DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA AMPUTACIONES PARCIALES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

EMMANUEL PEREZ NAVALES

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS
MEDELLÍN
2026

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA AMPUTACIONES PARCIALES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

EMMANUEL PEREZ NAVALES

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Sistemas Mecatrónicos

Asesor Técnico
Juan Esteban Moreno Vera
Ingeniero Mecatrónico

Asesor Metodológico
Diego Hernando Orozco Gómez
Magister en Ingeniería – Automatización Industrial

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN SISTEMAS MECATRÓNICOS
MEDELLÍN
2026

Contenido

Pág.

Introducción 10

1. Planteamiento del problema 11

1.1 Descripción 11

1.2 Formulación 11

2. Justificación 12

3. Objetivos 13

3.1 Objetivo general 13

3.2 Objetivos específicos 13

4. Marco teórico 14

4.1 Historia de la prótesis 14

4.2 Amputaciones parciales de mano y dedos 16

4.3 Anatomía y biomecánica básica de la mano y de los dedos 17

4.4 Prótesis parciales de mano y dedos 19

4.5 Impresión 3D aplicada al desarrollo protésico 19

4.6 Design Thinking y enfoque centrado en el usuario 21

5. Metodología 23

5.1 Tipo de proyecto 23

5.2 Método 23

5.3 Instrumentos de recolección de información 24

5.3.1 Fuentes primarias. 24

5.3.2 Fuentes secundarias. 24

6. Resultados del proyecto 25

6.1 Análisis de los requerimientos anatómicos, biomecánicos y funcionales 26

6.2 Bocetos definidos en el diseño del dedo protésico 27

6.3 Prototipo impreso del dedo protésico 28

6.4 Análisis del diseño basado en prótesis tradicionales 29

6.5 Consideraciones preliminares sobre el sistema de accionamiento 30

6.6 Consideraciones generales para la propuesta de una mano protésica 30

7. Conclusiones 32
8. Recomendaciones 33
9. Referencias bibliográficas 34
10. Bibliografía 37

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Ejemplos históricos de prótesis en diferentes etapas de su evolución 14
Figura 2. Ejemplo de prótesis antigua de miembro superior 15
Figura 3. Referentes de prótesis parciales de mano y dedos 17
Figura 4. Representación de movimientos y configuraciones funcionales de la mano 18
Figura 5. Impresión 3D aplicada al desarrollo de una prótesis de mano 20
Figura 6. Bocetos a mano alzada 27
Figura 7. Primer dedo protésico 28
Figura 8. Primera propuesta de mano protésica basada en referencias tradicionales 29
Figura 9. Detalle de la unión por pernos en el dedo protésico 30

Resumen

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE EXTREMIDAD SUPERIOR PARA AMPUTACIONES PARCIALES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

EMMANUEL PEREZ NAVALES

Las amputaciones parciales del miembro superior pueden dificultar bastante los movimientos como agarrar, sostener o manipular objetos, lo que termina afectando muchas actividades del día a día. A partir de esta situación, este trabajo se enfocó en el diseño preliminar de una prótesis orientada a este tipo de amputaciones.

El proceso se desarrolló con base en la metodología Design Thinking y partió del análisis de aspectos anatómicos, biomecánicos y funcionales, además de la revisión de algunas prótesis tradicionales. Desde ahí se tomó el dedo protésico como punto de partida de la propuesta, con el fin de revisar su forma, su articulación y el ensamble entre piezas. Como parte de los resultados, se realizaron bocetos y se analizaron elementos como la unión por pernos y el uso de un canal interno para el paso del tendón.

Durante este proceso se observó que los diseños basados en prótesis tradicionales suelen ser más grandes y robustos, lo que puede dificultar una flexión más completa del dedo y aumentar el consumo de material durante la impresión. En ese sentido, el trabajo permitió dejar una base inicial de diseño que puede servir para futuros ajustes dentro de la propuesta general de una mano protésica.

Palabras claves: amputaciones parciales, dedo protésico, diseño, impresión 3D, mecatrónica, prótesis

Abstract

DESIGN OF AN UPPER LIMB PROSTHESIS FOR PARTIAL AMPUTATIONS USING 3D PRINTING

EMMANUEL PEREZ NAVALES

Partial upper limb amputations can significantly hinder movements such as grasping, holding, or manipulating objects, which ultimately affects many daily activities. Given this situation, this study focused on the preliminary design of a prosthesis tailored to this type of amputation.

The process was developed based on the Design Thinking methodology and began with an analysis of anatomical, biomechanical, and functional aspects, as well as a review of some traditional prostheses. From there, the prosthetic finger was taken as the starting point for the proposal, with the aim of reviewing its shape, articulation, and the assembly of its components. As part of the results, sketches were created, and elements such as bolted joints and the use of an internal channel for tendon passage were analyzed.

During this process, it was observed that designs based on traditional prostheses tend to be larger and more robust, which can hinder full finger flexion and increase material consumption during printing. In this regard, the work established an initial design foundation that can serve as a basis for future adjustments within the overall proposal for a prosthetic hand.

Keywords: 3D printing, design, mechatronics, partial amputations, prosthesis, prosthetic finger

Glosario

Actuador (motor): dispositivo que genera movimiento dentro del sistema, encargado de accionar el tendón para producir la flexión del dedo.

Articulación: unión entre dos piezas que permite el movimiento entre ellas. En este proyecto hace referencia a las uniones entre las falanges del dedo protésico.

Biomecánica: estudio del movimiento del cuerpo humano y las fuerzas que intervienen en él. En este proyecto se usa como referencia para imitar el movimiento del dedo.

Canal interno: espacio diseñado dentro de la pieza que permite el paso del tendón sin interferir con la estructura externa del dedo.

Eje mecánico (perno): elemento cilíndrico que une dos piezas y permite su rotación controlada, funcionando como punto de giro en las articulaciones.

Falange: cada una de las partes que conforman el dedo. Se clasifican en falange proximal (la más cercana a la base de la mano), falange media (ubicada entre la proximal y la distal) y falange distal (la más cercana a la punta del dedo).

Impresión 3D: proceso de fabricación mediante el cual se crean piezas capa por capa a partir de un modelo digital.

PLA: material termoplástico utilizado en impresión 3D, caracterizado por su facilidad de uso y bajo costo.

Tendón (sistema de transmisión): elemento flexible, como un hilo o cable, que permite transmitir el movimiento desde el motor hacia el dedo para generar la flexión.

Tope mecánico: limitación física diseñada para evitar que una articulación se mueva más allá de un rango determinado.

