, que en el dispositivo serán los encargados de cerrar el dedo de la mano mecánica. Como puede verse en la Figura 4, es posible observar la ubicación de los tendones extensores.

Figura 4

Tendones extensores



Nota. La figura representa los tendones extensores que tiene la mano. Tomado de Traumactual

La ubicación del paso de los tendones reales en la mano humana sirvió como información importante y se aplicarán en el prototipo del dispositivo DPD para emular el movimiento de cerrar y abrir el dedo del dispositivo de manera similar a la mano humana.

Grado de libertad de los dedos

La mano humana tiene cuatro grados de libertad para cada dedo, con la excepción del pulgar, que presenta cinco, siendo tres de flexión y extensión y uno de aducción y abducción, siendo dos grados de libertad para la muñeca. Para toda esta libertad de movimiento, la mano tiene 27 (veintisiete) huesos y utiliza numerosos músculos intrínsecos y extrínsecos, numerosos tendones y ligamentos (Robles et al., 2017).

Una estructura que tiene todas las características de la mano ya sea dimensional, sensorial o dinámica, completamente similar a la mano humana, sigue siendo un desafío para la ciencia. Las manos robóticas son las que tienen mayor similitud dimensional y dinámica con la mano humana, sin embargo, estos mecanismos presentan gran sistema de control. Lo que hace inviable su uso en aplicaciones con la intención de restaurar el movimiento, humano (Guacho Rivera, 2018).

El cambio en el movimiento de la mano humana se puede vincular a numerosas patologías, y cuanto más tarde sea la identificación correcta, más difícil puede ser el tratamiento. A menudo es necesario uso de una órtesis para restaurar el movimiento o incluso una prótesis para reemplazar la extremidad perdido (Stanford, 2022).

Desde que el hombre empezó a desarrollar prótesis de miembros superiores, las primeras se remontan a más de 200 a.C., se ha intentado recuperar las principales características de este miembro. Entre los varios funciones que presenta la mano, podemos destacar la función de transmitir sensaciones, de expresar, de sujetar, conducir y manipular objetos de diferentes maneras (Martín y Grobelska, 2020).

Estudios recientes resaltan la importancia mecánica no solo de la capacidad de agarre de los objetos, sino también cómo se realiza este movimiento.

La forma en que se lleva a cabo este movimiento es gran importancia para el usuario de la prótesis (Moya y Magal-Royo, 2019). Con esto, los diseños protésicos más recientes asemejarse tanto física como dinámicamente a la mano humana, movimientos antropomórficos. Se consigue una mayor adaptación por parte del paciente.

Con ello se han dedicado a la mejora del proyecto, de los dedos, aplicándoles características de movimientos más antropomórficos, Se están adoptando varios métodos para identificar estos movimientos. Los principales implican análisis tridimensional a través de la captura de movimiento (Guacho, 2018), otros implican la captura de imágenes utilizando imágenes de resonancia magnética para identificar el centro de rotación.

Estos métodos tienen una alta calidad de captura, pero un alto costo. Otros métodos como el desarrollado presenta un bajo costo en comparación con los métodos tridimensionales, pero solo puede analizar el movimiento de los dedos indicador y promedio.

Prototipado rápido con impresión 3d

El prototipado rápido se considera en la actualidad un método de desarrollo de producto fundamental para la definición de modelos, pruebas de intercambiabilidad, montaje de prototipos, muestras, moldes, entre otras posibilidades, permitiendo así ahorrar tiempo y reducir costos(Carrillo et al., 2020)

Por lo tanto, es posible afirmar que es una herramienta importante para un proyecto que incluya tecnología, según Rojas (Rojas, 2017), la creación de prototipos es una parte esencial en el ciclo de desarrollo y fabricación del producto para verificar la forma, el ajuste y la funcionalidad antes de una posible inversión en herramientas para producción a gran escala.

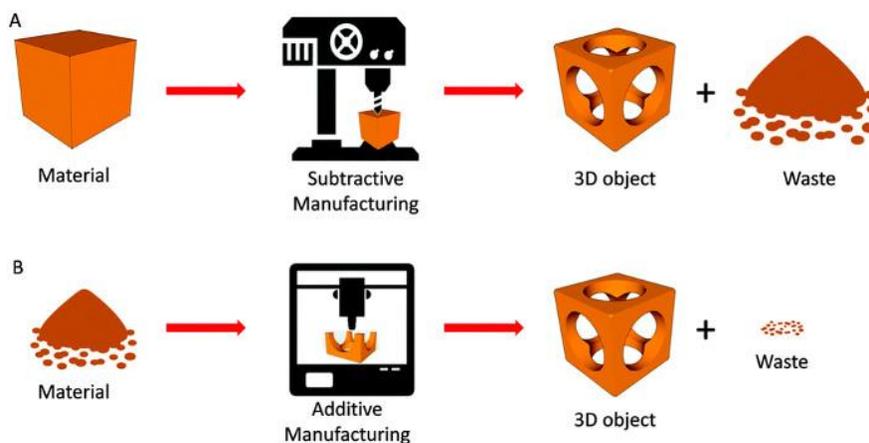
La creación rápida de prototipos es un término que abarca una gama de nuevas tecnologías para producir piezas precisas directamente desde el modelo CAD en unas pocas horas, con poca intervención humana (Rojas, 2017).

Según Orellana (Orellana, 2020), debido a la alta competencia y la creciente complejidad de los productos, las empresas han requerido cambios sustanciales en el proceso de desarrollo de productos. Por ello, actualmente las empresas tienen como recurso la fabricación aditiva, que se puede definir como un proceso de fabricación mediante la adición sucesiva de material en forma de capas, con información obtenida directamente de una presentación geométrica computacional 3D del componente.

La creación rápida de prototipos se puede lograr de varias maneras, siendo las principales dos muy diferentes entre sí. Una de estas formas es la sustracción de material como en las máquinas CNC tradicionales, la otra forma es con la deposición de material, como en el método de impresión 3D. Como puede verse en la figura 5, siendo (a) fabricación sustractiva y (b) fabricación aditiva. La principal ventaja del método de deposición aditiva es precisamente el menor desperdicio de materia prima, en comparación con el método sustractivo tradicional(Ortega et al., 2018).

Figura 5

Fabricación sustractiva y fabricación aditiva



Nota. La figura nos representa el proceso de fabricación sustractiva y aditiva. Tomado de Didascalía Educational Group

Uno de los grandes diferenciales de la técnica de impresión 3D es la posibilidad de construir piezas complejas y personalizadas, y al comparar las tecnologías en relación con el tiempo empleado en construir la misma pieza, es sin duda un gran diferencial (Martín & Grobelska, 2020).

Además, existen técnicas de impresión 3D en las que se puede fabricar todo un sistema a la vez, incluidas todas las piezas móviles, ya que, si se compara con las precisiones de fabricación, la tecnología sustractiva sigue teniendo una gran precisión por la forma en que actúan las piezas, pero con la evolución de la técnica aditiva, es posible que en unos años la técnica de fabricación aditiva sea equivalente o mejor que la técnica de fabricación sustractiva (Carrillo et al., 2020).

En la década de 1980 surgió el primer y más conocido método de impresión 3D, la estereolitografía, que fue inventada por Charles Hull, cuyo trabajo dio lugar a numerosas patentes para otras diversas formas de impresión (Rojas, 2017).

Actualmente existen varias técnicas de impresión 3D, la investigación se limitó a las técnicas que tenían sus métodos conocidos y difundidos en la academia y la industria.

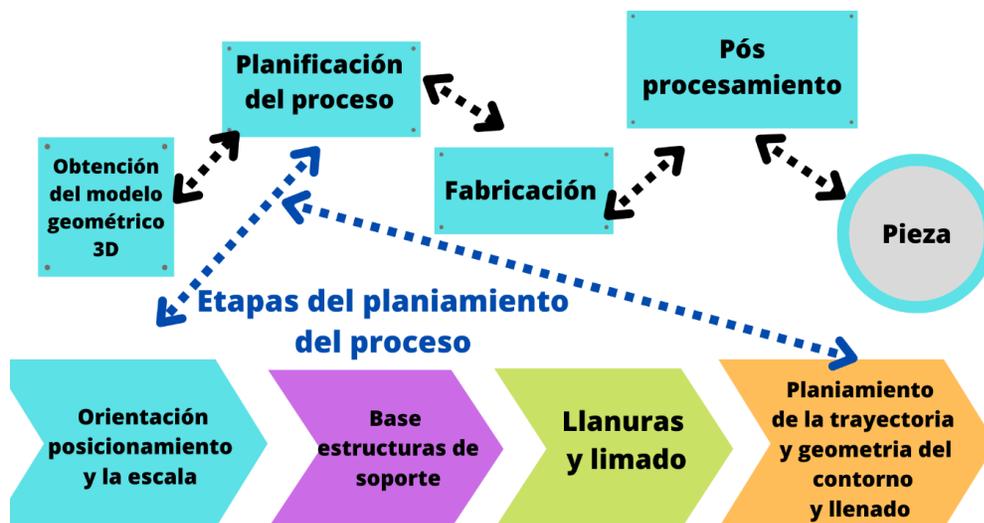
Entre los principales métodos se encuentran:

- Estereolitografía (Stereolithography - SLA).
- Modelado de Deposición Fundida (FDM).
- Sinterización Selectiva por Láser (SLS).

Carrillo et al., (2020), explica que la técnica de impresión 3D consiste en transformar un sólido digital construido mediante un programa CAD en un archivo especialmente cortado en altura (Z) y con su ubicación X e Y. Este archivo es común a todas las impresiones 3D, cada una con su X, Características de orientación de las coordenadas Y y Z para cada tipo de impresora o técnica de impresión 3D. Un archivo CAD normal debe convertirse en un archivo de impresión 3D para que sus coordenadas se asignen al modelo que se va a imprimir. Como se puede observar en la Figura 6, los pasos descritos por Carrillo et al., (2020)

Figura 6

Proceso de fabricación aditiva mediante impresión 3D



Nota. La figura representa las etapas del planeamiento del proceso. Tomado de Carrillo et al., (2020)

Estereolitografía (Sterelithography - SLA)

En 1984, Charles Hull inventó y patentó la técnica SLA (Su y Al'Aref, 2018), la tecnología de impresión 3D más conocida, y aunque es la primera tecnología de Rapid Additive Prototyping en surgir, sigue siendo uno de los métodos más utilizados para la impresión profesional.

