



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Diseño y fabricación de una prótesis de antebrazo mediante tecnologías de impresión aditiva

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Autor:** Juan Jesús Díaz Paredes  
**Director:** Rosendo Zamora Pedreño  
**Codirector:** Óscar de Francisco Ortiz

Cartagena, 29 de septiembre de 2020



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



# Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado titulado *“Diseño y fabricación de una prótesis de antebrazo mediante tecnologías de impresión aditiva”* tiene como finalidad la creación de una prótesis funcional del conjunto de mano y antebrazo mediante el uso de tecnología de impresión 3D. El objetivo principal seguido durante todo el proyecto es que el producto final pueda llegar al máximo número de personas y, por consiguiente, se busca que la fabricación de la prótesis conlleve el menor coste posible y pueda ser fabricada por cualquier persona con un mínimo de conocimientos técnicos y recursos.

Para la realización del proyecto, y una vez establecidos los requisitos que ha de cumplir la prótesis, se ha escogido un modelo 3D existente que se adaptase a las necesidades del proyecto, se han detectado sus limitaciones y se ha rediseñado en consecuencia con el uso de software de modelado 3D como SolidWorks y Blender. Una vez cerrado el diseño se ha procedido a la fabricación de la prótesis, donde se incluye la impresión 3D de las piezas, el montaje y los ajustes pertinentes.

Por último, se ha verificado el correcto funcionamiento de la prótesis y el cumplimiento de los objetivos marcados inicialmente, detallando tanto las ventajas como las desventajas que presenta la prótesis diseñada y enumerando una serie de propuestas para una posible continuación del proyecto.



# Abstract

The present Final Degree Project titled "*Diseño y fabricación de una prótesis de antebrazo mediante tecnologías de impresión aditiva*" – "*Design and manufacture of a forearm prosthesis using additive printing technologies*" – aims to create a functional prosthesis of the hand and forearm assembly through the use of 3D printing technology. The main objective followed throughout the project is that the final product can reach the maximum number of people and therefore it is key that the manufacture of the prosthesis entails the lowest possible cost and the possibility of being manufactured by anyone with a minimum of technical knowledge and resources.

To carry out the project, and once the requirements that the prosthesis must meet have been established, an existing 3D model has been chosen that adapts to the needs of the project, its limitations have been detected and it has been redesigned accordingly with the use of 3D modeling software like SolidWorks and Blender. Once the design was finished, the prosthesis has been manufactured, which includes the 3D printing, the assembling, and the pertinent adjustments.

Finally, the correct functioning of the prosthesis and the fulfillment of the initially set objectives have been verified, detailing both the advantages and disadvantages of the designed prosthesis, and listing a series of proposals for a possible continuation of the project.



*Este trabajo va dedicado a todos aquellos que me han acompañado y mostrado su apoyo durante este duro camino, a mis padres, a mis hermanos y amigos.*

*A Pedro y a Álvaro, porque se me hace imposible imaginarme esta aventura sin ellos y, aunque muchas veces nos pareció interminable, ha llegado a su fin.*

*A todos, Gracias.*





# Contenido

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Estudio del arte.....	2
1.2.1. Prótesis.....	2
1.2.2. Tecnologías de fabricación de prótesis.....	6
1.2.3. Breve historia de la impresión 3D.....	7
1.2.4. Estado actual de la impresión 3D .....	10
1.2.4.1. Métodos de impresión 3D .....	11
1.2.5. Selección del método de impresión 3D.....	24
1.3. Contextualización .....	27
1.3.1. Impresión 3D en la medicina.....	27
1.3.2. ¿Por qué una prótesis impresa en 3D?.....	30
1.4. Estudio de modelos.....	32
1.4.1. Selección del tipo de prótesis .....	32
1.4.2. Justificación del modelo escogido .....	37
<b>Capítulo 2. Diseño .....</b>	<b>41</b>
2.1. Estudio del modelo.....	41
2.1.1. Diferenciación de las piezas .....	44
2.1.2. Limitaciones del modelo.....	47
2.1.3. Mejoras propuestas .....	49
2.2. Diseño de las mejoras .....	53
2.2.1. Definición de tolerancias .....	53
2.2.2. Giro de la prótesis.....	56

2.2.3. Modificación del tensor.....	57
2.2.4. Fijación del tensor .....	60
2.3. Adaptación de las piezas para su impresión 3D .....	62
<b>Capítulo 3. Fabricación del Prototipo .....</b>	<b>65</b>
3.1. Fabricación .....	65
3.1.1. Comprobación de las partes críticas .....	65
3.1.2. Cambios en el diseño .....	71
3.1.3. Impresión 3D .....	72
3.1.4. Montaje.....	77
3.1.5. Ajustes.....	83
3.2. Análisis del resultado final.....	85
<b>Capítulo 4. Conclusiones.....</b>	<b>89</b>
<b>Apéndice A. Presupuesto.....</b>	<b>91</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>95</b>

# Índice de Figuras

Figura 1.1 Prótesis para el dedo amputado de una momia egipcia.....	2
Figura 1.2 Clasificación de las prótesis.....	4
Figura 1.3 Prótesis estéticas.....	4
Figura 1.4 Diferentes elementos que constituyen una prótesis mecánica.....	5
Figura 1.5 Diferentes partes de una prótesis Mioeléctrica.....	6
Figura 1.6 Impresora RepRap (Versión 2.0 Mendel).....	9
Figura 1.7 Fundadores de Makerbot posando junto al prototipo final de la impresora Makerbot Cupcake .....	9
Figura 1.8 Evolución de los términos de búsqueda "3D Printing" (Azul) y "Additive Manufacturing" (Rojo) desde 2004.....	10
Figura 1.9 Esquema del funcionamiento del proceso de estereolitografía .....	12
Figura 1.10 Esquema del funcionamiento de deposición de material fundido .....	14
Figura 1.11 Diagrama de la técnica de fusión de lecho de polvo .....	16
Figura 1.12 Diagrama de la técnica de laminación de capas.....	19
Figura 1.13 Diagrama de la técnica Binder Jetting.....	20
Figura 1.14 Diagrama de la técnica Material Jetting.....	22
Figura 1.15 Diagrama de la técnica Directed Energy Deposition .....	23
Figura 1.16 Audífono impreso en 3D.....	28
Figura 1.17 Estetoscopio impreso en 3D .....	29
Figura 1.18 Brazo robótico del proyecto Robotic Arm 3D Printed.....	33
Figura 1.19 Modelo de la prótesis mioeléctrica realizada por Mahdi Elsayed Hussein.....	34
Figura 1.20 Prótesis mioeléctrica de Open Bionics.....	35

Figura 1.21 Modelo de la prótesis Talon Hand de E-Nable .....	36
Figura 1.22 Modelo de prótesis de Field Ready.....	37
Figura 2.1 Prótesis escogida de E-Nable: The Raptor Reloaded .....	41
Figura 2.2 Cables para la retracción de los dedos .....	42
Figura 2.3 Cables elásticos para la extensión de los dedos .....	42
Figura 2.4 Velcros para la sujeción de la prótesis.....	42
Figura 2.5 Foto detalle del tensor .....	43
Figura 2.6 Denominación del giro según el eje de rotación .....	44
Figura 2.7 Explosionado de la prótesis con numeración de las piezas .....	46
Figura 2.8 Ejemplo del comportamiento del tensor original frente a un objeto regular .....	48
Figura 2.9 Ejemplo del comportamiento del tensor original accionado frente a un objeto regular .....	48
Figura 2.10 Ejemplo del comportamiento del tensor original frente a un objeto irregular .....	49
Figura 2.11 Ejemplo del comportamiento del tensor original accionado frente a un objeto irregular .....	49
Figura 2.12 Propuesta para añadir el movimiento de cabeceo .....	50
Figura 2.13 Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto irregular lineal .....	51
Figura 2.14 Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto irregular lineal .....	51
Figura 2.15 Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto totalmente irregular.....	51
Figura 2.16 Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto totalmente irregular.....	51
Figura 2.17 Ejemplo del comportamiento de la solución propuesta frente a un objeto totalmente irregular .....	52