Introducción

Las amputaciones parciales del miembro superior pueden dificultar bastante el uso de la mano, porque afectan movimientos como agarrar, sostener o manipular objetos. Aunque no se pierda toda la extremidad, sí pueden generar limitaciones en muchas actividades diarias. Actualmente, muchas prótesis están pensadas para amputaciones completas o para reemplazos muy específicos. Por eso, los casos de amputación parcial de mano siguen necesitando propuestas que se ajusten mejor a este tipo de condición. A partir de esto, en el presente trabajo se planteó el diseño de una prótesis orientada a amputaciones parciales del miembro superior, tomando como punto de partida el dedo protésico. Para su desarrollo se utilizó la impresión 3D en un dedo.

El trabajo se centró principalmente en revisar aspectos como la forma del dedo, la articulación entre piezas, el ensamble y una idea inicial del sistema de accionamiento. De esta manera, más que llegar a una solución final, el proyecto permitió dejar una base de diseño que puede seguir mejorándose más adelante dentro de la propuesta general de una mano protésica.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

Las amputaciones de las extremidades superiores del cuerpo humano son un procedimiento quirúrgico que se realiza en circunstancias específicas debido entre otras a infecciones, cáncer, traumatismos, progresión de enfermedades o malformaciones congénitas. El grado de amputación puede afectar en gran medida a la funcionalidad de la persona, ya que limita las actividades cotidianas y afecta el proceso de recuperación física, mental y social del paciente (Maduri & Akhondi., 2023).

Según la Organización Mundial de la Salud (2023), aproximadamente 1.300 millones de personas tienen una discapacidad importante, lo que corresponde al 16 % de la población a nivel mundial. Sin embargo, solo 1 de cada 10 personas que necesitan algún producto de asistencia, como prótesis u órtesis, logra acceder a ellos (World Health Organization, 2023).

A pesar de los avances tecnológicos de las prótesis del miembro superior, las soluciones actuales presentan algunas limitaciones, como en primer lugar, las prótesis convencionales están diseñadas para amputaciones completas y no parciales, lo que limita su utilidad significativamente en la población afectada (Zamora Cenarro, 2022/2023).

Además, los altos costos de producción dificultan su acceso, especialmente en países en desarrollo (Pineda Carrero, 2023). Estas limitaciones resaltan la necesidad de investigar nuevas opciones que integren tecnologías como la impresión 3D, que permitan prótesis personalizadas, modulares y menos costosas, que aborden la variedad de amputaciones parciales en las extremidades superiores.

1.2 Formulación

¿Cómo el diseño y desarrollo preliminar de una mano protésica para amputaciones parciales del miembro superior permite analizar el comportamiento mecánico del sistema de articulación y accionamiento de los dedos?

2. Justificación

El proyecto se justifica en la necesidad de explorar una propuesta que responda mejor a los casos de amputación parcial de mano, ya que este tipo de lesión puede afectar de manera importante movimientos básicos como sujetar, manipular o estabilizar objetos. Aunque no se trate de una pérdida completa del miembro superior, la alteración funcional sigue siendo considerable y termina influyendo en la autonomía de la persona durante muchas actividades de la vida diaria.

Otro punto que le da sentido a este trabajo es que muchas de las prótesis que existen están pensadas para amputaciones más amplias o para reemplazos muy específicos, por lo que no siempre se adaptan bien a la variedad de casos que se presentan en una amputación parcial de mano. Por eso, resulta pertinente trabajar en una propuesta preliminar que permita estudiar con más detalle el sistema de articulación y movimiento de los dedos, que es una de las partes más importantes dentro del funcionamiento general de la mano.

A esto se suma que la impresión 3D ofrece una ventaja clara dentro del proceso, porque permite fabricar piezas, probarlas, corregirlas y volver a ajustarlas sin depender desde el inicio de métodos más costosos o difíciles de modificar. Esa posibilidad de ir mejorando el prototipo paso a paso tiene bastante valor en un trabajo académico como este, ya que permite analizar el comportamiento mecánico del sistema mientras el diseño todavía está en desarrollo.

Finalmente, este trabajo también se justifica porque puede servir como base para etapas posteriores. Más que presentar una solución terminada, busca dejar adelantada una propuesta inicial sobre la cual se puedan seguir haciendo mejoras en el diseño, el accionamiento y el funcionamiento general de la mano protésica.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar una propuesta preliminar de mano protésica orientada a amputaciones parciales del miembro superior, aplicando la metodología Design Thinking y tomando como base el diseño, articulación y accionamiento inicial del dedo protésico.

3.2 Objetivos específicos

Analizar los requerimientos anatómicos, biomecánicos y funcionales asociados a la amputación parcial de la mano, necesarios para el diseño de una mano protésica completa.

Aplicar la metodología Design Thinking como apoyo al proceso de diseño del dedo protésico, desde la definición de la propuesta hasta el desarrollo del primer prototipo.

Diseñar el modelo tridimensional (CAD) de la mano protésica completa, considerando la configuración mecánica y los grados de libertad requeridos para el correcto funcionamiento.

Evaluar de manera preliminar el sistema de unión y accionamiento del dedo protésico, considerando el uso de pernos, un canal interno para el paso del tendón.

4. Marco teórico

4.1 Historia de la prótesis

Los historiadores no saben a ciencia cierta cuando se crearon las primeras prótesis, si solo eran estéticas o funcionales. La doctora Katherine Ott, ph.D., conservadora de la división de medicina y ciencia del museo nacional de Historia Americana del Instituto Smithsoniano cree que eso se debe a que diferentes culturas tienen sus propias ideas sobre la integridad de una persona. (magazine.medlineplus, 2023).

Hasta el momento, las primeras prótesis se encontraron en Egipto, ambas son dedos de pies artificiales llamado “el dedo del pie de Greville Chester” fabricado en cartonaje y “el dedo del pie de Chairo” hecha en madera y cuero, ambas tienen aproximadamente entre 2500 y 3000 años.