Impresión 3D (Su y Al'Aref, 2018). de CAD en un archivo especialmente cortado en altura (Z) y con su ubicación X e Y. Este archivo es común para todas las impresiones 3D, cada una con sus características de orientación de coordenadas X, Y y Z para cada tipo de impresora o técnica de impresión 3D. Un archivo CAD normal debe convertirse en un archivo de impresión 3D para que sus coordenadas se asignen al modelo que se va a imprimir.

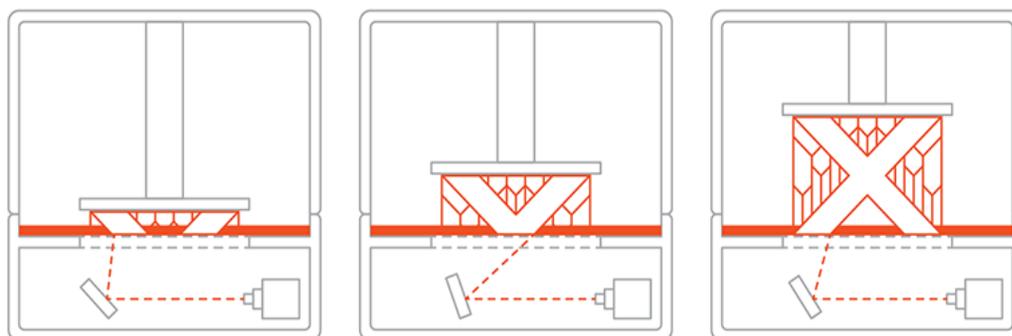
Después de completar cada capa, la plataforma o mesa de impresión se mueve (hacia arriba o hacia abajo, dependiendo solo del modelo de impresora) permitiendo así la formación de una nueva capa para imprimir el objeto. El proceso se repite en las siguientes capas hasta terminar el objeto. Como puede verse en la Figura 4-3, la técnica funciona.

La técnica SLA, descrito, Sousa (Sousa, 2021) utiliza una fuente láser que envía rayos ultravioleta para solidificar la resina polimérica. El rayo láser se dirige sobre un polímero en forma líquida, que se solidifica en las regiones golpeadas por el rayo láser, formando una de las capas del objeto.

Como se puede observar en la Figura 7, es posible percibir el proceso de trabajo para la fabricación de una pieza. En la figura, la función del láser es solidificar la parte de la resina que está en el tanque, siguiendo las coordenadas del modelo que son dirigidas por el proyector. A medida que se construye cada capa, la mesa se eleva y, por lo tanto, el objeto se fabrica capa por capa.

Figura 7

Ejemplificación del proceso de fabricación de la técnica SLA



Nota. La figura representa el proceso que conlleva la impresión en SLA, tomado de Filament2print (2020)

Esta técnica se puede utilizar para diversas aplicaciones industriales, como la realización de prototipos, análisis dimensional e incluso en pruebas funcionales en el desarrollo de productos. Como se puede observar en la Figura 8, una pieza impresa en 3D mediante esta técnica, en la que se puede identificar el láser en la parte inferior realizando la pieza.

Figura 8

Construcción real de una pieza con la técnica SLA



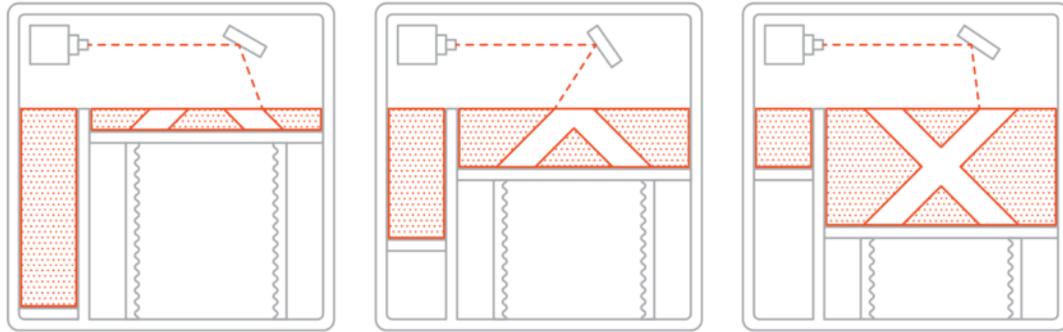
Nota: La figura representa una impresión realizada con la técnica SLA. Tomado de Filament2print (2020)

Sinterización láser (sinterización selectiva por láser - SLS)

El método SLS fue desarrollado por Carl Deckard en el año 1986. Esta técnica consiste en utilizar un rayo láser para crear modelos 3D de forma similar a SLA. La principal diferencia tecnológica es el uso de un polímero en polvo, y no una resina líquida como se usa en la técnica SLA. Como puede verse en la Figura 9, el funcionamiento esquemático de una máquina basada en la técnica SLS (Sánchez, 2019).

Figura 9

Ejemplificación del proceso de trabajo de la técnica SLS



Nota. La figura representa el proceso de impresión con la técnica SLS. Tomado de (Hubs 3D Printing, 2017)

En la Figura 9, es posible verificar el proceso previamente descrito por Gebhardt (1986). Tenga en cuenta las cinco partes básicas: mesa, tanque con polvo de polímero, láser y proyector.

El rayo láser solidifica el polvo que está en la superficie de la mesa sobre la cual se proyecta la forma geométrica referente a una capa, luego de que se completa la polimerización de esta capa, la mesa desciende, y una nueva capa de polvo que se almacena en los lados de la máquina se colocan sobre la capa anterior mediante un rodillo, y el proceso se repite capa por capa, hasta terminar el objeto.

Sus aplicaciones son diversas, pudiendo utilizar secciones muy delgadas debido al material utilizado, es posible desarrollar piezas con geometrías complejas, las piezas son resistentes al impacto y al calor, pudiendo incluso ser utilizadas en carcasas de motores, es decir, construcción de una parte funcional. La técnica SLS puede producir

una amplia variedad de piezas funcionales (Sánchez, 2019). Como puede verse en la Figura 10, un objeto fabricado mediante la técnica SLS.

Figura 10

Motor de combustión interna construidos con la técnica SLS



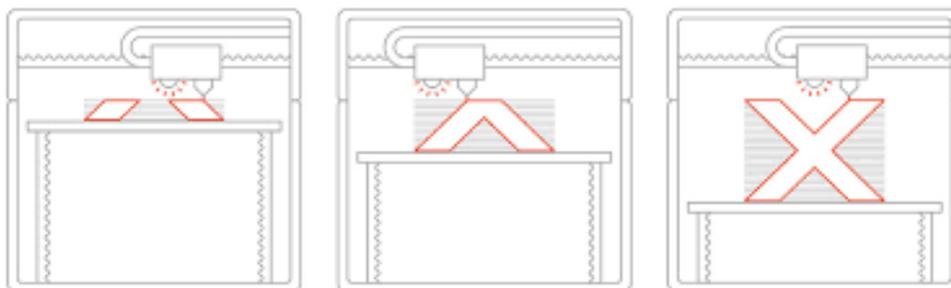
Nota. La figura representa una impresión realizada con la técnica SLS. Tomado de (García, 2020)

Deposición por fusión (modelización de depósito fundido - FDM)

Unos años después de la invención de la técnica SLS, la tecnología FDM fue inventada por Steven Scott Crump en 1989. Esta técnica fue la responsable de la difusión de la impresión 3D, debido a que esta técnica es la más sencilla, la más fácil de construir y la de menor costo (Castillo, 2022). Como puede verse en la Figura 11, el proceso de construcción utilizando esta técnica FDM.

Figura 11

Ejemplificación del proceso de trabajo de la técnica FDM



Nota. La figura representa el proceso de impresión con la técnica FDM. Tomado de (García Pérez, 2019)

En la Figura 11, el modelo consiste en fundir el filamento de un termoplástico que es jalado por un engranaje y empujado por la boquilla del extrusor, con una temperatura entre 120°C y 220°C, en la cual se encarga de fundir y reducir su diámetro con el fin de mejorar la calidad de la impresión 3D (Castillo, 2022) .

En esta técnica, tanto el extrusor como la mesa se mueven hacia arriba y hacia abajo (eje Z) o hacia los lados (ejes X e Y).

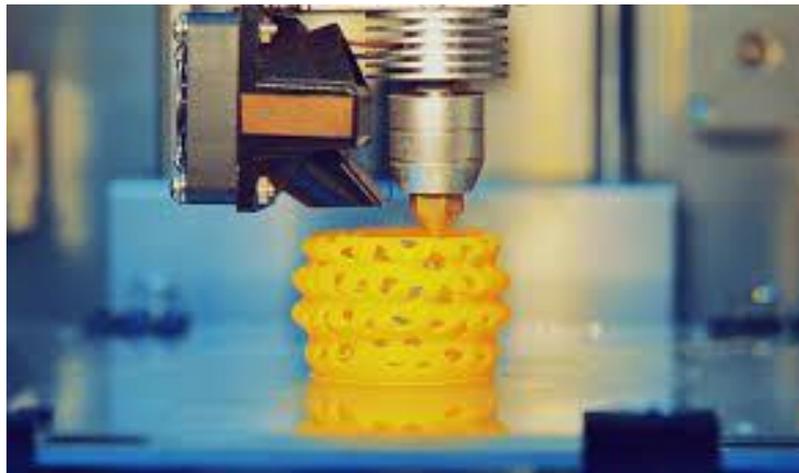
El filamento se vuelve prácticamente líquido, de tal forma que se puede depositar capa a capa sobre la mesa de construcción de la impresora para el objeto a construir. Una vez que el material se deposita en la mesa de impresión (calentado o no), comienza el proceso de transformación del termoplástico nuevamente al estado físico sólido.(p. 52)

Las ventajas intrínsecas de esta tecnología permitieron un mayor acceso a las personas es fácil y sencillo de construir, con el tiempo surgieron varios modelos llamadas impresoras de sobremesa, esto extendió la impresión 3D en los hogares.

Sus aplicaciones pueden ser diversas, como la construcción de modelos geométricos para verificar la intercambiabilidad, modelos de demostración y dependiendo de la aplicación, incluso puede ser utilizado como piezas funcionales en prototipado rápido aditivo (Castillo, 2022). Como se puede ver en la Figura 12, algunas partes impresas usando la técnica FDM.