Figura 2.18 Impresora 3D utilizada (Anet A8).....	53
Figura 2.19 Parámetros de impresión para el test de tolerancias .....	54
Figura 2.20 Test de tolerancia .....	55
Figura 2.21 Representación esquemática de las tolerancias.....	55
Figura 2.22 Diseño de la propuesta para el giro de la prótesis .....	57
Figura 2.23 Diseño de la propuesta para el tensor .....	58
Figura 2.24 Vista explosionada del tensor .....	59
Figura 2.25 Ilustración del movimiento de giro 1 .....	60
Figura 2.26 Ilustración del movimiento de giro 2 .....	60
Figura 2.27 Diseño de la fijación del tensor 1.....	60
Figura 2.28 Diseño de la fijación del tensor 2.....	60
Figura 2.29 Diferentes tipos de estructuras que requieren soporte.....	62
Figura 2.30 Comparativa de la impresión de una T con soporte y sin él .....	63
Figura 2.31 Principales tipos de soportes .....	63
Figura 3.1 Unión entre las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet.....	66
Figura 3.2 Parámetros de impresión para las comprobaciones de las partes críticas .....	67
Figura 3.3 Piezas impresas para la comprobación de la unión de las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 1 .....	68
Figura 3.4 Piezas impresas para la comprobación de la unión de las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 2 .....	68
Figura 3.5 Rotura de las piezas de la unión entre Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 1 .....	68
Figura 3.6 Rotura de las piezas de la unión entre Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 2 .....	68
Figura 3.7 Zona crítica en la pieza Rotating Gauntlet .....	69

Figura 3.8 Pieza Rotating Gauntlet impresa con soportes .....	70
Figura 3.9 Dirección de las fuerzas que causaron la rotura de la pieza Rotating Gauntlet .....	70
Figura 3.10 Rotura de la pieza Rotating Gauntlet.....	71
Figura 3.11 Detalle de la zona del tensor tras eliminar los soportes.....	71
Figura 3.12 Nueva unión entre las piezas Rotating Gauntlet y Fixed Gauntlet .....	72
Figura 3.13 Nueva unión entre las piezas Rotating Gauntlet y Fixed Gauntlet explosionada.....	72
Figura 3.14 Parámetros de impresión utilizados para la prótesis .....	74
Figura 3.15 Pieza Palm impresa con soporte.....	75
Figura 3.16 Pieza Palm impresa después de quitar el soporte .....	75
Figura 3.17 Pieza Rotating Gauntlet impresa con soporte .....	75
Figura 3.18 Pieza Fixed Gauntlet impresa con soporte.....	76
Figura 3.19 Conjunto del tensor impreso.....	76
Figura 3.20 Pieza mal impresa del tensor 1 .....	77
Figura 3.21 Pieza mal impresa del tensor 2 .....	77
Figura 3.22 Conjunto de piezas que forman los dedos impresas .....	77
Figura 3.23 Montaje de las piezas Rotating y Fixed Gauntlet con la pieza Palm ....	78
Figura 3.24 Montaje del resto de piezas de la prótesis .....	79
Figura 3.25 Elásticos y cables usados para la prótesis (cable elástico a la izquierda y cable tensor a la derecha) .....	79
Figura 3.26 Montaje de los cables tensores 1 .....	80
Figura 3.27 Montaje de los cables tensores 2.....	80
Figura 3.28 Fisherman's knot .....	81
Figura 3.29 Indicación del lugar en el que se anudan los cables elásticos .....	82

Figura 3.30 Cambio de cables tensores .....	83
Figura 3.31 Tornillos tensores .....	84
Figura 3.32 Prótesis con los cables tensados.....	84
Figura 3.33 Demostración del agarre de objetos irregulares.....	86
Figura 3.34 Demostración del agarre en un objeto cilíndrico.....	87





# Índice de Tablas

Tabla 1.1 Propiedades de la técnica de polimeración VAT.....	13
Tabla 1.2 Propiedades de la técnica de deposición de material fundido .....	15
Tabla 1.3 Propiedades de la técnica Laser Melting.....	17
Tabla 1.4 Propiedades de la técnica Electron Beam Melting.....	18
Tabla 1.5 Propiedades de la técnica Sheet lamination .....	19
Tabla 1.6 Propiedades de la técnica Binder Jetting.....	21
Tabla 1.7 Propiedades de la técnica Material Jetting .....	23
Tabla 1.8 Propiedades de la técnica Directed Energy Deposition.....	24
Tabla 1.9 Comparación de características de las diferentes prótesis.....	39
Tabla 2.1 Listado de piezas del modelo original .....	45
Tabla 2.2 Tolerancias escogidas para la fase de diseño .....	56
Tabla 3.1 Listado de piezas del modelo final .....	73
Tabla A.1 Coste calculado para la impresión en 3D de la prótesis.....	91
Tabla A.2 Coste total de los materiales.....	92



# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

El trabajo a presentar cuyo título es “Diseño y fabricación de una prótesis de antebrazo mediante tecnologías de impresión aditiva”, tiene como intención final la creación de una prótesis funcional del conjunto de mano y antebrazo mediante el uso de la tecnología de impresión en 3D. Con el fin de abordar con éxito este proyecto, se han establecido dos fases o etapas.

Por un lado, el estudio del arte y búsqueda de los diferentes modelos que existen en la actualidad, centrándose especialmente en las prótesis accionadas mecánicamente. Y, tras la elección del modelo, el diseño de la nueva prótesis mejorada con la ayuda de software de modelado en 3D como SolidWorks o Blender.

Por otro lado, la detección de las partes más críticas del modelo para su estudio con el fin de detectar posibles fallos antes de comenzar la fabricación. Y, por último, la fabricación de la prótesis impresa en 3D, donde se incluye el montaje y los ajustes pertinentes.

Además, durante todo el proyecto se tiene como objetivo principal el diseño de una prótesis de mano y antebrazo que pueda llegar al máximo número de personas, por tanto, se busca que la prótesis diseñada sea de bajo coste en relación con las alternativas convencionales y pueda ser fabricada por cualquier persona con el mínimo conocimiento técnico y recursos posibles.

## 1.2. Estudio del arte

### 1.2.1. Prótesis

El principal objetivo de una prótesis es reemplazar, con la mayor exactitud posible, la capacidad funcional y/o estética de un miembro del cuerpo debido a su ausencia por diversos motivos. Puesto que uno de los bienes más preciados de cualquier persona es, sin ningún lugar a dudas, su propio cuerpo, no es de extrañar que el uso de prótesis artificiales creadas por el propio ser humano se remonte incluso al Antiguo Egipto, donde las amputaciones eran incluso más temidas que la propia muerte. Uno de los casos más tempranos que se conocen data del siglo XV a. C. en la decimoctava dinastía del Antiguo Egipto, donde se utilizó una prótesis fabricada de madera y cuero como sustituto tras la amputación del hallux (Figura 1.1) [1].

Junto a Egipto, las otras dos grandes civilizaciones occidentales de Grecia y Roma desarrollaron las primeras prótesis para ayudar a la rehabilitación de personas discapacitadas, introduciendo un enfoque científico hacia la ciencia protésica.



**Figura 1.1** Prótesis para el dedo amputado de una momia egipcia. Museo Egipcio del Cairo [2]

En la Edad Media se crearon prótesis para las amputaciones causadas por la guerra y con la llegada del Renacimiento aumentó el desarrollo científico, aunque no había muchas alternativas protésicas, ya que las prótesis consistían en ganchos para las manos y patas de palo. Solo los más adinerados podían permitirse el lujo de hacerse

una prótesis, los caballeros usaban prótesis hechas por sus herreros para llevar en la batalla y aunque eran bastante avanzadas, eran demasiado pesadas para el día a día, por lo que limitaban su uso a las batallas.