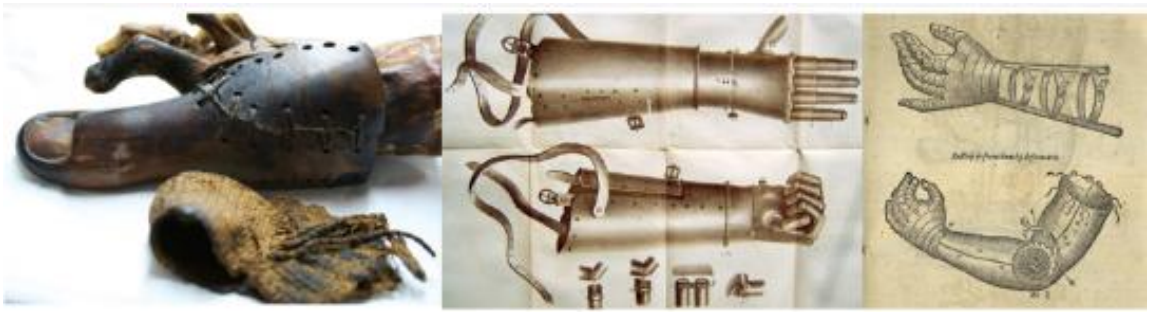


Figura 1. Ejemplos históricos de prótesis en diferentes etapas de su evolución
Fuente: extraído de https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1350

En épocas antiguas las prótesis dependían del estilo de vida, pero solo los caballeros podían costearlas, diseñando prótesis para la sujeción de escudos o encajar estribos en los caballos, aunque tenían muchos propósitos las prótesis seguían siendo simplemente estéticas. Con el pasar de los años en el siglo XIV la creación de las prótesis comenzaron a ser un proceso medico incluyendo en estos mecanismos que ofrecían movilidad y funcionalidad en general (rpsmedical, 2024).

En el siglo XV una de las prótesis más famosas era la mano de hierro del caballero alemán Götz von Berlichingen. Después que perdiera su mano un artesano le desarrollo una mano de hierro con dedos que podían flexionarse y extenderse pasivamente en las articulaciones. Al colocarse la prótesis Götz pudo sostener las riendas, empuñar armas y regresar a la batalla (Zuo & Olson, 2014).

En el siglo XVI el cirujano militar francés Ambroise Paré creo el primer diseño de una mano protésica con resorte que se apoda "Le petit Lorrain" en honor al artesano quien la diseño. A pesar de ser pesadas y requerir un control para manipularla, las primeras prótesis restauraban completamente la capacidad del caballero para sostener un escudo o un arma, pero también estas prótesis se desarrollaron con el fin de que tengan la forma de las manos humanas, en lugar de ser simples estructuras para sostener objetos (Zuo & Olson, 2014).



Figura 2. Ejemplo de prótesis antigua de miembro superior
Fuente: extraído de https://magazine.medlineplus.gov/es/art%C3%ADculo/las-protesis-a-traves-del-tiempo

En el siglo XIX se empieza a emplear el cuero, la madera y algunos polímeros naturales en la elaboración de la prótesis, los resortes también ayudaron a contribuir en el desarrollo de nuevos mecanismos para la elaboración de esta dándole elementos de transmisión de la fuerza para la

sujeción. El alemán Peter Beil creo la prótesis que es controlada por los movimientos del tronco y hombro contra lateral, dando origen a las prótesis autopropulsadas.

En el siglo XX el objetivo se concentró más en las personas amputadas para que regresaran a su vida laboral. En el año 1912 en estados unidos se desarrolló el Hook, que es una unidad terminal que se abre y se cierra con la cintura (Dorado Gonzáles, 2004)

Los avances tecnológicos a lo largo de los siglos han sido fundamentales para mejorar la vida de las personas, desarrollando dispositivos cada vez más funcionales y estéticamente más refinados (Salazar, Portero, Zambrano, & Rosero, 2025). Actualmente, una prótesis no solo busca remplazar una parte del cuerpo si no también imitar lo más posible la movilidad natural.

4.2 Amputaciones parciales de mano y dedos

Las amputaciones parciales de mano y dedos representan una afectación importante dentro del miembro superior, ya que envuelven de manera directa funciones básicas como el agarre, la manipulación de objetos y la ejecución de actividades cotidianas. A diferencia de otras amputaciones más proximales, este tipo de pérdida no siempre implica la ausencia total de la mano, sino la variación parcial de su estructura, lo que hace que las necesidades funcionales del usuario sean más específicas y versátiles.

Dentro de este tipo de amputaciones pueden presentarse pérdidas a nivel de dedos, pulgar o regiones parciales de la mano, lo que influye directamente en la complicación del tratamiento y en la selección de una solución protésica adecuada. En este contexto, las prótesis parciales buscan no solo recuperar parte de la forma anatómica, sino también aportar al restablecimiento de ciertas funciones, especialmente aquellas relacionadas con la presión y la interacción con objetos (Graham, y otros, 2021).

En la actualidad existen diferentes alternativas protésicas para amputaciones parciales de mano y dedos, entre ellas las prótesis pasivas, funcionales, body-powered y externamente accionadas. Sin embargo, la literatura muestra que no todas responden de la misma manera a las

necesidades del usuario, ya que factores como el nivel de amputación, el costo, la comodidad, la personalización y la funcionalidad influyen en su elección y en su uso posterior. (Kim, Powell, Lacey, Butkus, & Smith, 2022)



Figura 3. Referentes de prótesis parciales de mano y dedos
Fuente: extraído de https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11168599/figure/F1/

En este escenario, la impresión 3D ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo de prótesis parciales, debido a que permite fabricar piezas personalizadas, reducir costos y facilitar procesos de iteración durante el diseño. Esto ha hecho que varios desarrollos recientes se orienten a soluciones más accesibles y adaptables, especialmente en casos donde se requiere un enfoque más específico en dedos o segmentos parciales de la mano. (Baschuk, 2023).

4.3 Anatomía y biomecánica básica de la mano y de los dedos

La mano no sirve solo para mover los dedos, sino para hacer muchas acciones del día a día como agarrar, sostener, empujar o manipular objetos. Para que eso pase, no basta con que existan huesos y articulaciones, sino que todas sus partes trabajen juntas de manera coordinada. Por eso,

cuando una parte de la mano se ve afectada, también cambia la forma en que esta responde en actividades cotidianas. En cuanto a su estructura, los dedos están formados por varios segmentos unidos entre sí. En general, cada dedo tiene falange proximal, media y distal, mientras que el pulgar tiene una forma distinta, lo que le da un papel importante al momento de hacer pinza y de apoyarse con los otros dedos.