Figura 12

Piezas mecánicas impresas con la técnica FDM



Nota. La figura representa una pieza impresa con la técnica FMD. Tomado de (3Dnatives, 2017).

Comparación entre técnicas SLA, SLS Y FDM

Una comparación entre las técnicas SLA, SLS y FDM presenta las ventajas y desventajas. La comparación se realiza con tres conceptos diferentes para el interés de esta investigación: mejor, neutro y malo.

La Tabla 1, presenta la compilación de los principales datos para comparación en base a las referencias de: Su y Al'Aref (2018), García (2020) y Sousa (2021).

Tabla 1*Comparación de tecnologías de impresión 3D*

Descripción	SLA	SLS	FDM
Costo del equipo	malo	neutro	mejor
Costo de mantenimiento	malo	neutro	mejor
Costo material	malo	neutro	mejor
Disponibilidad de Materiales	neutro	malo	mejor
Resolución de impresión	mejor	neutro	malo
Precisión de impresión	mejor	neutro	malo
Acabado superficial	mejor	neutro	malo
Tolerancia	mejor	neutro	malo
Tiempo de procesamiento	mejor	malo	neutro
Resistencia al calor (parte)	malo	mejor	neutro
Resistencia Mecánica (Parte)	malo	mejor	neutro
Resistencia a altas temperaturas (parte)	malo	mejor	neutro
Durabilidad (Pieza)	malo	mejor	neutro
Impresión de piezas funcionales	malo	mejor	neutro

Nota. La tabla muestra características de cada técnica de impresión. Tomado de Su y Al'Aref (2018), García (García, 2020) y Sousa (2021).

Al comparar cada técnica de impresión 3D de interés para esta investigación, la técnica SLA presenta mejor resolución, precisión, acabado, tolerancia y tiempo de procesamiento. Sin embargo, tiene un alto costo en equipos, mantenimiento, materiales, además de tener la menor resistencia mecánica y también al calor. Entre las tres técnicas, SLA tiene la mejor resolución y acabado.

La técnica SLS tiene como principal ventaja la resistencia al calor. Así, la posibilidad de imprimir piezas funcionales para prototipado aditivo rápido, con alta resistencia mecánica y durabilidad. Sin embargo, tiene el peor tiempo de procesamiento entre las tres técnicas y, además, poca variedad de materiales para la impresión.

La técnica FDM presenta el mejor costo por equipo, mantenimiento y materiales. Debido a su generalización, atrajo a un gran número de empresas de fabricación, proporcionando una buena diversidad de materiales termoplásticos y varias opciones para los tipos de extrusoras.

Esta comparación tuvo como objetivo orientar la elección de la técnica a seguir en la investigación en cuestión a fin de mantener la mejor relación costo-efectividad para el presente estudio. Por lo tanto, el bajo costo operativo y de adquisición, además del fácil acceso a diferentes tipos de materiales, hicieron de la técnica FDM la más adecuada para esta investigación.

Capítulo III

Diseño y selección

En esta sección se presentan el diseño y los materiales utilizados para la fabricación de las prótesis, así como los métodos elegidos para viabilizar su producción. Todos los elementos a continuación se planificaron para facilitar y abaratar y abaratar la producción de esta prótesis falángica.

Diseño para la impresión 3d de la prótesis

Concepción del proyecto

El modelo de la prótesis se basó en la falange derecha del autor de este trabajo de finalización de curso, principalmente en lo referente a dimensiones y movilidad. Además, los modelos de prótesis existentes que se encuentran en proyectos de código abierto se utilizaron como referencias para las articulaciones de las manos.

En la literatura se encuentran disponibles varios proyectos consolidados de prótesis de mano, que ya han pasado por pruebas y correcciones de posibles problemas, tanto en diseño e impresión, como en funcionalidad. Luego de recopilar datos y referencias, se inició la etapa de modelado utilizando el software Fusión 360.

Modelado en software

Para el modelado de la prótesis se utilizó el software fusión 360 versión 2019, el cual cuenta con varias herramientas que ayudan en el desarrollo y mejora del proyecto, además de tener una interfaz muy intuitiva y fácil de usar, lo que facilita el modelado. Cada parte de la mano se modeló por separado, totalizando 8 piezas, 3 de las cuales forman el dedo, una pieza extra para la palma de la mano y las 4 restantes formando parte de la carcasa.

La palma de la mano es bipartita, para facilitar su unión con la palma. Para que la prótesis pueda simular los tendones de los dedos, se incluyeron orificios en cada parte de ellos para la colocación de hilo nylon, que son los encargados de los movimientos de flexión y extensión.

Interfaz de impresora

Después de completar el modelado F360, los archivos se guardaron en la extensión STL y se transfirieron a un software llamado Repetier. Esto permite seleccionar la mejor posición para la impresión, lo que está directamente relacionado con la resistencia de la pieza. Luego se selecciona el “slicer” de la pieza, que en este caso es el software Slic3r. Esto permite configurar la impresora en cuanto a: temperatura de la mesa y del extrusor, velocidad de impresión, impresión de soportes adicionales para piezas complejas, densidad de impresión, altura de capa, tipo de relleno, entre otras configuraciones.

Además, te permite generar el G-code, que almacena toda la información necesaria para la impresión. Luego, el código G se transfiere al administrador, que en este caso es el firmware APG, que controla los componentes de la impresora.

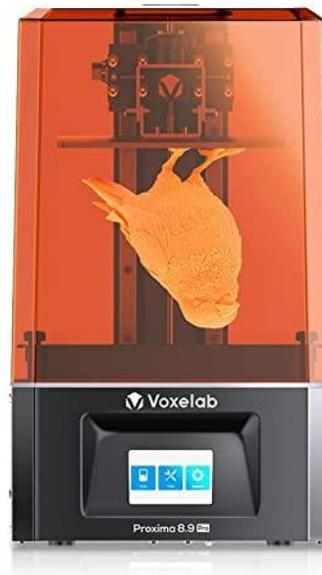
Impresión 3D

La impresora 3D utilizada es Impresora Voxelab Proxima 8.9 Pro, como se muestra en la figura 13, donde la base se mueve a lo largo del eje Z (hacia arriba y hacia abajo), y la extrusora se mueve a lo largo de los ejes X e Y (hacia los lados). Para comenzar a imprimir, la mesa debe estar a 100°C. Mientras se calentaba se realizaba su auto nivelación.

Si hay algún desnivel, este se corrige al imprimir la pieza. Luego el impresor extruía algo de material, para asegurar que no faltara al inicio de la impresión y para mejorar la fijación de la pieza sobre la mesa. La primera capa impresa presenta un borde más grande que la capa de la falda. A partir de estos ajustes, comenzó la impresión 3D capa por capa. Para agilizar el proceso, se imprimieron al menos 5 piezas pequeñas al mismo tiempo, ya que esto redujo el tiempo de preparación de cada pieza.

Figura 13

Impresora 3D



Nota. La figura representa el diseño de una impresora Voxelab Proxima 8.9 Pro.

Tomado de Amazon(2023)

Construcción de los eslabones

El diseño tendrá tres eslabones que representarán las falanges distal, media y proximal, cuyas medidas deberán ser proporcionales a una mano humana.

Falange distal**Figura 14***Falange Distal*

Nota. La imagen presenta el diseño en 3D de la falange distal

Falange media**Figura 15***Falange media*

Nota. La imagen presenta el diseño en 3D de la falange media.

Falange proximal

Figura 16

Falange proximal



Nota. La imagen presenta el diseño en 3D de la falange proximal

Diseño de las articulaciones

Como se requiere un movimiento rotacional en un solo eje para las falanges, se opta por colocar un eje cilíndrico entre cada falange con la finalidad de tener una mayor adhesión de resortes de pinzas para optimizar la extensión del dedo.

Figura 17

Diseño de articulaciones

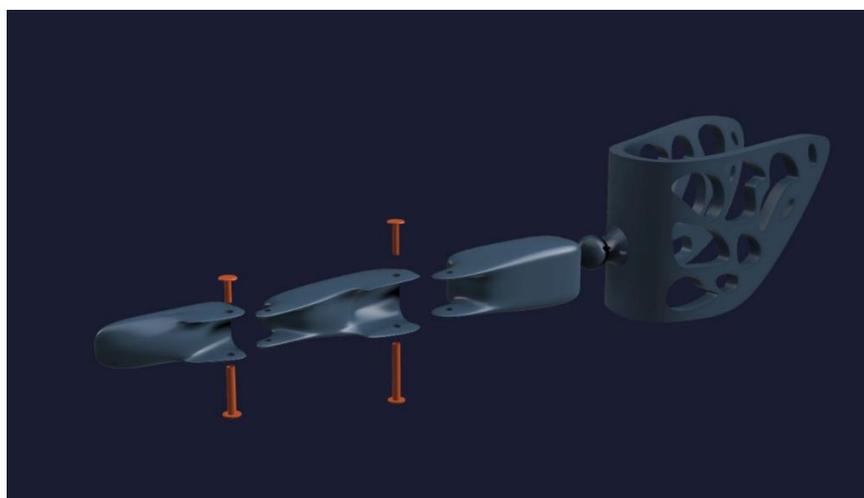
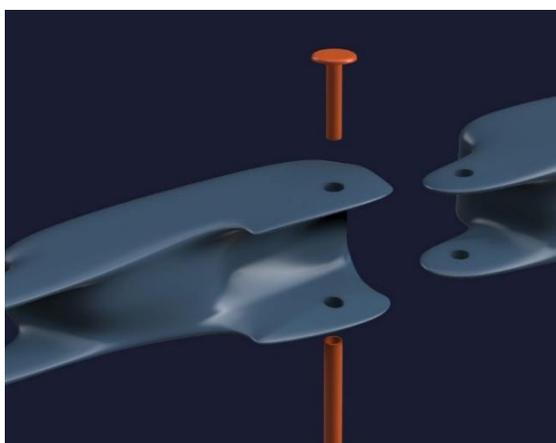


Nota. La imagen presenta el diseño del eje cilíndrico

Para tener un dedo completo se coloca las falanges tal como una mano normal desde la parte superior se tendría en primer lugar la falange distal, seguida de la media, luego la falange proximal y en cada una de las falanges se coloca un eje de aluminio, simulando las articulaciones.