A final del siglo XVIII, la invención del torniquete, la anestesia y las medicinas para combatir las enfermedades ayudaron a llevar a la medicina a la era moderna, haciendo la amputación una medida curativa en lugar de una última opción para salvar la vida.

Con el número creciente de amputados y una mayor conciencia, el desarrollo de prótesis para las masas se disparó y, aunque aún no eran cómodas de usar, el usuario ganaba una valiosa independencia gracias a dicho dispositivo.

Desde entonces y gracias a los avances tecnológicos se ha mejorado inmensamente en el mundo de las prótesis. Los nuevos materiales de los que disponemos como, por ejemplo, fibra de carbono, titanio, aluminio o diferentes polímeros, hacen posible la fabricación de resistentes y ligeras prótesis [3].

Un miembro protésico consiste principalmente en tres componentes: el primero, llamado *socket*, hace de unión entre el miembro y la prótesis logrando la suspensión de éste; el intermedio hace de extensión, dota de la longitud necesaria que tendría el miembro ausente y puede incorporar también una articulación simulando la rodilla o codo si fuese necesario y, por último, un dispositivo terminal (una mano, gancho o pie artificial) [3].

Los tipos de prótesis se pueden categorizar de diferentes maneras, aunque normalmente, y centrándonos en prótesis del miembro superior, se agrupan en dos categorías principales dependiendo de si poseen movimiento o no: activas o pasivas. Y dentro de las prótesis activas, podemos catalogarlas en función del sistema que origina este movimiento [4], [5].

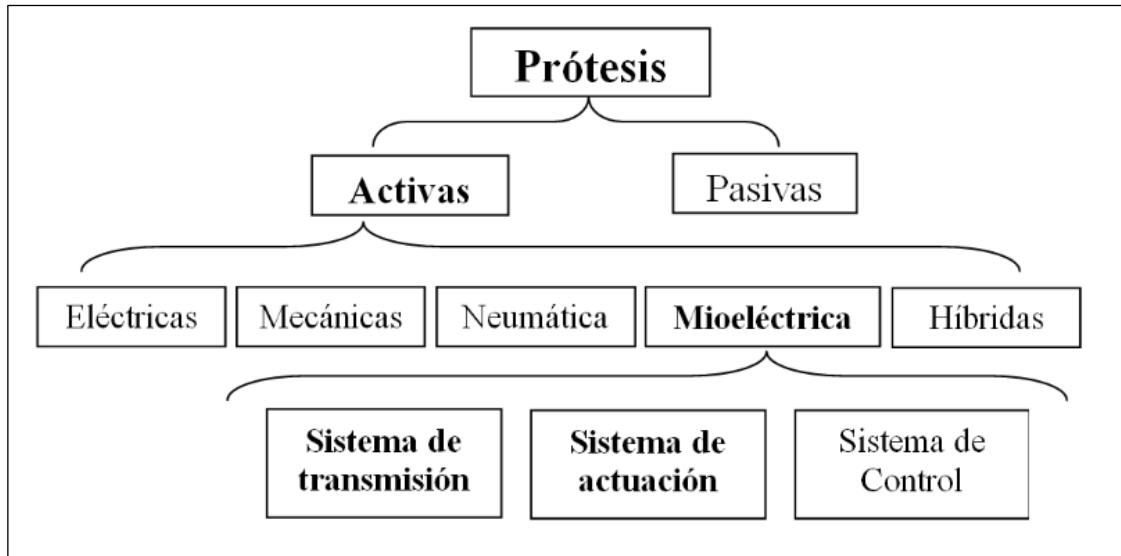


Figura 1.2 Clasificación de las prótesis [5]

### Prótesis pasivas o estéticas

Son el modelo más simple, carecen de movimiento y tienen una función exclusivamente estética [5].

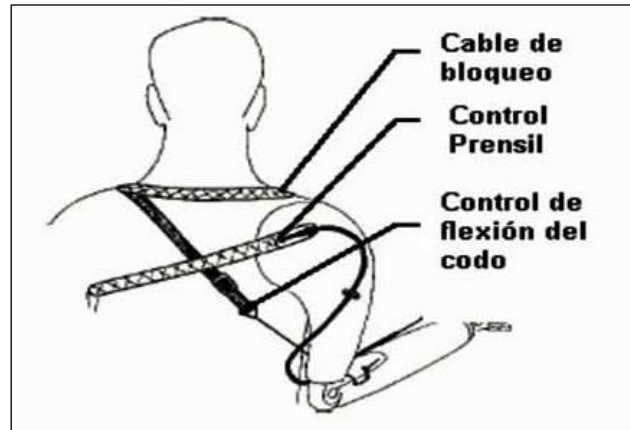


Figura 1.3 Prótesis estéticas [6]

### Prótesis mecánicas

Son accionadas mediante la fuerza producida por algún movimiento corporal. Generalmente son mecanismos simples como, por ejemplo, un gancho que está conectado al movimiento del codo o antebrazo mediante un arnés. Aunque son

relativamente simples y solo pueden ser utilizados para sujetar objetos relativamente redondos y grandes debido a la poca presión del mecanismo, siguen siendo la opción más popular [4], [7].



**Figura 1.4** Diferentes elementos que constituyen una prótesis mecánica [8]

### **Prótesis eléctricas**

Son accionadas por motores eléctricos colocados en el dispositivo terminal, muñeca o codo junto a una batería recargable para alimentarlos. Estos motores se pueden controlar de varias formas como por ejemplo un servocontrol, un botón pulsador o un botón con interruptor de arnés. En general es una opción más costosa y requiere un gran mantenimiento. Otras notables desventajas son su gran peso y el cuidado a la exposición en medios húmedos [4], [5], [7].

### **Prótesis neumáticas**

Son accionadas por ácido carbónico comprimido. Pese a que proporciona una gran cantidad de energía, su desarrollo fue detenido debido al riesgo del uso del ácido carbónico y la alta complejidad de sus accesorios [4], [7].

## Prótesis mioeléctricas

El movimiento es controlado por una señal eléctrica (EMG) que se genera al contraer un músculo. Estas señales son captadas mediante electrodos colocados en la superficie de la piel, amplificadas y enviadas a un microcontrolador que interpreta esta información y acciona los diferentes actuadores en consecuencia [5], [7].

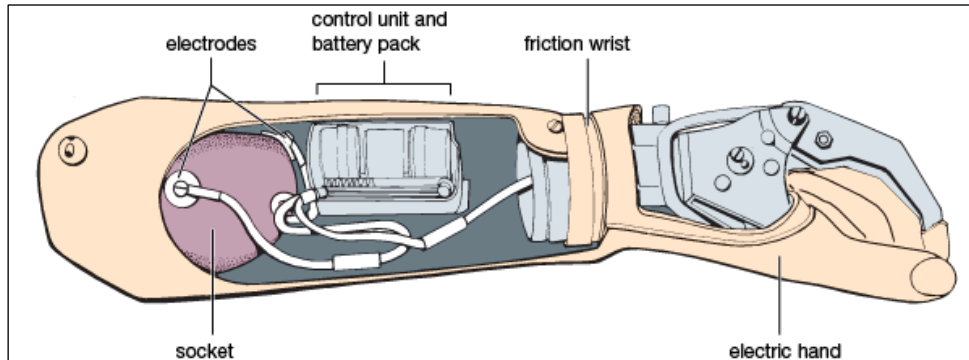


Figura 1.5 Diferentes partes de una prótesis Mioeléctrica [9]

## Prótesis híbridas

Combinan el accionamiento debido al movimiento del cuerpo con el accionado por electricidad. Es el concepto más utilizado en las amputaciones transmurales (amputación por encima del codo), donde el codo es accionado mediante el movimiento del cuerpo mientras que el dispositivo terminal (gancho o mano) es de accionamiento mioeléctrico [7].