Desde la parte del movimiento, lo más importante en los dedos es la flexión y la extensión. Gracias a eso, la mano puede adaptarse a diferentes tareas, desde agarrar con fuerza hasta hacer movimientos más finos y precisos. Además, la mano no trabaja como una estructura rígida, sino que va cambiando según el objeto que se quiere sujetar y el tipo de movimiento que se necesita hacer. Tener clara esta parte anatómica y biomecánica es importante para este trabajo, porque ayuda a entender qué cosas deben tenerse en cuenta en el diseño protésico, sobre todo en la articulación entre piezas, el recorrido del movimiento y la forma en que puede generarse la flexión del dedo. (Arias López, 2012)

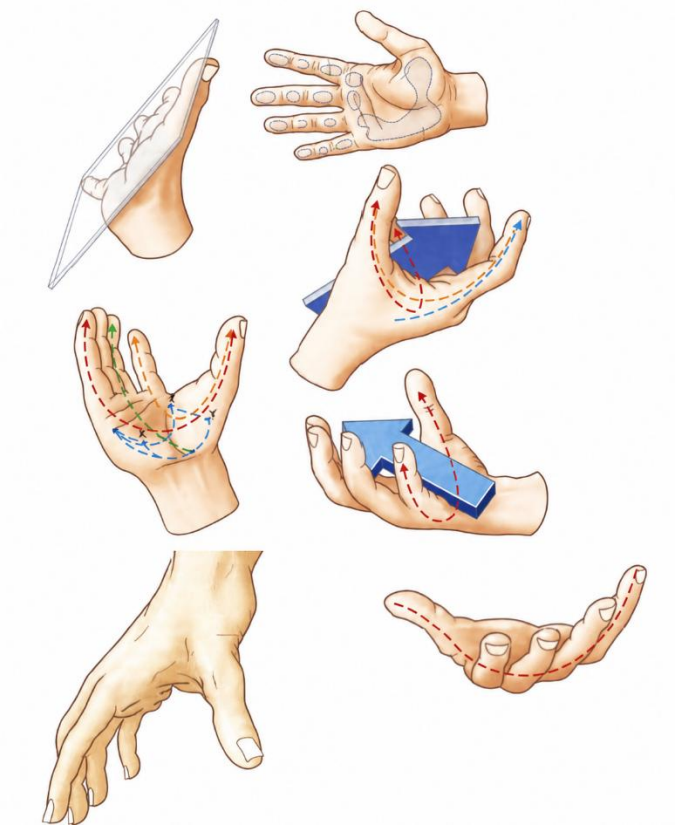


Figura 4. Representación de movimientos y configuraciones funcionales de la mano
Fuente: extraído de https://www.fmed.uba.ar/sites/default/files/2019-08/4-%20MANO_0.pdf

4.4 Prótesis parciales de mano y dedos

Con el tiempo, las prótesis parciales de mano y dedos han ido cambiando. En diseños más antiguos, muchas funcionaban de forma sencilla, aprovechando el movimiento que todavía conservaba la persona para apoyar o sujetar objetos. Aunque eso resolvía algunas tareas básicas, también dejaba varias limitaciones en movimiento y adaptación.

Más adelante empezaron a aparecer propuestas mejor desarrolladas, con mecanismos más compactos y con mayores posibilidades de ajuste. Eso hizo que surgieran soluciones más variadas, pensadas no solo para reemplazar una parte perdida, sino también para recuperar parte de la función de agarre.

Aun así, este campo sigue teniendo varios retos. Todavía hay dificultades relacionadas con el tamaño de los mecanismos, la resistencia de las piezas y el tipo de movimiento que realmente se puede lograr. Por eso, las prótesis parciales de mano y dedos siguen siendo un tema que todavía necesita mejoras.

Al momento de plantear una prótesis parcial de mano o dedos, no solo debe considerarse la parte estructural del dispositivo. También influyen aspectos como el nivel de amputación, el tipo de movimiento que se desea recuperar, el peso del mecanismo, la facilidad de uso y la posibilidad de adaptación a las características del usuario. Esto hace que el diseño de este tipo de prótesis no pueda resolverse de una sola manera, sino que deba ajustarse según la necesidad funcional que se quiera abordar (Difonzo, Zappatore, Mantriota, & Reina, 2020).

4.5 Impresión 3D aplicada al desarrollo protésico

En este tipo de trabajos, la impresión 3D sirve mucho porque permite pasar rápido de la idea a la pieza real. Es decir, primero se diseña en el computador, luego se imprime, se prueba y, si algo falla, se corrige. Eso ayuda bastante cuando todavía se están definiendo cosas como la forma de las falanges, el tamaño de las piezas, el tipo de unión o la manera en que va a pasar el tendón. En prótesis de mano de bajo costo, esta tecnología ha facilitado la fabricación de piezas

personalizadas y también ha permitido sacar varias versiones del mismo diseño hasta llegar a una opción más funcional.

Otra ventaja es que permite fabricar piezas con formas que serían más difíciles de hacer por otros métodos, y además ayuda a que el proceso sea más económico. En prótesis parciales de mano esto es importante, porque no todos los diseños sirven igual y muchas veces toca hacer ajustes según la forma de la mano, el nivel de amputación o el mecanismo que se quiera usar. Por eso, la impresión 3D no solo sirve para fabricar el prototipo, sino también para ir probando cambios sin tener que empezar todo de nuevo.



Figura 5. Impresión 3D aplicada al desarrollo de una prótesis de mano
Fuente: extraído de https://www.podiprint.com/impresion-bajo-demanda/la-impresion-3d-bajo-demanda/

En cuanto a los materiales, el PLA se usa bastante en este tipo de prototipos porque es fácil de imprimir, tiene buena rigidez y se comporta de forma estable durante la fabricación. Por eso suele servir bien en piezas estructurales o funcionales en etapas iniciales del diseño. Por otro lado, materiales como el TPU son útiles cuando se necesitan zonas más flexibles, ya que tienen mayor elasticidad y resistencia al desgarro. Al final, la elección del material depende de la función que va a cumplir cada pieza dentro del prototipo.

Aun así, la impresión 3D no soluciona todo por sí sola. Aunque tiene ventajas claras en personalización, tiempo y costo, también presenta algunas limitaciones, sobre todo en el acabado, la precisión de piezas pequeñas y la resistencia de ciertas partes cuando empiezan a trabajar con movimiento o carga. Por eso, en un proyecto como este, se toma más como una herramienta para construir, probar y corregir el diseño poco a poco, hasta llegar a una versión más funcional del prototipo. (Hincapié Zapata & Bedoya Bedoya, 2023)

4.6 Design Thinking y enfoque centrado en el usuario

En el diseño de una prótesis no basta con que la pieza se vea bien o con que el mecanismo logre moverse. También hace falta pensar en la persona que la va a usar, en lo que necesita recuperar y en la forma en que ese dispositivo puede adaptarse mejor a su situación. Desde esa idea, el Design Thinking se toma como un enfoque que ayuda a orientar el diseño a partir del usuario, pasando por etapas como comprender el problema, definirlo, proponer ideas, construir prototipos y hacer ajustes durante el proceso (Stanford University, 2026).

En las prótesis de miembro superior esto cobra todavía más importancia, porque una amputación no afecta solamente el movimiento. También cambia la manera en que la persona realiza tareas cotidianas, manipula objetos y se adapta a un dispositivo que pasa a formar parte de su día a día. Por eso, al diseñar una prótesis no solo se debe pensar en materiales, articulaciones o mecanismos, sino también en aspectos como la comodidad, la facilidad de uso y la adaptación del usuario al sistema propuesto (Talbot, Carty, Jensen, & Dumanian, 2019).