Figura 18 y 19

Ejes



Nota. Las imágenes presentan el diseño del eje cilíndrico

Diseño de Actuadores

Para optar por el actuador indicado que se utilizará hay que analizar la cantidad de movimiento, la velocidad de reacción y la fuerza de cada falange; debido a la finalidad propuesta, se necesita que cada falange tenga su propio movimiento; por lo que se opta por utilizar servomotores ya que estos se ajustan a las necesidades de movimiento fuerza y velocidad requeridas para el prototipo en cuestión. En el mercado existen varios tipos de motores los mismos que difieren en tamaño, torque, velocidad. Por su utilización y por sus prestaciones se utiliza el servomotor MG90S.

Los actuadores de dicho motor son acoples plásticos que por lo general son lisos, por lo que hay que construir acoples para transmitir el movimiento, en este caso poleas.

Transmisión mediante poleas

El cable que será usado para tensar las poleas debe cumplir con ciertas características como lo son:

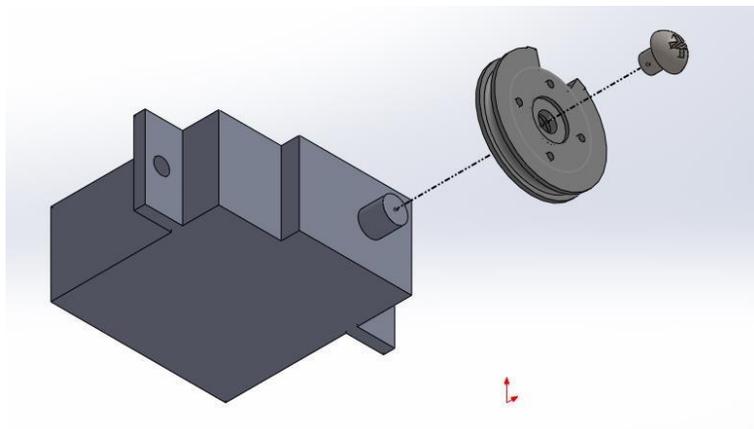
- Fácil manipulación, es decir que no sea demasiado rígido y se adapte a las curvas del modelo
- Bajo coeficiente de fricción, para mejorar el deslizamiento en el mecanismo y además para que no dañe los conductos por donde circula dicho cable
- Resistencia mínima

Una vez visto las características, el cable que cumple todas las necesidades es de una relativa facilidad de adquisición, es el cable nylon.

El cable con un diámetro de 0,30 mm tiene la resistencia suficiente para resistir la tensión necesaria inducida en dicho cable, pero pese a que es muy delgado, generará problemas al momento de su implementación, por lo tanto, se selecciona el cable con un diámetro de 0,5 mm.

Figura 20

Actuadores con el acople de poleas



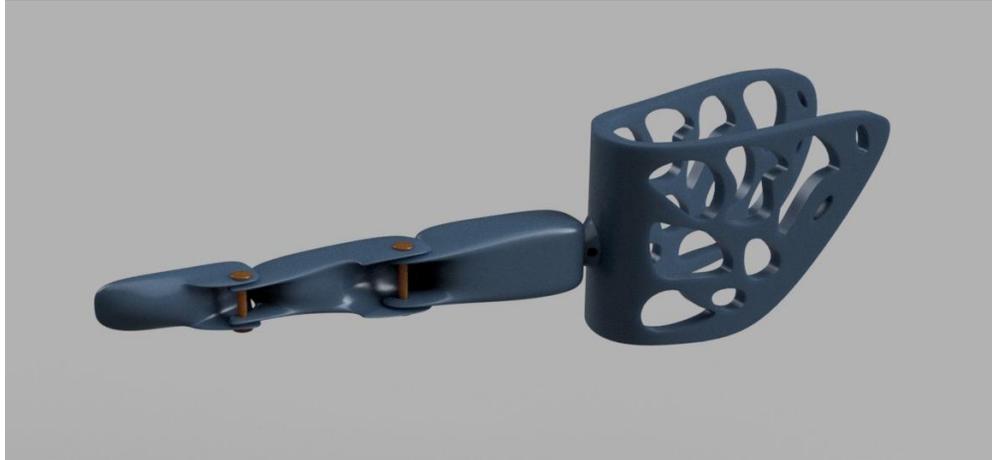
Nota: La imagen presenta el funcionamiento de los actuadores. Tomado de (Monar Martin; Murillo Luis, Diseño y construcción de una prótesis biónica de mano de 7 grados de libertad utilizando materiales inteligentes y control mioeléctrico adaptada para varios patrones de sujeción, 2015)

Ensamble completo

Con el diseño de cada falange, la interfaz de la mano debe tener las facilidades de acople del dedo y también para la conducción de los hilos de nylon que transmitirán el movimiento. Así mismo con el diseño del soporte de la muñeca, la carcasa, en donde estará la parte de control del prototipo.

Figura 21

Ensamble Completo del prototipo



Nota: La imagen presenta el funcionamiento de los actuadores y el ensamble completo de las piezas

Selección de materiales

Materiales utilizados en la impresión 3d en la técnica FDM

Con la expansión de la impresión 3D, también se extienden los tipos de materiales disponibles para fabricar piezas impresas en FDM. Como ejemplo de materiales utilizados en la técnica FDM destacan: materiales magnéticos, grafeno, cauchos, cerámicas, siliconas y metales.

Esta expansión de tipos de materiales fomenta una industria sedienta de poder finalmente fabricar piezas que se puedan imprimir a la vez con diferentes tipos de material y en una única pieza funcional, integrada vía archivo digital sin necesidad de montajes, uniones o integración de piezas.

ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno)

El Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno o ABS es un material muy conocido en la industria (SANTOS, 2010), el ABS es un copolímero con amplia aplicación en la industria del plástico debido a sus excelentes propiedades (mecánicas, eléctricas, químicas y ópticas) y por tener bajo coste para un polímero de gran aplicación en ingeniería.

Según uno de sus fabricantes, Ultimaker (*Ultimaker*, s. f.) , el material ABS es un material con excelente adherencia entre capas, estética agradable, mínima deformación y adherencia estable a la base, pero en tecnología 3D es importante recalcar que se deben considerar numerosos factores por su estampado.

En términos generales, lo que sucede a menudo es el agrietamiento y el desprendimiento de la cama de impresión. En el caso del material ABS, es importante que la impresión 3D se realice en un ambiente con temperatura controlada y principalmente sin corrientes de aire, manteniendo la mesa de impresión a una temperatura mínima de 110° C, y la temperatura de extrusión a 220° C (*Ultimaker*, s. f.).

Normalmente este material se puede utilizar para muchos tipos de prototipos, pero su ficha técnica informa que el ABS no está indicado para piezas en contacto con alimentos y su exposición prolongada a los rayos UV puede afectar las propiedades del material. La temperatura de exposición máxima recomendada debe ser inferior a 85°C. La Tabla 2 muestra las características del filamento del fabricante Ultimaker (*Ultimaker*, s. f.)

Tabla 2*Propiedades Mecánicas de ABS*

Prueba	Valor	Unidad	Modelo de prueba
módulo de tracción	1681.5	MPa	ISO 527
Resistencia máxima a la tracción	39		
Resistencia a la tracción de rotura	33.9		
límite de estiramiento	3.6	%	
alargamiento a la rotura	4.2		
Fuerza flexible	70.5	MPa	ISO 178
módulo de flexión	2017	MPa	
Resistencia al impacto Izod, entallado (a 23°C)	10.2	kJ/m	ISO 180
Dureza	76	-----	Durómetro

Nota. La tabla muestra las propiedades mecánicas del ABS, los datos fueron obtenidos a partir de la hoja técnica del fabricante.

El material ABS, además de ser una buena opción para la impresión, también es un material resistente a los impactos mecánicos (tiene buenas propiedades mecánicas). El costo del material varía según cada fabricante, utilizando como referencia algunos de sus principales proveedores y fabricantes dentro de la página Hubs 3D Printing (2017), es posible encontrar el material por valores entre US\$ 20 a US\$ 30 por 1 kg.

PLA (Ácido poliláctico)

El Poliláctico Láctico o PLA es uno de los materiales más utilizados en la impresión 3D, principalmente en la técnica FDM, ya que es un material fácil de imprimir, compuesto por materiales biológicos como el almidón de maíz y la caña de azúcar.

Al igual que el material ABS, el PLA es un material resistente, pero no tolera el calor como el ABS.

El PLA es considerado un material muy prometedor, siendo obtenido por fermentación bacteriana de la glucosa extraída del maíz (Jorquera, 2016). La descomposición del PLA es lenta en el suelo (más de 80 días) pero se degrada fácilmente en un entorno de compostaje.

Según uno de sus fabricantes, Ultimaker (*Ultimaker*, s. f.) , el material se puede utilizar con utensilios domésticos, juguetes, prototipos y maquetas arquitectónicas, y no se recomienda su uso en materiales en contacto con alimentos, y en aplicaciones de larga duración en espacios exteriores. ., expuesta a temperaturas superiores a 40°C.

Para la impresión de este material, cada fabricante indica una temperatura diferente debido al proceso de fabricación del filamento, pero en general se recomienda una temperatura mínima de extrusión de 180°C y no es necesaria una mesa calefactora, en caso de utilizarla basta con tener la baja temperatura entre 40°C a 60°C.

Un punto importante en la impresión 3D con PLA es el uso de ventilación directa en la boquilla del extrusor para ayudar a la integración entre las capas y el enfriamiento del material para la correcta unión entre cada capa (Hubs 3D Printing, 2017).

En la Tabla 3 se pueden apreciar las propiedades mecánicas de este material según el fabricante Ultimaker. Y las características del filamento.

Tabla 3*Propiedades Mecánicas del PLA*

Prueba	Valor	Unidad	Modelo de prueba
módulo de tracción	579	MPa	ISO 527
Resistencia máxima a la tracción	27.6		
Resistencia a la tracción de rotura	34.2		
límite de estiramiento	20	%	
alargamiento a la rotura	210		
Fuerza flexible	24	MPa	ISO 178
módulo de flexión	463.2	MPa	
Resistencia al impacto Izod, entallado (a 23°C)	35.2	kJ/m	ISO 180
Dureza	74	-----	Durómetro

Nota: La tabla muestra las propiedades mecánicas del PLA, los datos fueron obtenidos a partir de la hoja técnica del fabricante.