### 1.2.2. Tecnologías de fabricación de prótesis

Las prótesis médicas tienen diferentes funciones y aplicaciones, y como detallan en el artículo *Manufacturing Methods for Medical Prostheses* [10], el método de fabricación de la prótesis dependerá en gran medida del material, diseño y propiedades mecánicas de la prótesis. Los métodos convencionales de fabricación que más se han utilizado en la elaboración de prótesis han sido mecanizado (machining), conformado incremental (Incremental Sheet Forming (ISF)) y fundición a la cera perdida (Investment Casting).



La combinación de herramientas de control numérico y fabricación aditiva han ayudado a mejorar la eficiencia en la fabricación, sin embargo, la producción por fabricación aditiva directa ha conseguido reemplazar el método convencional con una mejor eficiencia del proceso y una mayor precisión para el producto final.

A pesar de las mejoras en la tecnología de fabricación convencional, mejorando mediante el uso de software asistido por ordenador, la tecnología de fabricación aditiva parece ponerse en cabeza en cuanto a implantes médicos se refiere. Los métodos más convencionales, consistentes en la eliminación de material, han ido perdiendo importancia debido al desperdicio de material y su mayor tiempo de operación. Además, los implantes que necesitan de una precisión o dificultad geométrica son más fáciles de elaborar mediante fabricación aditiva.

Los equipos necesarios para la fabricación aditiva se han abaratado notablemente en las últimas décadas, pero siguen siendo costosos, aunque esto es algo subjetivo ya que está estrechamente relacionado con la selección de materiales y el volumen de producción, esto indica que la tecnología avanzada de este método también será más asequible en un futuro.

### 1.2.3. Breve historia de la impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología de fabricación aditiva donde un modelo tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material y, como podemos leer en el trabajo de Mariano Bucco sobre la impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos [11], los equipos y materiales que llevan a los principios de este tipo de fabricación se desarrollaron en la década de 1980.

En 1981, Hideo Kodama, investigador del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya (Japón) fue la primera persona en publicar un artículo de un modelo sólido fabricado usando un sistema de prototipado rápido de fotopolímero. Más tarde, el 16 de julio de 1984, Alain Le Méhauté, Olivier de Witte y Jean Claude André presentaron una patente para el proceso de estereolitografía, una técnica que

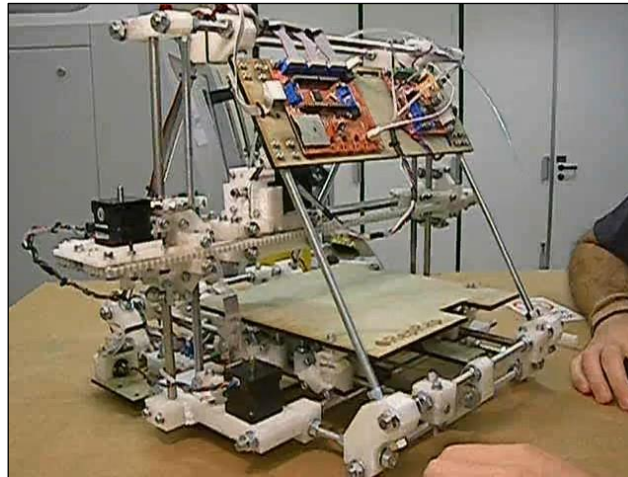
consigue piezas de resina epoxi de buena tolerancia dimensional y propiedades mecánicas aceptables.

Más tarde, Charles Hull presenta su propia patente para estereolitografía donde, utilizando un láser ultravioleta, solidifica una fina capa de resina acrílica. Crea 3DSystems, empresa líder en el mercado que permitió la utilización de este proceso a nivel industrial.

Unos años después, entre 1989 y 1990, S. Scott Crump, fundador de Stratasys, desarrolla la técnica conocida como Fused Deposition Modeling (FDM), consistente en la fabricación mediante la superposición de capas de material fundido que posteriormente solidifica con la forma deseada. Este método permitió una mayor difusión del mundo de la impresión en 3D debido al fácil acceso a esta tecnología a cualquier usuario o taller no industrial debido al abaratamiento de los costos.

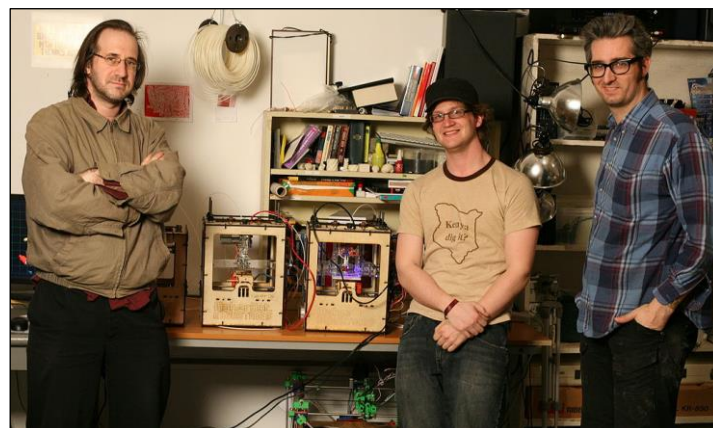
En la década de 1990 hay un gran avance en estas tecnologías a nivel industrial y surgen interesantes proyectos paralelos. Cabe destacar el proyecto liderado por dos estudiantes del Massachusetts Institute of Technology (MIT), donde diseñaron un modelo de impresión 3D por inyección modificando una vieja impresora tradicional. Al año siguiente de finalizar el proyecto, fundaron su propia empresa, Z Corporation, que dirigieron hasta ser adquiridos por 3DSystems en 2012, su principal colaborador.

Paralelamente, surgió el proyecto llamado *RepRap* [12], respaldado por la comunidad *Maker*, donde el Dr. Bowyer desarrolla la primera impresora 3D con capacidad de imprimir casi la totalidad de piezas que la componen. Este fue el constituyente de la entrada del mundo *Open Source* en la historia de la impresión 3D y un gran avance hacia su normalización en el mercado. Otros proyectos toman el relevo de *RepRap*, buscando favorecer el desarrollo de esta tecnología y acercarla al mayor número de personas posibles.



**Figura 1.6 Impresora RepRap (Versión 2.0 Mendel)**  
[13]

En 2009, uno de estos proyectos Open Source denominado *Makerbot* respaldado una vez más por la comunidad *Maker*, fue dando forma a una impresora que nacía con el objetivo de poder ser ensamblada por cualquier persona con unas habilidades técnicas mínimas. Al mismo tiempo, surgieron comunidades de intercambio de ideas y diseños 3D, siendo una de las más destacadas *Thingiverse*.

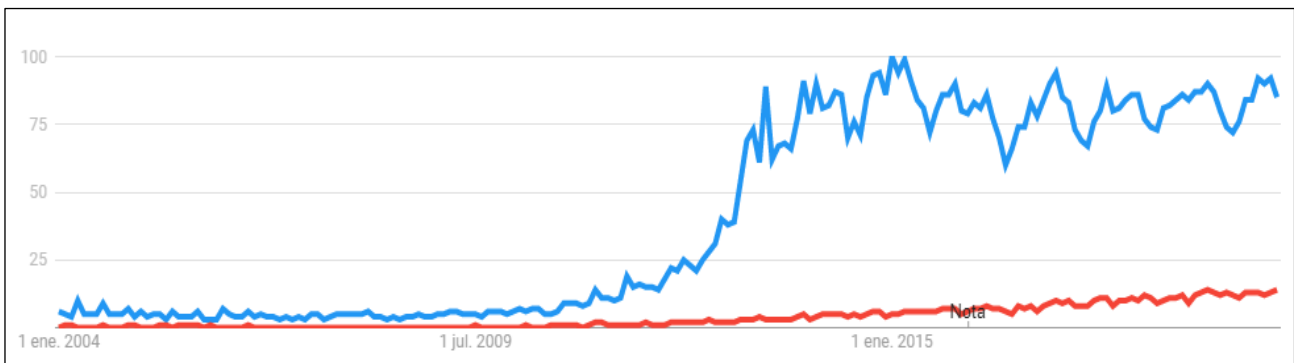


**Figura 1.7 Fundadores de Makerbot posando junto al prototipo final de la impresora Makerbot Cupcake** [14]

Aunque inicialmente se trataba de un proyecto *Open Source*, a partir de 2012 adquirió un perfil más comercial, abriendo sus propias tiendas de distribución con la intención de liderar la revolución de este cambio industrial y social. Este cambio de filosofía no

sentó nada bien a la comunidad *Maker* ni tampoco a los propios creadores de Makerbot, que incluso hizo que uno de sus creadores decidiese dejar el proyecto.