Además, en varios trabajos recientes este enfoque ha tomado fuerza, sobre todo en proyectos donde el diseño todavía está en desarrollo y necesita pasar por varias pruebas antes de llegar a una versión más funcional. En esos casos, el diseño centrado en el usuario ayuda a que las decisiones no se tomen únicamente desde lo técnico, sino también desde la necesidad que se busca resolver con el prototipo (Fiedler & Samosky, 2023).

En este proyecto, este enfoque resulta útil porque permite entender que el desarrollo de la prótesis no depende solo de resolver una forma o un mecanismo, sino de avanzar hacia una

propuesta que tenga sentido frente a una necesidad funcional real. Por eso, el Design Thinking se asume como una base para orientar el proceso de diseño y justificar los cambios que van apareciendo a medida que el prototipo se va ajustando (Stanford University, 2026).

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto

Este proyecto es de tipo descriptivo y exploratorio. Es descriptivo porque documenta el proceso de diseño y desarrollo preliminar de una mano protésica para amputaciones parciales del miembro superior, detallando la evolución del modelo, sus componentes y las decisiones tomadas durante el prototipado. Al mismo tiempo, es exploratorio porque permite analizar distintas alternativas mecánicas de articulación y accionamiento de los dedos, con el fin de identificar una propuesta funcional que pueda seguir mejorándose en etapas posteriores.

5.2 Método

El método adoptado es de carácter experimental, ya que el desarrollo del proyecto se llevó a cabo mediante un proceso progresivo de análisis, diseño, fabricación y prueba de un prototipo preliminar. Este enfoque permitió observar el comportamiento mecánico del sistema propuesto y realizar ajustes a partir de los resultados obtenidos durante el proceso.

El procedimiento metodológico se desarrolló en las siguientes etapas:

Análisis de requerimientos anatómicos, biomecánicos y funcionales. En esta primera parte se revisó información sobre la mano, los dedos y las amputaciones parciales, con el fin de entender qué movimientos eran los más importantes dentro del diseño. A partir de esto se tomaron como referencia aspectos como la flexión, la extensión, la articulación entre falanges y la forma en que podía transmitirse el movimiento dentro del prototipo.

Diseño preliminar de la propuesta. Después de esa revisión se comenzó a plantear la propuesta por medio de bocetos y primeras ideas de diseño. En esta etapa se exploraron distintas formas de las piezas, tipos de unión entre falanges y posibles maneras de mover el dedo, buscando una opción que fuera funcional y al mismo tiempo posible de fabricar mediante impresión 3D.

Modelado tridimensional y fabricación del prototipo. Una vez definida una primera propuesta, el diseño se llevó al modelado en CAD y luego a la impresión 3D. Esto permitió pasar de la idea inicial a piezas reales, revisar su tamaño, su ensamblaje y la forma en que se comportaban las articulaciones al momento de unirlas.

Pruebas preliminares del sistema mecánico. Con las piezas impresas se realizaron pruebas básicas para observar el funcionamiento del mecanismo. En esta parte se revisó principalmente la apertura y cierre del dedo, el movimiento de las articulaciones y la estabilidad general del sistema durante el montaje.

Ajustes y mejora del diseño. A medida que se hicieron las pruebas fueron apareciendo errores y aspectos por corregir. Por esta razón, el diseño no se mantuvo igual desde el inicio, sino que fue cambiando en varias etapas. Los ajustes se centraron sobre todo en la forma de las falanges, el tipo de articulación y el sistema de transmisión del movimiento.

5.3 Instrumentos de recolección de información

5.3.1 Fuentes primarias. Las fuentes primarias empleadas en el desarrollo del proyecto incluyen, artículos científicos indexados sobre amputación parcial y diseño de prótesis de mano, informes técnicos sobre fabricación aditiva aplicada a dispositivos protésicos, normas técnicas relacionadas con materiales termoplásticos y resistencia mecánica, manuales técnicos del software CAD y de la impresora 3D utilizada.

5.3.2 Fuentes secundarias. Las fuentes secundarias corresponden a documentos de análisis y síntesis tales como: bibliográficas sobre prótesis de miembro superior, publicaciones de organismos internacionales sobre discapacidad y acceso a tecnologías de asistencia, textos académicos de ingeniería biomédica y diseño mecánico. Estas fuentes permitieron contextualizar el problema y fundamentar teóricamente el proyecto.

6. Resultados del proyecto

Para el desarrollo de este proyecto se tomó como base la metodología Design Thinking, ya que permite organizar el proceso de diseño a partir de las necesidades del usuario y no únicamente desde la parte técnica. Esto resultó conveniente, porque el propósito no era solo diseñar una prótesis, sino ir construyendo una propuesta que respondiera de mejor manera a la funcionalidad requerida.

En una primera etapa se buscó comprender el problema, analizando las necesidades funcionales asociadas a las amputaciones parciales del miembro superior. A partir de ello fue posible identificar aspectos importantes relacionados con la forma, el movimiento, la articulación de las piezas y la manera en que la prótesis podía adaptarse a este tipo de condición.

Posteriormente, se definieron los requerimientos principales que debía cumplir el diseño, tanto desde el punto de vista anatómico como biomecánico y funcional. Esto permitió establecer una base clara para orientar el desarrollo del prototipo y tomar decisiones más precisas durante el proceso.

Luego se plantearon diferentes alternativas de solución por medio de bocetos, propuestas de articulación y cambios en la geometría del dedo protésico. Estas ideas se fueron ajustando poco a poco hasta llegar a modelos más viables.

Finalmente, las propuestas se llevaron al modelado tridimensional y a la fabricación del prototipo mediante impresión 3D. A partir de las pruebas realizadas se identificaron errores, limitaciones y oportunidades de mejora, lo que permitió hacer modificaciones en el diseño. De esta manera, el proyecto se desarrolló de forma progresiva, pasando de ideas iniciales a soluciones más funcionales.

6.1 Análisis de los requerimientos anatómicos, biomecánicos y funcionales

Antes de empezar con el diseño del dedo protésico, primero fue necesario mirar qué cosas debía cumplir para que tuviera una forma adecuada y pudiera responder de una manera más funcional. En esta parte se tomaron como referencia aspectos anatómicos, biomecánicos y mecánicos que ayudaron a definir la primera propuesta del prototipo.

Desde lo anatómico, se tomó como base la estructura general del dedo humano, entendiendo que está formado por varios segmentos unidos entre sí. Esto llevó a pensar el diseño como un conjunto de piezas articuladas, donde cada parte cumpliera una función dentro del movimiento total del dedo.