Con estas propiedades, el PLA tiene una buena resistencia a la tracción, combinado con una buena calidad superficial, fácil impresión, varias opciones de aplicación y colores, biodegradable, se convierte en uno de los materiales más adecuados para la impresión 3D FDM.

El costo del material varía según cada fabricante, utilizando como referencia algunos fabricantes como Hubs 3D Printing (2017), es posible encontrar el material por valores entre US\$ 30 a US\$ 40 cada 1 kg.

Resina

La resina de poliamida es mundialmente conocido. Según Hubs 3D Printing (2017), la resina es resistente, duradera y versátil como material de impresión 3D.

Para la impresión, cada fabricante recomienda una temperatura diferente, pero en general, una temperatura mínima de extrusión de 220°C y una temperatura de mesa superior a 85°C en el mercado alcanzan estas altas temperaturas de impresión, haciendo que el uso de este material sea un problema. En la Tabla 4 se pueden apreciar las propiedades mecánicas de la resina según el fabricante Ultimaker:

Tabla 4

Propiedades Mecánicas de la Resina

Prueba	Valor	Unidad	Modelo de prueba
módulo de tracción	2346.5	MPa	ISO 527
Resistencia máxima a la tracción	49.5		
Resistencia a la tracción de rotura	45.6		
límite de estiramiento	3	%	
alargamiento a la rotura	5.2		
Fuerza flexible	103.0	MPa	ISO 178
módulo de flexión	3150	MPa	
Resistencia al impacto Izod, entallado (a 23°C)	5.1	kJ/m	ISO 180
Dureza	83	-----	Durómetro

Nota. La tabla muestra las propiedades mecánicas de la resina, los datos fueron obtenidos a partir de la hoja técnica del fabricante.

El costo del material varía de acuerdo con cada fabricante, pero la resina es un material fácil de encontrar en las tiendas y su costo es inferior a los demás presentados hasta ahora, tomando como referencia algunos de sus fabricantes como Hubs 3D Printing, y tiendas online.

Comparación entre materiales de impresión 3D

Con la elección de la técnica FDM y la profundización de los materiales utilizados en esta técnica, surge la necesidad de una comparación entre los materiales presentados para que sea posible identificar el mejor material para la aplicación en el desarrollo de DAH en esta investigación.

Los resultados presentados en la Tabla 5 reflejan las características de cada material utilizando los resultados de las hojas de datos proporcionadas en el capítulo anterior por cada proveedor y utilizando los datos de prueba realizados con los mismos estándares para una comparación adecuada.

Tabla 5

Comparación entre materiales de impresión 3D

Prueba	ABS	RESINA	PLA
Módulo de tracción (MPa)	1681.5	2346.5	579
Límite de resistencia a la tracción (MPa)	39	49.5	27.6
Resistencia a la tracción a la rotura (MPa)	33.9	45.6	34.2
Elongación en el límite (%)	3.6	3	20
Alargamiento a la rotura (%)	4.2	5.2	210
Resistencia a la flexión (MPa)	70.5	103.0	24
Módulo de flexión (MPa)	2017	3150	463.2

Prueba	ABS	RESINA	PLA
Resistencia al impacto Izod, entallado (a 23°C) (kJ/m ²)	10.2	5.1	35.2
Tenacidad	76	83	74

Nota. La tabla muestra una comparación entre los materiales de impresión 3D, los datos fueron obtenidos a partir de la hoja técnica del fabricante.

Es posible comprobar la ventaja de la resina frente a otro tipo de materiales.

El módulo de tracción, la resistencia a la tracción, la resistencia máxima a la tracción y el módulo de flexión son características relacionadas con el esfuerzo requerido para que el material resista la ruptura. De acuerdo con la Tabla 5, es posible verificar que la resina tiene un valor superior al compararlo con el ABS y el PLA.

La resina demuestra ser muy superior a otros materiales en cuanto a la resistencia al impacto, esta característica es importante teniendo en cuenta que el dispositivo desarrollado será utilizado constantemente por los niños en diversas aplicaciones. Sin embargo, su característica higroscópica no es adecuada para este tipo de aplicación. En la Tabla 5 se presenta una comparación en relación con el costo entre los tres materiales presentados en la Tabla 6.

Tabla 6.

Costo de los materiales ABS, PLA, y Resina

Material	PLA	ABS	Resina
Costo	Menor	Mediano	Mayor

Nota. La tabla muestra el costo de menor a mayor según las características dadas.

Así, se puede observar que el material de mayor coste es la Resina, seguido del ABS y el PLA.

Material utilizado en el proyecto

Después de analizar las características mecánicas y de impresión, se decidió utilizar la resina, además se utilizó el nylon solo como tensor para la flexión y extensión. Este material presenta una fácil impresión 3D FDM, y sus propiedades mecánicas son muy buenas en comparación con los otros materiales estudiados, y también, porque es un material biodegradable con un costo asequible. Se observa que, aunque hay varios materiales disponibles, lamentablemente aún no existe una estandarización de las características de impresión 3D FDM que permita al usuario comparar los materiales tal como se presentó en los apartados anteriores.

Servomotores

El servomotor utilizado es MG90S ya que este es uno de los más comercializados en nuestro mercado y por sus características de torque es ideal para su utilización.

Tabla 7

Especificaciones del servomotor

Especificaciones	Valor	Unidad
Peso	13.4	g
Dimensión	22.5x 12x35.5	mm
Torque	1.8-2.2	4.8 V
Velocidad de operación	0.1/60 – 0.08/60	grados
Voltaje de operación	4.8-6	voltios
Ancho de banda muerta	5	μ5

Nota. La tabla muestra las especificaciones del servomotor.

Capítulo IV

Desarrollo del tema

En este capítulo se describe el desarrollo del proyecto en sus etapas de evolución, con el propósito de obtener una estructura de prótesis de una falange y evaluarlo en cuanto a su modelado e impresión 3D, características geométricas y superficiales, además de realizar análisis cinemáticos y dinámicos.

Construcción del prototipo

Una herramienta CAD brinda un entorno muy preciso de acabados perfectos y de propiedades físicas ideales, pero en la realidad nos encontramos con diferencias en estos aspectos, por ejemplo, en nuestro medio las personas que trabajan en el área mecánica no disponen de herramientas tan pequeñas para realizar acabados precisos, por lo que el diseño debe estar orientado a la realidad de nuestro medio.

Tabla 8

Lista de materiales

Cantidad	Material
1	ESP32
2	Servomotor MG90S
1	Batería Lipo 7.4V (300mah)
1	Regulador de voltaje L7805cv
1	Sensor Flex 2.2in
1	Placa baquelita
1	Interruptor
1	Resistencia (330ohm)
0,50	Hilo Nylon 0,5mm
1	Alambre de conexión flexible
3	Ejes cilíndricos

Cantidad	Material
1	Condensador

Nota: La tabla muestra la lista de materiales utilizados en la construcción del prototipo

Entre las herramientas necesarias se utiliza: destornilladores, cautín, pinzas, tijeras. El proceso de fabricación es realizado mediante la utilización de impresión 3D, para el presente trabajo se utilizó una impresora Voxelab 8.9 para resina.

Para el diseño de la parte de control se implementará una ESP32, la misma que nos brindará los módulos requeridos para realizar el control de los 2 servomotores, y sobre todo el módulo USB para la comunicación con el computador.

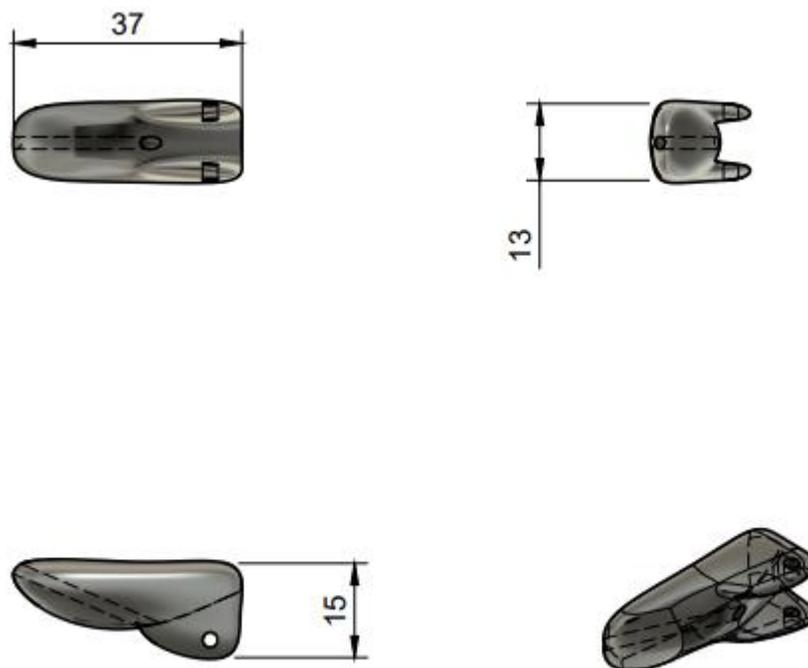
Detalles del maquinado

Tabla 9

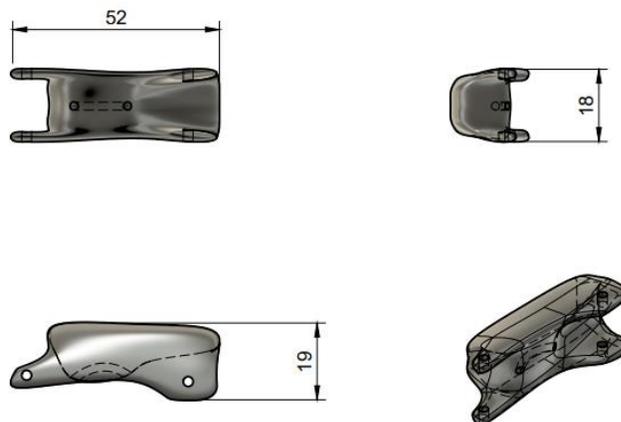
Detalles del maquinado

Elemento	Tiempo (min)	Cantidad (unidades)
Falange distal	120	1
Falange media	120	1
Falange proximal	120	1
Interfaz de la palma:	600	1
Interfaz de la carcasa parte	520.3	1
1		
Interfaz de la carcasa parte	380.3	1
2		
Polea 12 mm	67.5	2

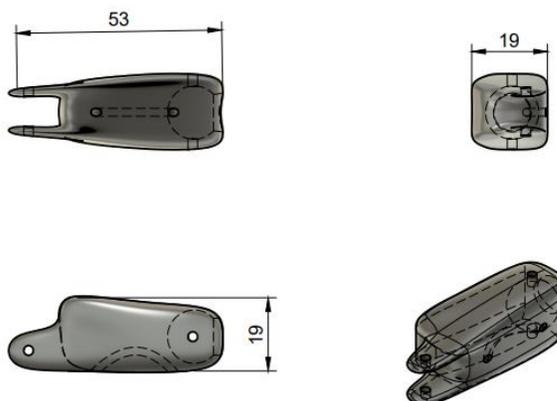
Nota. La tabla muestra el tiempo de impresión de las piezas elaboradas por el autor

Planos de maquinado***Falange distal*****Figura 22*****Planos falange distal***

Nota: La figura muestra el diseño de CAD de la falange distal elaborada por el autor.