Como podemos ver en la Figura 1.8, donde se compara cómo han evolucionado los términos de búsqueda, en términos de porcentajes, en comparación con el valor máximo de popularidad alcanzado en su historia, ha habido un mayor interés de las técnicas de fabricación aditiva en los últimos años, donde las búsquedas que incluían “fabricación aditiva” (additive manufacturing) han ido aumentando constantemente en la última década. Y también cabe destacar el gran aumento de las búsquedas relacionadas con la impresión 3D en el año 2012, coincidiendo con los proyectos RepRap y Makerbot.



**Figura 1.8 Evolución de los términos de búsqueda "3D Printing" (Azul) y "Additive Manufacturing" (Rojo) desde 2004. Fuente: Google Trends**

#### 1.2.4. Estado actual de la impresión 3D

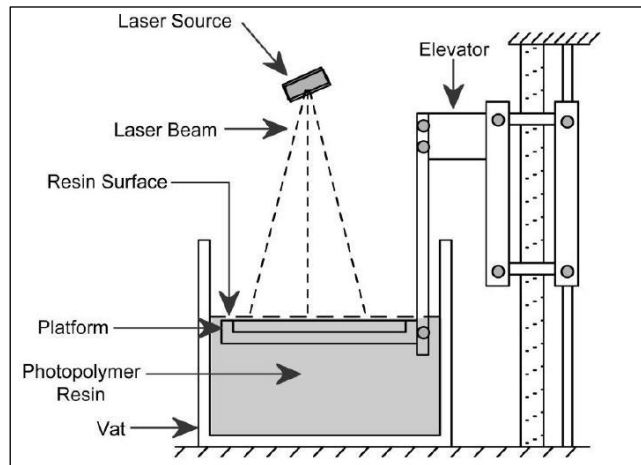
Como hemos comentado anteriormente, los métodos de impresión 3D han avanzado enormemente en la última década, pasando de ser máquinas enormes y costosas a reducir de tal forma su tamaño y coste que hacen que aproximadamente uno o dos millones de usuarios puedan permitirse tener una impresora 3D en su hogar [15]. Aún no está claro hasta donde llegará esta “revolución” pero, lo que sí está claro, es que cada vez están surgiendo más aplicaciones en el campo industrial y está generando continuamente nuevos modelos de negocio.

Jordi Fontrodona y Raúl Blanco nos detallan en su informe sobre el estado actual y perspectivas de la impresión 3D [16] que la impresión 3D ya está presente en innumerables negocios e industrias que comprenden desde la aeronáutica y automoción hasta el deporte y el ámbito doméstico. Empresas tan reconocidas como Boeing o Airbus utilizan impresoras 3D para fabricar piezas de sus aeronaves e incluso en el ámbito militar un F-18 contiene 90 componentes impresos en 3D. Los equipos o escuderías que participan en competiciones como F1 o moto GP utilizan técnicas de impresión aditiva para la fabricación de prototipos o componentes de diseño.

#### 1.2.4.1. Métodos de impresión 3D

La fabricación aditiva se puede interpretar de manera bastante amplia, y el caso particular de la impresión 3D no se queda atrás, a partir de los años 80, este campo se expandió a diversos materiales y técnicas, lo que resultó en métodos totalmente diferentes. John M. Jordan nos detalla en su libro 3D Printing [17] cómo en 2012 la Organización Internacional de Normalización (ISO) especificó la terminología para la fabricación aditiva en la norma ISO/ASTM 52900 y nombró las siete tecnologías principales de fabricación aditiva:

## VAT Polymerization (Polimeración VAT)



**Figura 1.9** Esquema del funcionamiento del proceso de estereolitografía [18]

La polimeración VAT es una técnica de impresión 3D en el que una resina fotopolímera se cura en un tanque selectivamente mediante un haz de luz. Las dos técnicas más comunes de polimeración VAT son la estereolitografía (SLA) y el procesamiento digital de la luz (DLP). La diferencia fundamental entre estos dos tipos de impresión 3D es el tipo de luz que se utiliza para curar la resina.

El método de impresión SLA utilizan un haz de luz ultravioleta para curar la resina líquida, la luz ultravioleta va solidificando la resina capa por capa. La impresión se lleva a cabo sobre una base móvil que soporta el modelo, esta base va desplazándose hacia abajo para que la luz pueda ejercer su acción capa tras capa.

El método de impresión DLP es muy similar al SLA, pero usa fuentes de luz más convencionales y la luz se controla mediante pequeños espejos para que incida en la superficie del objeto a imprimir.

<b>Polimeración VAT</b>	
Principio de funcionamiento	Luz
Materiales	Resina fotopolímera
Espesor de capa	0.025 – 0.1 mm
Necesita soportes	Sí
Ventajas	Acabado superficial liso, alta precisión y fiabilidad
Limitaciones	Los fotopolímeros carecen de resistencia y se degradan con luz solar

**Tabla 1.1 Propiedades de la técnica de polimeración VAT**

## Material Extrusion (extrusión del material)

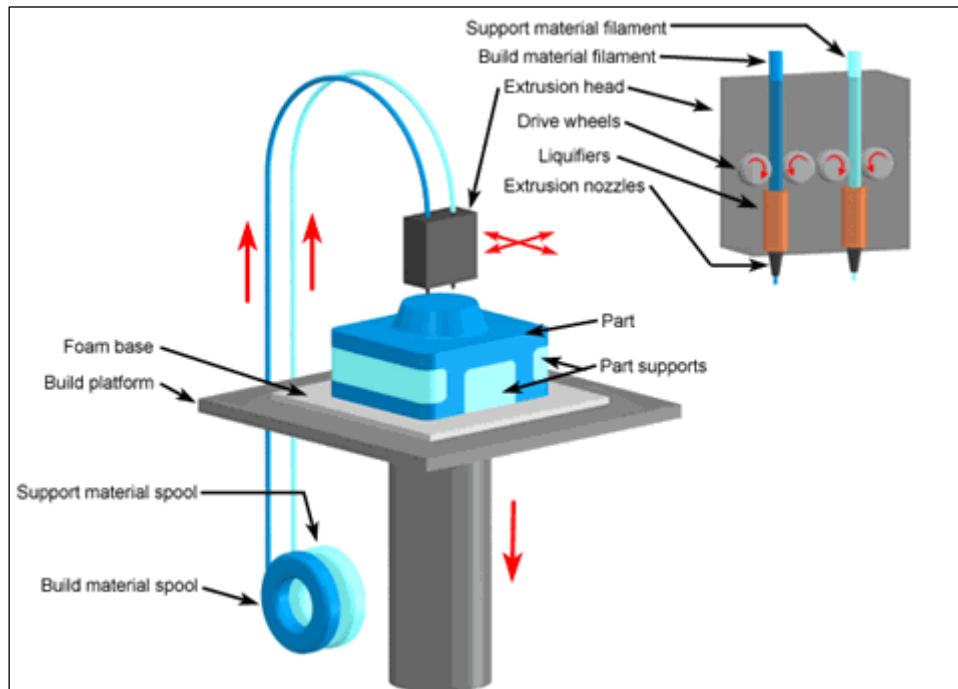


Figura 1.10 Esquema del funcionamiento de deposición de material fundido [19]

La tecnología de impresión por Deposición de Material Fundido (FDM), también conocida como Fabricación con Filamento Fundido (FFF), consiste en la deposición de polímero fundido sobre una base plana capa por capa. El filamento de material termoplástico, que normalmente se almacena en rollos, se conduce a través de una boquilla calentada a tal temperatura que produce la fusión del filamento. La impresora va depositando el material en la plataforma de construcción, comúnmente llamada cama, donde el filamento se enfría y solidifica. Una vez se completa una capa, se repite el proceso capa tras capa, hasta que el objeto está completamente formado.