Desde lo biomecánico, se identificó que el movimiento más importante para este caso era la flexión y la extensión. Por eso, desde el inicio se buscó que el dedo pudiera moverse principalmente en un solo eje, evitando desviaciones laterales que afectaran la estabilidad o hicieran más difícil el control del mecanismo.

También se tuvo en cuenta que el sistema debía permitir una futura transmisión del movimiento por medio de un tendón o elemento similar, ya que este tipo de solución se acercaba más a la idea de generar la flexión del dedo de forma mecánica. Aunque en esta primera etapa el accionamiento todavía no estaba completamente desarrollado, sí era importante que el diseño dejara previsto ese comportamiento.

Desde lo funcional, se buscó que el prototipo fuera liviano, fácil de ensamblar y posible de fabricar mediante impresión 3D. Además, era importante que las piezas pudieran modificarse con relativa facilidad, ya que al tratarse de una primera propuesta se esperaba que el diseño necesitara ajustes después de las primeras pruebas.

En conjunto, este análisis permitió definir una base inicial para el desarrollo del dedo protésico y orientar las decisiones tomadas en el primer diseño.

6.2 Bocetos definidos en el diseño del dedo protésico

Como parte inicial del proceso de diseño, se realizaron bocetos a mano alzada del dedo protésico, con el fin de tener una primera idea de cómo podía resolverse su forma general y la unión entre las piezas. Estos dibujos sirvieron como punto de partida para visualizar la estructura del dedo y pensar de manera más clara cómo podía dividirse en varias partes articuladas.

En esta etapa se hicieron propuestas simples de las falanges y de la parte final del dedo, buscando definir una geometría inicial, la ubicación de las articulaciones y la posible manera de ensamblar cada segmento. Más que representar un diseño final, estos bocetos permitieron explorar ideas y comenzar a ordenar la forma en que iba a construirse el prototipo.

Los bocetos también ayudaron a entender mejor qué tan viable podía ser el movimiento entre las piezas y qué aspectos debían tenerse en cuenta antes de pasar al modelado en 3D. A partir de ellos fue posible identificar la necesidad de ubicar mejor los puntos de giro, pensar en el número de segmentos del dedo y reconocer algunas limitaciones que aparecían cuando se tomaban como referencia prótesis más tradicionales.

En ese sentido, esta etapa fue importante porque permitió convertir una idea general en una propuesta inicial más clara, que luego sirvió de base para el modelado y la fabricación del primer prototipo impreso.

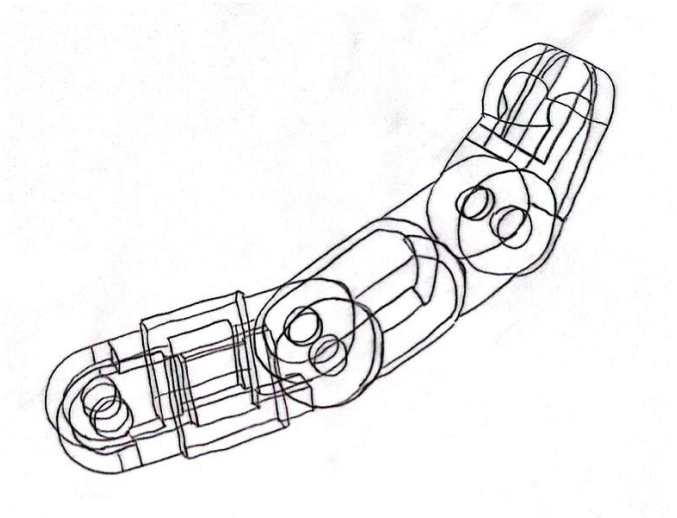


Figura 6. Bocetos a mano alzada
Fuente: diseño propio

6.3 Prototipo impreso del dedo protésico

Después de realizar los bocetos y definir una primera idea del diseño, se llevó el modelo a impresión 3D para obtener un primer prototipo físico del dedo protésico. Esta etapa permitió pasar de la propuesta en papel a una pieza real, con la intención de revisar su forma, su tamaño y la manera en que se unían las partes.

El prototipo estuvo compuesto por varias piezas que representaban los segmentos principales del dedo y que se unían entre sí para permitir movimiento entre una parte y otra. Para esta primera versión se utilizó PLA, ya que es un material fácil de imprimir, económico y apropiado para este tipo de pruebas iniciales.

La impresión del modelo permitió observar de forma más clara cómo se comportaba el diseño fuera del entorno digital. A partir de esta primera pieza fue posible revisar aspectos como las proporciones generales del dedo, el ajuste entre las partes y la viabilidad del ensamble.

Aunque esta versión correspondía a una etapa inicial del proyecto, fue importante porque permitió tener una primera referencia física del prototipo y ayudó a identificar aspectos que debían mejorarse más adelante en el diseño.



Figura 7. Primer dedo protésico
Fuente: diseño propio

6.4 Análisis del diseño basado en prótesis tradicionales

Para esta primera propuesta del dedo protésico se tomaron como referencia algunas prótesis tradicionales, ya que estas ayudaron a entender cómo estaban resueltas la forma general del dedo, la unión entre piezas y la manera en que podía plantearse el movimiento.

Sin embargo, al revisar este tipo de referencia dentro del proyecto, también se vio que presentaba varias limitaciones. Una de las más claras fue que estas prótesis suelen manejar estructuras más grandes y robustas, lo que hace que el sistema sea más rígido y no facilite tan fácilmente un movimiento más amplio o cercano al del dedo humano.

A partir de este análisis se entendió que, aunque ese enfoque servía como punto de partida, no respondía completamente a lo que se buscaba en este trabajo. La rigidez de la estructura y el tamaño de algunas partes hacían más difícil pensar en un movimiento más controlado dentro de un diseño pequeño y adaptable.

Este análisis fue importante porque permitió reconocer que el primer diseño no solo debía verse como una copia de referencias ya existentes, sino como una propuesta que necesitaba ajustarse mejor a las condiciones del proyecto. En ese sentido, el estudio de las prótesis tradicionales sirvió más como base de comparación que como una solución directa para el desarrollo del dedo protésico.