Falange media**Figura 23***Planos falange media*

Nota. La figura muestra el diseño de CAD de la falange media elaborada por el autor.

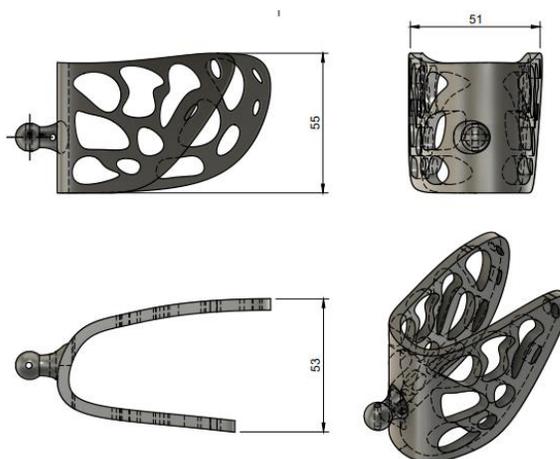
Falange proximal**Figura 24***Planos falange proximal*

Nota. La figura muestra el diseño de CAD de la falange proximal elaborado por el autor.

Interfaz de mano

Figura 25

Planos interfaz de la mano

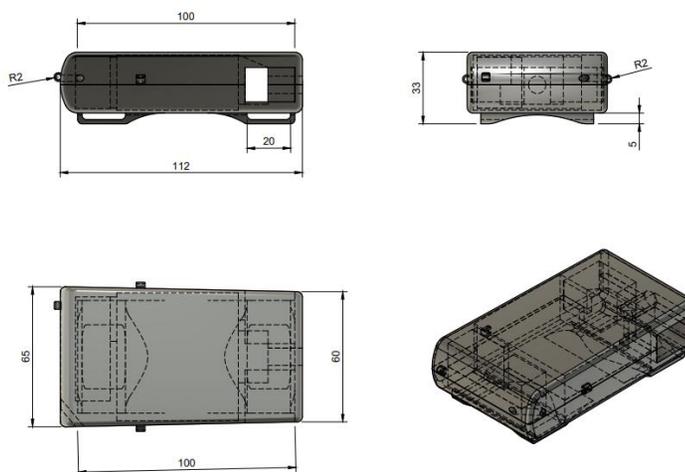


Nota. La figura muestra el diseño de CAD de la interfaz de la mano.

Carcasa

Figura 26

Planos Carcasa



Nota. La figura muestra el diseño de CAD de la carcasa elaborada por el autor.

Construcción de piezas

Las falanges son construidas de resina, las mismas que se basan en las especificaciones del diseño, por lo que se puede ensamblarlas. La interfaz de la mano con la muñeca son el núcleo para el correcto funcionamiento del prototipo.

Figura 27

Falanges e interfaz de la mano impresas



Nota. La figura muestra las falanges y la interfaz de la mano después de la impresión 3D

En la figura 27 se observa el dedo armado en la interfaz de la mano, al dedo se la ajustará para colocar los hilos encargados de transmitir el movimiento desde los servomotores.

Figura 28

Prototipo de prueba instalado



Nota. La figura muestra el prototipo del dedo con la interfaz de la mano

Figura 29

Parte delantera de la carcasa (parte 1)



Nota. La figura representa la parte delantera de la carcasa.

Figura 30

Parte posterior de la carcasa (parte 2)



Nota. La figura representa la parte posterior de la carcasa.

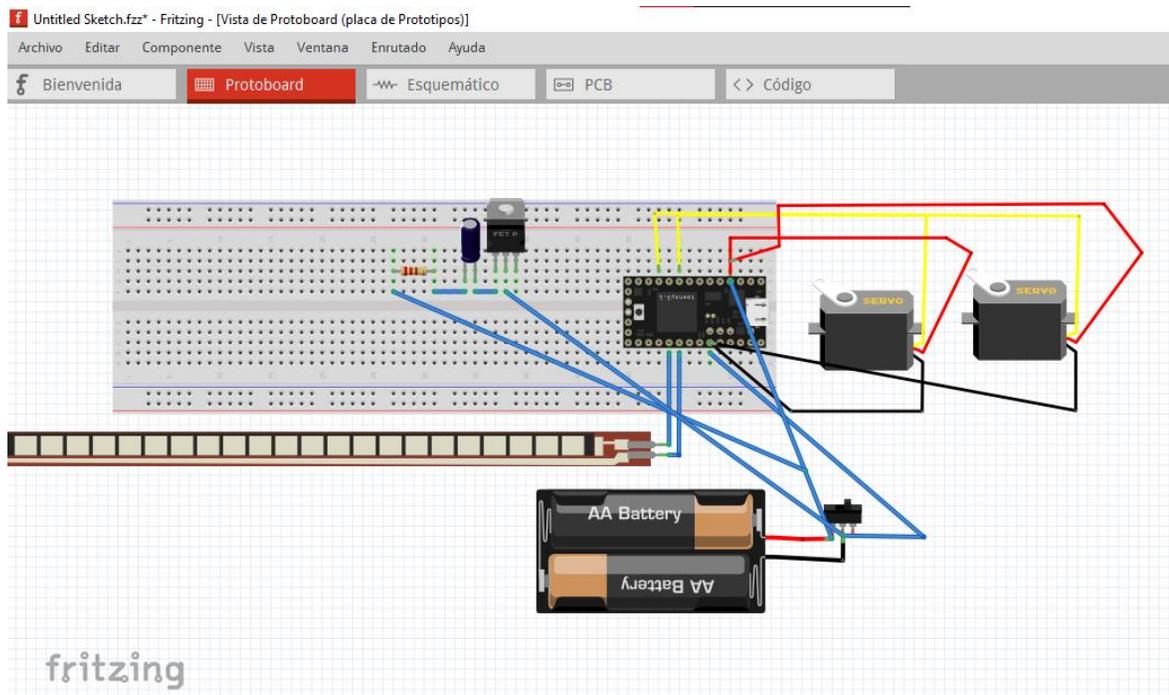
Como siguiente paso se procede a colocar los servomotores, la placa PCB y colocar el nylon por los ductos que guiaran hacia al dedo.

Implementación del sistema electrónico

Debido a las dimensiones y tamaño del prototipo, se procedió a realizarlo mediante la red de cables. Se identificaron los pines a utilizar de la ESP32, de los servomotores y el sensor Flex.

Figura 31

Esquematación del sistema electrónico



Nota. En la presente figura observamos el diseño del sistema de control

Acoplamiento de poleas con el servomotor

Para el acoplamiento de las poleas se realizó el montaje en el eje del servomotor, ajustamos igualmente con los tornillos y envolvemos el nylon.

Figura 32

Armado del prototipo



Nota. La figura muestra la colocación de las poleas en el eje de los servomotores, así como el nylon

Figura 33

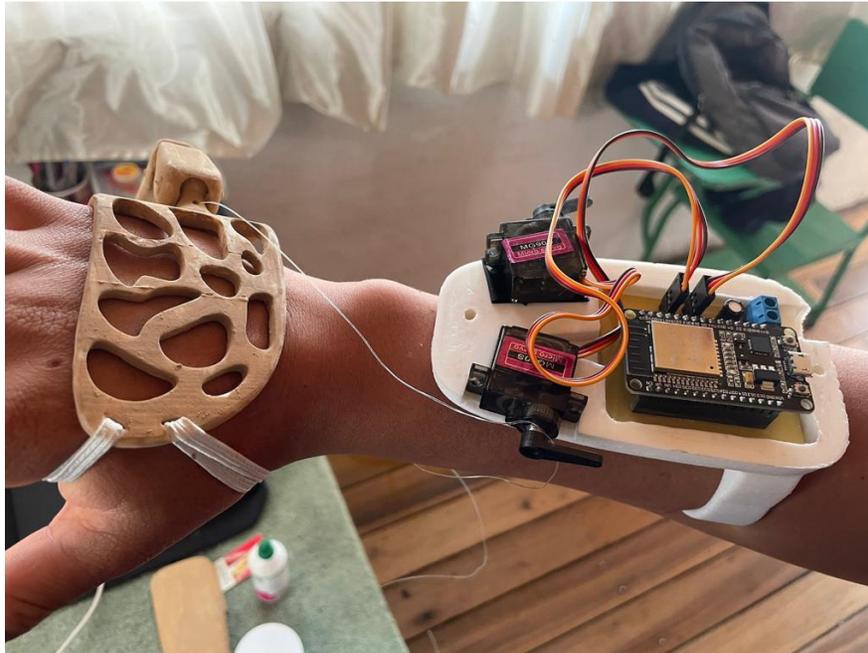
Instalación previa al sistema de control



Nota. La figura muestra la colocación del ensamble previo al sistema de control en la mano

Figura 34

Colocación del sistema de control en la carcasa



Nota. La figura muestra el posicionamiento del sistema de control en la carcasa

Una vez obtenidas las piezas se procede a ensamblarlas, la carcasa se divide en dos partes como ya se mencionó, las cuales se unen mediante presión. Con ayuda de los ejes y los resortes para pinzas completamos el prototipo del dedo, el cual va unido a la interfaz de la mano.