Esta técnica es la más común, en cuanto a impresión 3D de ámbito doméstico se refiere, debido a que es la opción más económica. Aunque sus resultados pueden no ser tan buenos como otras técnicas, pueden llegar a ofrecer impresiones muy precisas.

Aunque se pueden encontrar una gran variedad de materiales, los más comunes son ABS y PLA.



<b>Deposición de material fundido</b>	
Principio de funcionamiento	Calentamiento
Materiales	Filamento termoplástico
Espesor de capa	0.05 – 0.4 mm
Necesita soportes	Sí
Ventajas	Bajo coste y fácil disponibilidad
Limitaciones	Calidad superficial

**Tabla 1.2 Propiedades de la técnica de deposición de material fundido**

## Powder-Bed Fusion (fusión de lecho de polvo)

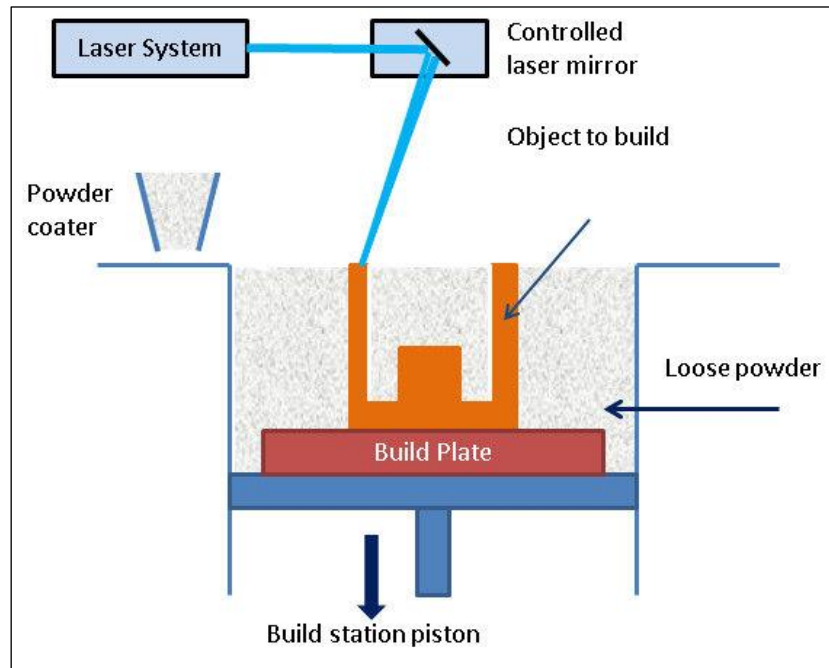


Figura 1.11 Diagrama de la técnica de fusión de lecho de polvo [20]

La técnica de fusión de lecho en polvo es un proceso en el cual partimos de un recipiente de polvo (que puede ser termoplástico y metálico) que se calienta hasta una temperatura cercana al punto de fusión del material y se somete a una fuente de energía térmica que funde selectivamente las partículas de polvo. Una vez fundidas las partículas de una capa, la plataforma de construcción desciende con precisión y se extiende una nueva capa de polvo sobre la parte superior del contenedor y se repite el proceso capa tras capa. El polvo sin sinterizar soporta la construcción a medida que va tomando forma y se suele reciclar. Es totalmente fundamental controlar cuidadosamente el enfriado, tanto durante la impresión como después, para ayudar a prevenir deformaciones y otras distorsiones térmicas.

Dentro de esta técnica de fabricación existen diferentes variantes, siendo las más comunes: Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Melting (SLM) y Electron Beam Melting (EBM).

La tecnología SLS se centra en la fusión de plásticos, vidrios y cerámica, DMLS se refiere a las máquinas que trabajan metales (es la tecnología más utilizada en cuanto a aditivos con capacidad para metales) y SLM es similar pero solo funciona con metales puros con un solo punto de fusión, por lo que DMLS y SLM se suelen agrupar para simplificar. Tanto las tecnologías que trabajan con polímeros como las que trabajan con metales construyen estructuras que son autoportantes, por lo que abre el camino a geometrías internas complejas.

Las ventajas de estas tecnologías de fusión de lecho de polvo son, principalmente, la precisión y resistencia de los productos finales, por lo que se suelen utilizar en aparatos dentales y ortopédicos, por ejemplo. También destaca que la variedad de materiales disponibles para la fabricación y que no necesita de curado tras la producción.

Las principales desventajas es que el precio del metal en polvo es de cinco a diez veces el precio del metal sólido, el alto consumo de energía consumido en la fabricación y la necesidad de controlar el estrés térmico que podría darse debido a las altas temperaturas.

<b>Laser Melting (DMLS, SLM)</b>	
Principio de funcionamiento	Calentamiento mediante laser
Materiales	Aceros, cobalto y algunas aleaciones de aluminio
Espesor de capa	0.02 – 0.08 mm
Necesita soportes	Sí (térmicos) y autoportantes
Ventajas	Fuerza y precisión
Limitaciones	Baja velocidad y alto consumo de energía

**Tabla 1.3 Propiedades de la técnica Laser Melting**

La tecnología EBM comenzó a desarrollarse un poco más tarde, a finales de la década de 1990, llegando a comercializarse en 2001. Esta tecnología utiliza electrones en lugar de fotones para calentar y fundir el polvo. Al igual que con DMLS y SLM, las piezas se construyen a partir de una placa base de metal sólido y deben separarse después de que se enfríe la pieza, generalmente usando una herramienta de corte.

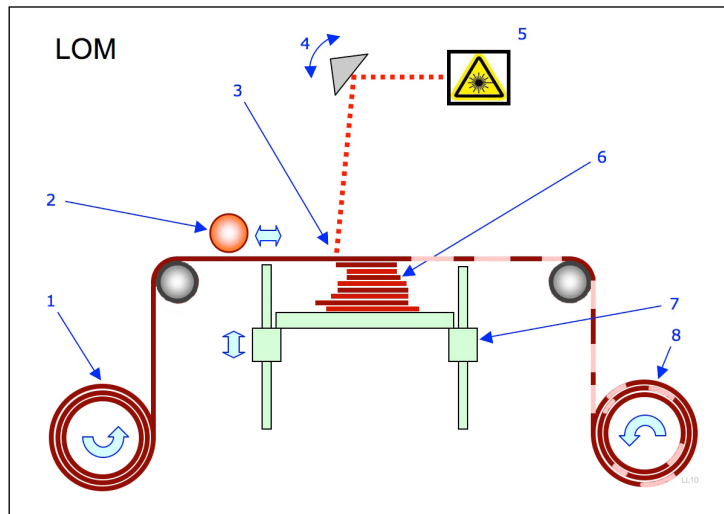
Las ventajas de EBM incluyen la ausencia de huecos y la alta resistencia del producto final, alta precisión, niveles medios de acabado superficial y velocidad de construcción relativamente rápida.

Las principales desventajas incluyen la necesidad de trabajar únicamente con materiales conductores y, como en el anterior caso, el elevado precio de los metales en polvo.