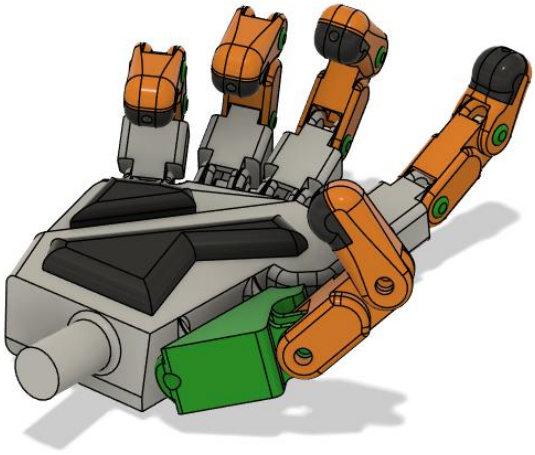


Figura 8. Primera propuesta de mano protésica basada en referencias tradicionales
Fuente: diseño propio

6.5 Consideraciones preliminares sobre el sistema de accionamiento

En este primer prototipo no solo se pensó la forma general del dedo, sino también la manera en que sus piezas podían unirse para permitir movimiento entre una parte y otra. Para resolver esta unión se utilizaron pernos y uniones sencillas, buscando que el ensamble fuera más simple y que al mismo tiempo permitiera la articulación básica entre los segmentos del dedo.

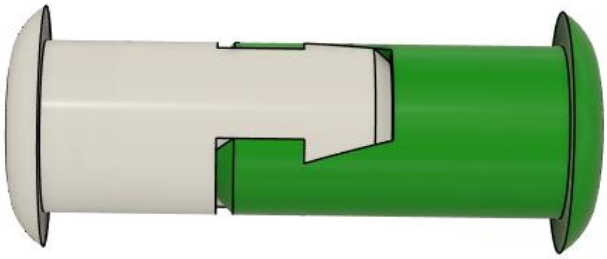


Figura 9. Detalle de la unión por pernos en el dedo protésico
Fuente: diseño propio

Además de la unión entre piezas, en esta etapa también se tuvo en cuenta la posibilidad de incorporar un sistema de flexión por medio de un tendón. Para eso se contempló un canal interno dentro del diseño, con la intención de que el elemento de tracción pudiera atravesar el dedo y generar el movimiento al aplicarse tensión.

Aunque en esta primera fase el sistema de accionamiento todavía no estaba desarrollado por completo ni validado en pruebas de funcionamiento, su planteamiento fue importante porque permitió que el prototipo no se quedara solo en la forma de las piezas, sino que empezara a responder a una lógica básica de movimiento. En ese sentido, esta propuesta sirvió como una base inicial para pensar la flexión del dedo dentro del proyecto.

6.6 Consideraciones generales para la propuesta de una mano protésica

A partir del desarrollo del dedo protésico como módulo base, también fue posible hacer algunas observaciones generales sobre la propuesta de una mano protésica. En esta parte se tuvo en cuenta que el diseño planteado seguía una línea más cercana a prótesis tradicionales, donde las estructuras suelen ser más grandes, robustas y compuestas por varias piezas.

Al revisar este tipo de configuración, se observó que el tamaño general del modelo influía directamente en el movimiento del dedo. Una de las principales limitaciones encontradas fue que, al tratarse de una estructura más grande, la flexión del dedo no se daba de manera completa, lo que afectaba el alcance del movimiento que se buscaba obtener.

Además, el hecho de que el modelo estuviera compuesto por varias piezas también hacía que el sistema fuera más robusto, pero al mismo tiempo más pesado y exigente en términos de fabricación. Esto se reflejaba en un mayor consumo de filamento durante la impresión y en una mayor complejidad al momento de ensamblar las partes.

Estas observaciones permitieron entender que, aunque este tipo de diseño servía como referencia inicial para plantear la mano protésica, también presentaba limitaciones importantes cuando se buscaba una propuesta más compacta, ligera y con mejor respuesta en el movimiento de los dedos. En ese sentido, este análisis fue útil para reconocer que el diseño de la mano no dependía solo de aumentar el tamaño o la robustez de las piezas, sino de encontrar un equilibrio entre estructura, movimiento y fabricación.

7. Conclusiones

El desarrollo del dedo protésico permitió establecer una base inicial de diseño para una propuesta orientada a amputaciones parciales del miembro superior, ya que a partir del análisis anatómico, biomecánico y funcional fue posible definir una primera configuración de piezas articuladas y criterios básicos de movimiento.

La fabricación del primer prototipo mediante impresión 3D fue útil para pasar del diseño a una revisión física del modelo, permitiendo observar proporciones, ensamble entre piezas y viabilidad general de la articulación. Esto confirmó que la impresión 3D fue una herramienta adecuada para desarrollar y revisar propuestas preliminares dentro del proyecto.

El análisis del diseño basado en prótesis tradicionales permitió identificar que este tipo de referencias suele llevar a estructuras más grandes, robustas y rígidas, lo que dificulta un movimiento más amplio del dedo y aumenta el consumo de material durante la fabricación. Este hallazgo fue importante porque mostró que ese enfoque servía como punto de partida, pero no respondía completamente a lo que se buscaba en el proyecto.

La incorporación de uniones por pernos y la consideración de un canal interno para el paso del tendón permitieron plantear una lógica inicial de movimiento dentro del prototipo. Aunque el sistema de accionamiento no se validó completamente en esta etapa, sí quedó definida una base mecánica preliminar para pensar la flexión del dedo.

De manera general, el trabajo permitió avanzar en el diseño preliminar de una propuesta protésica tomando el dedo como módulo base, dejando identificados aspectos de forma, articulación, ensamble y accionamiento que pueden servir para desarrollos posteriores dentro de una propuesta de mano protésica.

8. Recomendaciones

Se recomienda continuar con el desarrollo del diseño buscando una estructura más compacta, ya que durante el proceso se observó que las propuestas basadas en prótesis tradicionales tienden a ser más grandes y robustas, lo que limita la flexión del dedo y aumenta el consumo de material.

También se recomienda seguir trabajando en el sistema de accionamiento, especialmente en el paso del tendón y en la articulación entre piezas, para mejorar la respuesta del mecanismo durante el movimiento.

De igual forma, sería importante seguir explorando materiales y configuraciones de impresión que permitan reducir peso, mejorar la resistencia de las piezas y optimizar el uso de filamento.

Por último, se recomienda que en futuras etapas se continúe con la integración del dedo protésico dentro de una propuesta general de mano, acompañada de pruebas más completas que permitan fortalecer el diseño y mejorar su funcionamiento.