Figura 35

Prototipo final



Nota: Se observa el prototipo final de dedo protésico

Figura 36

Prototipo acoplado a la mano



Nota. La figura muestra al prototipo acoplado en la mano del usuario

Capítulo V

Pruebas y resultados

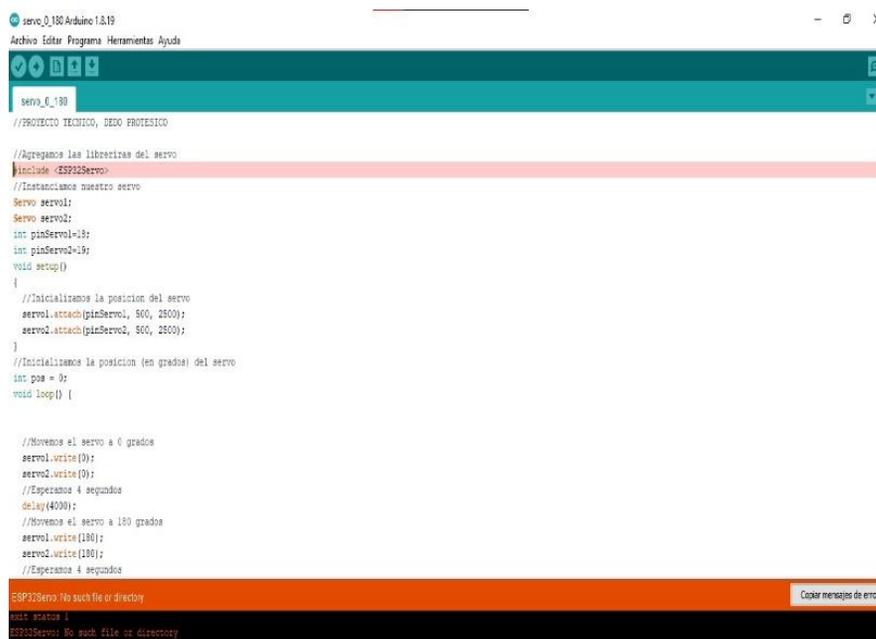
Pruebas de software

Se realizaron varias pruebas para la obtención del código de programación final, se utilizaron librerías como: `#include <ESP32Servo.h>`; que nos ayuda al control de los servomotores.

Prueba 1: Error ESP32Servo

Figura 37

Prueba 1



```
servo_0_180 Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

servo_0_180
//PROYECTO TÉCNICO, DEDO PROTESTICO

//Agregamos las librerías del servo
#include <ESP32Servo>
//Instanciamos nuestro servo
Servo servo1;
Servo servo2;
int pinServo1=18;
int pinServo2=19;
void setup()
{
  //Iniciamos la posición del servo
  servo1.attach(pinServo1, 500, 2500);
  servo2.attach(pinServo2, 500, 2500);
}
//Iniciamos la posición (en grados) del servo
int pos = 0;
void loop() {

  //Movemos el servo a 0 grados
  servo1.write(0);
  servo2.write(0);
  //Esperamos 4 segundos
  delay(4000);
  //Movemos el servo a 180 grados
  servo1.write(180);
  servo2.write(180);
  //Esperamos 4 segundos

ESP32Servo: No such file or directory
exit: success
ESP32Servo: No such file or directory
```

Nota. La figura muestra el código obtenido de Arduino, versión 1.8.19

Prueba 2: Error de carga en SETUP

Figura 38

Prueba 2

```

servo_0_180
#include <ESP8266Servo.h>
//Instanciamos nuestro servo
Servo servo1;
Servo servo2;
int pinServo1=18;
int pinServo2=19;
void setup()
{
  //Iniciamos la posicion del servo
  servo1.attach(pinServo1, 500, 2500);
  servo2.attach(pinServo2, 500, 2500);
}
//Iniciamos la posicion (en grados) del servo
int pos = 0;
void loop() {

  //Muevamos el servo a 0 grados
  servo1.write(0);
  servo2.write(0);
  //Esperamos 4 segundos
  delay(4000);
  //Muevamos el servo a 180 grados
  servo1.write(180);
  servo2.write(180);
  //Esperamos 4 segundos
  delay(4000);
}
}

esperado '\r' before \n 0
exit status 0
esperado '\r' or '\n' before 'void'
  
```

Nota. La figura muestra el código obtenido de Arduino, versión 1.8.19

Prueba 3: Error delay (4000)

Figura 39

Prueba 3

```

servo_0_180
#include <ESP8266Servo.h>
//Instanciamos nuestro servo
Servo servo1;
Servo servo2;
int pinServo1=18;
int pinServo2=19;
void setup()
{
  //Iniciamos la posicion del servo
  servo1.attach(pinServo1, 500, 2500);
  servo2.attach(pinServo2, 500, 2500);
}
//Iniciamos la posicion (en grados) del servo
int pos = 0;
void loop() {

  //Muevamos el servo a 0 grados
  servo1.write(0);
  servo2.write(0);
  //Esperamos 4 segundos
  delay(4000);
  //Muevamos el servo a 180 grados
  servo1.write(180);
  servo2.write(180);
  //Esperamos 4 segundos
  delay(4000);
}
}

esperado \t at end of input
exit status 0
esperado '\t' at end of input
  
```

Nota: La figura nos muestra el código obtenido de Arduino, versión 1.8.19

Prueba 4: Código sin error

Figura 40

Código sin error



```
SENSORFLEXFINAL Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

SENSORFLEXFINAL
#include <ESP32Servo.h> //LIBRERIA DEL SERVO PARA UNA ESP32
Servo servo1;
Servo servo2;

int servo =13;
int servod = 12;
//ADC6 encargado de la conversión analógica digital empleada en la placa para poder leer todos los sensores disponibles en el mercado
int flex =34;
int lectura;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  analogReadResolution(12);
  servo1.attach(servo); // attaches the servo on pin 12 to the servo object
  servo2.attach(servod);
}

void loop() {
  lectura = analogRead(flex);
  Serial.println(lectura);
  int valor servo=map(lectura, 50, 300, 0, 180);
  servo1.write(valor servo);
  servo2.write(valor servo);
  delay(50);
}
```

Compilado
El Sketch usa 226586 bytes (17%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 1310720 bytes.
Las variables Globales usan 13744 bytes (4%) de la memoria dinámica, dejando 313936 bytes para las variables locales. El máximo es 327680 bytes.

Nota. La figura representa código final obtenido de Arduino, versión 1.8.19

Pruebas de resistencia y agarre con peso al prototipo

Las pruebas de resistencia y agarre del prototipo se realizaron mediante cuatro diferentes materiales y pesos donde se obtuvo los siguientes resultados.

Prueba de resistencia y agarre 1: Pelota de tenis

Peso: 55.8 g

Diámetro: 6.67 cm

Figura 41*Prueba de la pelota de tenis*

Nota. La figura muestra la prueba 1, resistencia y agarre con pelota de tenis; Elaborado por el autor.

Resultados, el programa registro que el prototipo tuvo un agarre máximo de 6.35 cm, como se puede observar en la imagen el dedo agarra la pelota en una posición diferente a su centro, en una posición de 0.32 mm menos de su diámetro definido.

Prueba de resistencia y agarre 2: Huevo

Peso: 53 g

Diámetro: 3 cm

Figura 42

Prueba de resistencia y agarre con un huevo



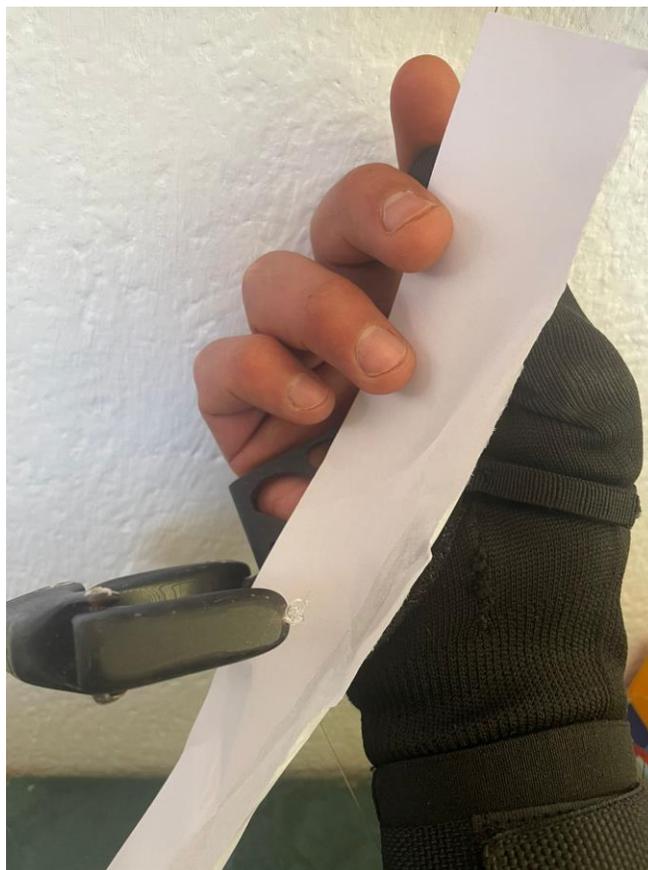
Nota. La figura muestra la prueba 2, resistencia y agarre con un huevo.

Se puede evidenciar en la figura 32, que el agarre fue totalmente exitoso por parte de la prótesis.

Prueba de resistencia y agarre 3: Papel

Peso: 0.0075 g

Tirita.

Figura 43*Prueba de resistencia y agarre 3: Papel*

Nota. La figura muestra la prueba 3, resistencia y agarre con tiras de papel.

En esta prueba el prototipo tuvo problemas en su agarre de amplitud mínima, en la vida normal el dedo real puede sostener una hoja, sin embargo, el prototipo presenta problemas para realizar esta acción, esto se debe, por que el material no puede realizar la flexión completa en la falange distal, por tanto, el movimiento es reducido tanto por la forma de construcción como por el material.

No obstante, para determinar la amplitud mínima de agarre se realizó diferentes pruebas con bolas de papel, donde se determinó que el prototipo tiene un agarre mínimo de 3cm de forma correcta, mientras que tiende a resbalar la sujeción cuando el material tiene un diámetro inferior.