<b>Electron Beam Melting (EBM)</b>	
Principio de funcionamiento	Calentamiento mediante haz de electrones
Materiales	Cobre, aceros, titanio, níquel
Espesor de capa	0.05 – 0.2 mm
Necesita soportes	Sí
Ventajas	Alta resistencia, velocidad (en comparación con DMLS) y alta resolución
Limitaciones	Tamaño de la cámara de construcción, consumo de energía

**Tabla 1.4 Propiedades de la técnica Electron Beam Melting**

**Sheet lamination (Laminación de capas)**



**Figura 1.12 Diagrama de la técnica de laminación de capas [21]**

La laminación de capas, también conocida como Laminated Object Manufacturing (LOM), consiste en la sucesión de capas de papel, plástico, aluminio u otros materiales planos cortados con gran precisión y fusionados posteriormente. Generalmente este proceso produce construcciones estéticamente agradables que pueden usarse como modelos arquitectónicos, por ejemplo, pero carecen de resistencia por lo que no son recomendables para usarse como partes funcionales. Se utiliza principalmente en aplicaciones específicas, como modelos arquitectónicos contruidos con papel.

<b>Sheet lamination</b>	
Principio de funcionamiento	Fusión de diferentes capas de material
Materiales	Polímeros, aluminio, papel y otros materiales laminados
Ventajas	Grandes construcciones, fabricación rápida de las capas, buena precisión y resolución a bajo coste
Limitaciones	Tamaño de la cámara de construcción, consumo de energía

**Tabla 1.5 Propiedades de la técnica Sheet lamination**

## Binder Jetting (Inyección de aglutinante)

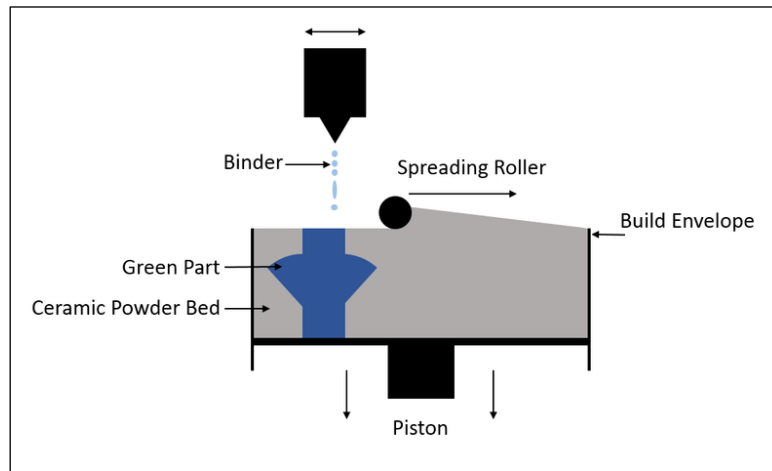


Figura 1.13 Diagrama de la técnica Binder Jetting [22]

La técnica de Binder Jetting (BJ) o inyección de aglutinante es un proceso de fabricación aditiva en el que un aglutinante líquido une selectivamente regiones de un lecho de polvo.

Se trata de una tecnología de impresión 3D similar al SLS ya que requiere una capa inicial de polvo en la plataforma de construcción, pero a diferencia del SLS, donde se utiliza un láser para sinterizar el polvo, en esta técnica es un cabezal de impresión el que se mueve sobre la superficie de polvo depositando pequeñas gotas de aglutinante para unirse con las partículas de polvo generando cada capa del objeto, es decir, une el polvo con aglutinantes adhesivos en lugar de calor. Como ocurre en el SLS, una vez impresa una capa, se baja la plataforma de construcción y se extiende una nueva capa de polvo sobre la capa ya impresa, repitiendo este proceso hasta que se forma la pieza completa. Una vez terminada la impresión, el objeto se deja en el polvo para que gane dureza y se cure, y finalmente se retira el polvo con la ayuda de aire comprimido.

Las posibles combinaciones de aglutinantes y materiales son bastante amplias y la falta de necesidad de calor en la fase de fabricación hace que la deformación y la contracción sean mínimas, incluso en piezas metálicas de gran tamaño.

Esta tecnología es utilizada en modelos arquitectónicos, como verificación ergonómica y para producir piezas metálicas funcionales a un coste relativamente bajo.

Las principales ventajas de esta tecnología son su velocidad de fabricación, mucho mayor que las demás tecnologías con sistemas láser, la posibilidad de fabricar piezas de gran tamaño, se han fabricado estructuras arquitectónicas del tamaño de una habitación, su coste, que puede ser incluso diez veces menor que otros métodos de lecho en polvo y una gran flexibilidad de diseño.

Sus desventajas son, principalmente, el gran tamaño de la maquinaria necesaria, la resistencia limitada de las piezas y otras propiedades del material en relación con los otros métodos de lecho en polvo.

<b>Binder Jetting</b>	
Principio de funcionamiento	Aglutinante adhesivo
Materiales	Bronce, arena, acero inoxidable
Espesor de capa	0.09 mm
Necesita soportes	No
Ventajas	Gran variedad de materiales y relativo bajo coste
Limitaciones	Superficie porosa, piezas metálicas no tan resistentes comparado con otras tecnologías

**Tabla 1.6 Propiedades de la técnica Binder Jetting**

## Material Jetting

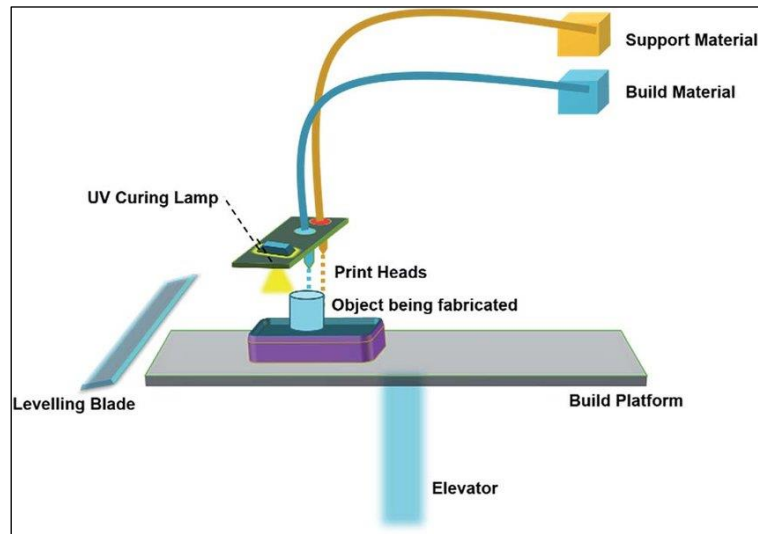


Figura 1.14 Diagrama de la técnica Material Jetting [23]

La técnica de Material Jetting (MJ) o inyección de material, utiliza pequeñas boquillas para rociar capas de fotopolímero líquido en la bandeja de construcción, donde se curan y solidifican con luz ultravioleta. Para las estructuras de soporte se usa un material soluble que se retira en la fase de posprocesamiento. Se puede utilizar una amplia gama de materiales y debido a que las piezas son sólidas en vez de usar celosía en su interior, el uso de material es mayor que en otras tecnologías como con FDM o SLA, lo que aumenta el gasto de materiales y el coste en consecuencia. El posprocesamiento

Las principales ventajas de esta técnica son su flexibilidad de diseño debido a la capacidad de usar diferentes materiales y colores, superficies con un buen acabado superficial, comparable a las fabricadas por moldeo por inyección.