9. Referencias bibliográficas

Arias López, L. (2012). *Biomecanica y patrones funcionales de la mano.* Bogota: ProQuest. Recuperado el 06 de 05 de 2026, de https://www.proquest.com/openview/a223f72367fe6e5f8c517c4a7f0f6d36/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2035722

Baschuk, C. (22 de 12 de 2023). *National Library Medicine*. Recuperado el 05 de 05 de 2026, de PMC: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11168599/

Difonzo, E., Zappatore, G., Mantriota, G., & Reina, G. (2020). *Advances in Finger and Partial Hand Prosthetic Mechanisms.* Italia: MDPI. Recuperado el 06 de 05 de 2026, de https://www.mdpi.com/2218-6581/9/4/80

Dorado Gonzáles, J. (2004). *ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES.* revista.unam.mx. Recuperado el 25 de septiembre de 2025, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/7570483/art01_enero-libre.pdf?1390852280=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DROBOTICA_Y_PROTESIS_INTELIGENTES.pdf&Expires=1758215055&Signature=D1U~hUoV5xt9bK8ngJx0TSBEkZUHVI7DZLtdXduf9pXQA21cWxmfH3foB74

Fiedler, G., & Samosky, J. (22 de 12 de 2023). *National Library of Medicine*. Recuperado el 04 de 05 de 2026, de National Library of Medicine: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11168598/

Góngora Rodríguez, E., Guirao Cano, L., & Samitier, B. (2022). *Actualización en prótesis para amputaciones parciales de mano y dedos.* Recuperado el 14 de 04 de 2026, de https://www.researchgate.net/publication/360924144_Actualizacion_en_protesis_para_amputaciones_parciales_de_mano_y_dedos

Graham, E. M., Hendrycks, R., Baschuk, C. M., Atkins, D. J., Keizer, L., Duncan, C. C., & Mendenhall, S. D. (02 de 2021). *National Library of Medicine*. Recuperado el 05 de 05 de 2026, de Pub Med: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33198915/

Hincapié Zapata, E., & Bedoya Bedoya, J. E. (2023). *Diseño de prótesis cinética de bajo costo y mediante fabricación en impresión 3D, para persona de la ciudad de medellín, con amputación congénita de mano.* ITM, Antioquia, Medellin. Recuperado el 14 de Octubre de 2025, de https://repositorio.itm.edu.co/server/api/core/bitstreams/9e2593f9-b3b0-42e2-a06f-527b69ba4c46/content

hta3d. (2021). *hta3d*. Recuperado el 11 de 10 de 2025, de hta3d: https://www.hta3d.com/es/blog/Como-Conectar-RAMPS1.4

Kim, G. M., Powell, J. E., Lacey, S. A., Butkus, J., & Smith, D. G. (22 de 02 de 2022). *National Library of Medicine*. Recuperado el 05 de 05 de 2026, de Pub Med: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35038226/

Maduri, P., & Akhondi., H. (08 de Agosto de 2023). *Upper Limb Amputation.* Recuperado el 02 de Septiembre de 2025, de National Library of Medicine: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK540962/

magazine.medlineplus. (11 de Mayo de 2023). Recuperado el 18 de septiembre de 2025, de NIHMedlineplus: https://magazine.medlineplus.gov/es/art%C3%ADculo/las-protesis-a-traves-del-tiempo

monolithicpower. (22 de 06 de 2023). *MPS*. Recuperado el 12 de 11 de 2025, de MPS: https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses

Pineda Carrero, C. A. (2023). *Prótesis robóticas de extremidades superiores elaboradas con impresión 3D.* Caracas: ResearchGate. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/372389084_Protesis_roboticas_de_extremidades_superiores_elaboradas_con_impresion_3D

Pololu Robotics & Electronics. (2024). *Pololu Robotics & Electronics*. Recuperado el 09 de 05 de 2025, de Pololu Robotics & Electronics: https://www.pololu.com/product/998

Rodríguez, G., Cano, G., & Samitier, P. (2022). *Actualización en prótesis para amputaciones parciales de mano y dedosUpdate on prosthesis for partial hand and finger amputations.* Sermef. Recuperado el 06 de 05 de 2026, de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048712022000408

rpsmedical. (01 de Febrero de 2024). Recuperado el 18 de Septiembre de 2025, de rpsmedical: https://www.rpsmedical.com/la-historia-de-las-protesis/

Salazar, M., Portero, P., Zambrano, M., & Rosero, R. (2025). *Revisión de prótesis robóticas fabricadas con impresión 3D: avances, desafíos y perspectivas futuras.* Ecuador: Applied sciences. Recuperado el 04 de 10 de 2025, de https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1350

Stanford University. (2026). *Stanford d.school*. Recuperado el 05 de 04 de 2026, de Stanford d.school: https://dschool.stanford.edu/tools/design-thinking-bootleg

World Health Organization. (07 de Marzo de 2023). Recuperado el 20 de Agosto de 2025, de https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health

Zamora Cenarro, A. (2022/2023). *Diseño de una prótesis funcional de extremidad superior.* Valencia. Recuperado el 06 de 08 de 2025, de https://riunet.upv.es/entities/publication/acab5091-675c-4edd-a3d4-1268598d2df8

Zuo, K., & Olson, J. (2014). *La evolución del reemplazo funcional de mano: de las prótesis de hierro al trasplante de mano.* PMC PubMen Central. Obtenido de https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4128433/

10. Bibliografía

cadavshmeip. (28 de 11 de 2024). *cadavshmeip*. Recuperado el 25 de 09 de 2025, de cadavshmeip: https://www.cadavshmeip.com/blog/art-1/impresora-3d-como-funciona-385

enablingthefuture. (s.f.). Recuperado el 16 de septiembre de 2025, de https://enablingthefuture.org/

Luis Llamas. (2019). *Luis Llamas*. Recuperado el 11 de 10 de 2025, de Luis Llamas: https://www.luisllamas.es/como-funciona-una-impresora-3d-fff/

Markforged. (2025). *Markforged*. Recuperado el 23 de Octubre de 2025, de Markforged: https://markforged.com/es/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-

monolithicpower. (22 de 06 de 2023). *MPS*. Recuperado el 12 de 11 de 2025, de MPS: https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/stepper-motors-basics-types-uses

Serrano, C. (30 de Octubre de 2023). *KenHub*. Recuperado el 24 de Octubre de 2025, de https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/anatomia-de-la-extremidad-superior

SICNOVA. (9 de Enero de 2024). *SICNOVA3D*. Recuperado el 21 de Octubre de 2025, de https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/resinas-impresoras-3d/

sugraher. (8 de 08 de 2024). *sugraher*. Recuperado el 12 de 11 de 2025, de sugraher: https://sugraher.es/blog/impresion-3d/partes-de-una-impresora-3d/

Tamayo, M. (2016). *Universidad CLEA.* Obtenido de https://clea.edu.mx/biblioteca/Tamayo%20Mario%20-%20El%20Proceso%20De%20La%20Investigacion%20Cientifica.pdf

Vaskovic, J. (03 de Noveimbre de 2023). *KenHub*. Recuperado el 27 de Octubre de 2025, de https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/mano-y-muneca