Prueba de resistencia y agarre: Bola de papel

Figura 44

Prueba de resistencia y agarre con la bola de papel



Nota. La figura muestra la prueba 3, resistencia y agarre con bolas de papel.

Prueba de resistencia y agarre 4: Peso máximo

Peso: 2 kg

Figura 45

Prueba de resistencia y agarre 4: Peso máximo



Nota. La figura muestra la prueba 4, resistencia y agarre, peso máximo.

Al realizar las diferentes pruebas con varios pesos, el prototipo cedió a la rotura con un peso aproximado de 2kg.

Estos resultados demuestran que la prótesis cumplió su objetivo, el movimiento de del dedo demuestra que la articulación funcionó y que se sujeta bien a la palma de la mano, lo que proporcione un impacto positivo en el funcionamiento de la DAH. Así que la calificación fue buena.

La posición de agarre se evaluó como Buena, ya que funcionó como se esperaba. Sin embargo, se observa que hay otras mejoras a implementar, tales como: movimiento de flexión para sostener objetos grandes fue bueno, donde el usuario puede fijar esta posición sin hacer ningún esfuerzo. En esta investigación estos resultados fueron bien evaluados, y demostraron que su funcionamiento fue el esperado.

El funcionamiento del componente de flexión interior fue evaluado como Malo, debido a que esta nueva función requiere un gran esfuerzo por parte del usuario para sujetar objetos planos o delgados.

Finalmente, en cuanto al peso la evaluación se considera como buena, dado que puede sostener un peso de 1,5 kg sin problema.

Tiempo de procesamiento utilizado en la fabricación del prototipo

Se siguieron tres pasos para construir y fabricar el prototipo:

- PRIMERA ETAPA: Impresión 3D resultando en un total de 28 (veintiocho) horas y 27 (veintisiete) minutos.
- SEGUNDA ETAPA: ajuste y limpieza de las piezas impresas, que dura un total de 3 (tres) horas.
- TERCERA ETAPA: montaje de todas las partes resultando en un total de 1 (una) hora y 30 (treinta) minutos.

Así, se necesitaron 32 h 57 m (treinta y dos horas y cincuenta y siete minutos) para la construcción total y el montaje final del prototipo, sin tener en cuenta el tiempo dedicado a ajustes, limpieza y pruebas individuales y conjuntas.

Análisis económico del proyecto

Como se acoto en el tema del proyecto, el costo para el desarrollo de este proyecto iba a ser bajo, por lo que el valor de sus componentes tiene un valor accesible para cada usuario. A continuación, se detallan la cantidad de materiales y su precio correspondiente, incluidas también las impresiones.

Tabla 10

Lista de gastos

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Precio Final
ESP32	1	\$12.50	\$12.50
Servomotor MG90S	2	\$8.04	\$16.08
Batería Lipo 7.4V (300mah)	1	\$18.00	\$18.00
Regulador de voltaje L7805cv	1	\$0.40	\$0.40
Sensor Flex 2.2in	1	\$22.00	\$22.00
Placa baquelita	1	\$0.50	\$0.50
Interruptor	1	\$0.30	\$0.30
Resistencia (330ohm)	1	\$0.02	\$0.02
Hilo Nylon 0,5mm	0.5	\$1.50	\$1.50
Alambre de conexión flexible	1	\$1.00	\$1.00
Ejes cilíndricos	3	\$0.45	\$1.35
Capacitor electrolítico	1	\$0.13	\$0.13
Impresión 3D	165.8g	\$0.50	\$82.9
TOTAL			\$156.68

Nota. La tabla muestra los gastos del proyecto

Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una prótesis de mano mediante impresión 3D en resina. Fue posible imprimir en 3D una prótesis de bajo costo, liviana y resistente utilizando como modelo la mano del autor, el software Fusión 360 para el modelado y el software Arduino como interfaz de programación. Todas las pruebas propuestas fueron posibles de realizar con la prótesis obtenida.

Modelado e impresión 3D de la mano protésica, el modelado de la estructura mecánica se realizó según lo previsto, a pesar de los problemas descritos durante la impresión 3D. Sin embargo, la forma de la prótesis fue una de las principales causas de los resultados inferiores a los esperados obtenidos en las pruebas de resistencia.

En el análisis del agarre por parte del dedo de la prótesis, se evidencio que, a pesar de ser similares a los de la mano humana, generaban un movimiento de agarre superior. De esta manera, generó un movimiento de extensión superior al real, llegando a tener una amplitud de agarre de 6.35 cm, no obstante, en cuanto a la flexión fue limitada, esto perjudico la función de sujeción en amplitudes pequeñas, como se observa en las imágenes de prueba.

Por tanto, en la evaluación de la fuerza de agarre y la capacidad de agarre de las muestras, los resultados de la prueba fueron satisfactorios para objetos más grandes e insatisfactorios para objetos más pequeños. Así como la prueba de sujeción, que también presentó resultados inferiores a los esperados. Estos parámetros podrían evitarse en la etapa de modelado de prótesis.

En el análisis de la resistencia, al probar con diferentes pesos, se identificó que la prótesis puede soportar un peso máximo de 2kg de peso, no obstante, se obtuvo buenos resultados con pesos menores.

Recomendaciones

Para evitar errores de diseño en la impresión 3D de la mano protésica, es recomendable tener un mayor conocimiento previo de la impresión, incluyendo el ajuste de parámetros y la selección de materiales adecuados. También es importante realizar pruebas previas al modelo completo para detectar y corregir posibles errores.

Para mejorar la capacidad de agarre de la prótesis, se sugiere ajustar la forma y la posición de los dedos para que se ajusten mejor a la mano humana y permitan un movimiento de flexión más amplio. Además, se podría considerar la inclusión de materiales más flexibles en la prótesis para mejorar la sujeción de objetos pequeños.

Para mejorar la resistencia de la prótesis, se recomienda seleccionar materiales más resistentes para la impresión, y considerar reforzar las zonas de mayor estrés en el diseño de la prótesis. Además, se debe tener en cuenta los límites de la prótesis y evitar someterla a pesos superiores a los que puede soportar.

Bibliografía

- 3D Systems. (2017, febrero 2). *Sinterización selectiva por láser*. 3D Systems. <https://es.3dsystems.com/selective-laser-sintering>
- 3Dnatives. (2017, octubre 9). *FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!* <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- Carrillo, G., Nuila, C., Laínez, J., Carrillo, G., Nuila, C., & Laínez, J. (2020). Prototipado rápido en la fabricación de moldes impresos en 3D para soplado de plástico. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 24, 28-35. <https://doi.org/10.17163/ings.n24.2020.03>
- Castillo, R. (2022). *Efectividad de un mesomodelo con regímenes de daño difuso y discreto en la predicción del comportamiento mecánico de materiales compuestos laminados termoplásticos impresos en 3D*. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9817>
- CeiAcademy. (2016, septiembre 19). Los dedos de la mano en español, inglés, alemán y francés. *CEI Academy*. <http://ceiacademy.es/los-dedos-de-la-mano-en-espanol-ingles-aleman-y-frances/>
- Filament2print. (2020). *Impresoras 3D de Resina: SLA, DLP y LED-LCD*. https://filament2print.com/es/blog/99_impresoras-3d-resina-SLA-DLP-LED-LCD.html
- García, N. P. (2020). *Diseño de una impresora 3D de media y alta temperatura* [Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/57839/1/TFG_NATALIA_PESO_GARCIA.pdf

García Pérez, M. (2019). *Estudio teórico y experimental del acabado superficial en la deposición de gotas sobre superficies planas horizontales en procesos de impresión «material jetting»*. <https://repositorio.upct.es/handle/10317/7906>

Guacho Rivera, D. D. (2018). *Implementación de un prototipo de prótesis con control muscular para mejora del movimiento y agarre de objetos, aplicada a personas con muñón o malformación en los dedos de la mano*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9325>

Hubs 3D Printing. (2017). *3D printing trends Q4*. Hubs. <https://www.hubs.com/blog/3d-printing-trends-q4-2017/>

Jorquera, A. (2016). *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Martín, A., & Grobelska, M. A. (2020). *Diseño universal y prototipado rápido de adaptador de adaptador de dispositivo móvil*. <https://idus.us.es/handle/11441/128541>

Moore, K. L., & Dalley, A. F. (2009). *Anatomía con orientación clínica*. Ed. Médica Panamericana.

Moya, R., & Magal-Royo, T. (2019). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano. *Tsantsa: Revista de Investigaciones Artísticas (Online)*, 7, 233-240. <https://riunet.upv.es/handle/10251/169189>

Orellana, G. (2020). *Sistema de impresión de corazón en 3D para prototipado rápido*. [Thesis, Universidad del Valle de Guatemala]. <http://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/3621>

Ortega, F. D. J., Díaz Ruiz, J. A., Pacheco Andrade, G., & De La Hoz Suarez, J. (2018). *Implementación de máquina cnc para la fabricación de placas pcb's usando*

hardware libre (open-hardware).

<https://bonga.unisimon.edu.co/handle/20.500.12442/2244>

Robles, C. A., Román, D. J., Polo, A. M., & AUTOR 6. (2017). Brazo robótico con dieciocho grados de libertad tele-operado por un guante electrónico. *Revista ESPACIOS*, 38(03). <http://www.w.revistaespacios.com/a17v38n03/17380322.html>

Rojas, M. (2017). *Prototipado rápido de un álabe mediante impresión 3D por deposición de fundido*. <https://idus.us.es/handle/11441/65647>

Sánchez, M. (2019). *Utilización de la tecnología del sinterizado selectivo por láser en el sector del juguete* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/131289>

Sousa, A. (2021). *Fabricación y adaptación de una montura impresa con tecnología 3D SLA*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/356126>

Stanford. (2022). *Anatomy of the Hand*. <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=anatomyofthehand-85-P04195>

Su, A., & Al'Aref, S. J. (2018). Chapter 1—History of 3D Printing. En *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (pp. 1-10). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8>

Ultimaker. (s. f.). Recuperado 12 de febrero de 2023, de <https://docs.rs-online.com/7ade/0900766b81698006.pdf>

Zancolli, E. A. (2014). *Anatomía quirúrgica de la mano: Atlas ilustrado*. Editorial Médica Panamericana.

ANEXOS