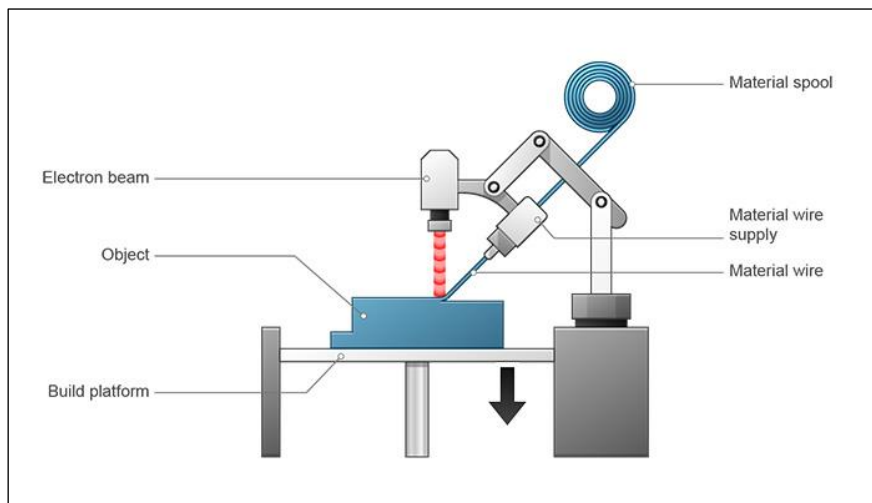
Y como desventajas, destacan el elevado coste de la tecnología, el hecho de que las piezas fabricadas son fotosensibles y, por tanto, se degradan con el tiempo y una baja resistencia mecánica.



<b>Material Jetting</b>	
Principio de funcionamiento	Calor, aglutinante
Materiales	Fotorresinas
Espesor de capa	0.08 mm
Necesita soportes	Sí
Ventajas	Gran acabado superficial, posibilidad de usar varios materiales y colores en una misma pieza
Limitaciones	Fragilidad de las construcciones

**Tabla 1.7** Propiedades de la técnica Material Jetting

### Directed Energy Deposition



**Figura 1.15** Diagrama de la técnica Directed Energy Deposition [24]

La técnica Directed Energy Deposition o deposición de energía dirigida comenzó a comercializarse a finales de la década de 1990. En esta técnica se alimenta polvo

metálico o alambre sobre la superficie de construcción y se funde con un rayo láser o de electrones.

Esta técnica tiene la ventaja de tener una superficie de construcción mayor que las técnicas de lecho de polvo y de un ahorro en el coste de crear o reparar estructuras metálicas complejas y costosas, ya que las capas se pueden depositar de forma libre en superficies curvas o irregulares en lugar de solo en una plataforma de construcción plana.

Las desventajas incluyen una cantidad limitada de materiales disponibles y una textura del acabado superficial rugosa que generalmente requiere de un procesamiento posterior.

<b>Directed Energy Deposition</b>	
Principio de funcionamiento	Haz de electrones o láser
Materiales	Cromo cobalto, titanio
Espesor de capa	0.089 – 0.203 mm
Necesita soportes	No
Ventajas	Puede ser usado para reparar piezas, posibilidad de construir formas irregulares
Limitaciones	Baja velocidad, necesita posprocesado

**Tabla 1.8 Propiedades de la técnica Directed Energy Deposition**

### 1.2.5. Selección del método de impresión 3D

Para la elección del método de impresión 3D, lo primero que hay que establecer es qué parámetros o cualidades son críticas para este proyecto. Las características principales que deberían estar presentes en el método de impresión 3D escogido son:

**Coste:** el principal objetivo que hemos definido para este proyecto es que sea una opción de bajo coste, para que cualquier persona con los mínimos recursos posibles, tanto económicos como técnicos, pueda tener acceso a una prótesis de antebrazo.

**Fácil accesibilidad:** como hemos comentado en el punto anterior, debe ser un método al que se pueda acceder relativamente fácil y que no necesite tecnologías difíciles de obtener.

**Resistencia:** al tratarse de un modelo mecánico que debe soportar fuerzas y tensiones, es importante que las piezas impresas presenten una buena resistencia.

Otros aspectos, aunque son positivos y deseables, no son del todo críticos, por lo que no serán decisivos en la elección, pero sí se tendrán en cuenta. Estos aspectos son:

**Acabado superficial:** aunque le daría un toque más profesional y estético, la presencia de un buen acabado superficial liso no es estrictamente necesaria y, si se necesitase, se podría conseguir en un procesamiento posterior a la impresión.

**Precisión y tolerancias:** ambas son siempre positivas, pero normalmente van ligadas a un aumento del coste y como las tolerancias las podemos tener en cuenta en la fase de diseño, no son un factor decisivo. Aunque, para que pueda garantizar un mínimo de calidad, tanto estética como de funcionamiento, debería tener una precisión superior 0,05mm.

Y, por último, tenemos los aspectos menos importantes:

**Velocidad:** como no se trata de piezas que se vayan a fabricar en serie, sino que, en principio, sólo se fabricarían una sola vez, no es un factor para tener en cuenta siempre y cuando presente unos valores razonables.

**Amplia superficie de trabajo:** la superficie de trabajo o plataforma de construcción no es necesario que presente un gran tamaño, ya que las piezas no son voluminosas y siempre se podría optar por imprimirlas individualmente.

## 1.3. Contextualización

### 1.3.1. Impresión 3D en la medicina

La impresión en 3D, aunque es un método de fabricación relativamente nuevo, ya se usa ampliamente en el mundo de la medicina en la actualidad, en la mayoría de los casos ofrecen alternativas notablemente menos costosas a los procedimientos o dispositivos tradicionales, pero no es el único beneficio, la personalización o customización de los productos y el aumento de productividad son otros de los principales beneficios.

Helena Dodziuk recoge en su artículo [25] las aplicaciones en medicina que están revolucionando el mercado del sector, desde prótesis e implantes hasta la odontología y los audífonos. La profesora Dodziuk divide las aplicaciones en salud en tres categorías:

**Convencionales o cercanas a ello:** donde podemos destacar la fabricación de audífonos [26] donde, antes de la llegada de la impresión 3D, era una especie de fabricación artesanal que podía llevar más de una semana y que ahora en un mismo día se puede llevar a cabo el proceso de escanear, modelar e imprimir un audífono personalizado para un cliente.

También podemos destacar en este grupo sus aplicaciones en odontología [27] ya que las principales aplicaciones industriales de la impresión 3D son en la fabricación de herramientas y fabricación rápida de prototipos, por lo que su uso en odontología, donde se fabrican objetos individuales y personalizados es indudablemente eficaz. Hoy en día, se combina el escaneo oral, el diseño por ordenador y la impresión 3D para la producción de coronas, puentes o modelos de yeso con precisión y rapidez.



**Figura 1.16 Audífono impreso en 3D [28]**

**Su uso es extendido, pero aún no es convencional:** destacan las prótesis impresas en 3D [29] que pueden ser personalizadas según el gusto individual eligiendo colores y añadiendo patrones, y son mucho más económicas que las alternativas tradicionales. Sobre este caso hablaremos más en detalle en el siguiente apartado. También podemos encontrar distintos dispositivos [30] que se usan en la medicina como el estetoscopio [31] que podría ayudar a realizar auscultaciones, un tipo de análisis esencial para la detección de múltiples anomalías en la salud de los pacientes, y salvar así muchas vidas ya que aunque es una herramienta relativamente simple y básica, no en todas las zonas del planeta los médicos pueden tener acceso a una, ya sea por falta de recursos materiales, económicos o incluso debido a bloqueos de suministros médicos.

También destaca el uso de la impresión 3D para la fabricación de libros clásicos tangibles para personas invidentes [32].



Figura 1.17 Estetoscopio impreso en 3D [31]

**Se encuentran en una etapa temprana, pero podrían llegar a ser convencionales:** en este grupo destaca la bioimpresión o bioprinting, la fabricación de tejido humano mediante células de impresión 3D [33], cuyo principal objetivo es reducir la demanda de suministro en el mercado de donantes de órganos. Aunque de momento los avances en esta tecnología son modestos, se ha propuesto la implementación de la llamada lab-on-the-chip, un modelo de tejido bioimpreso en 3D de alto rendimiento. El uso de células madre recientemente anunciada [34] podría abrir nuevas posibilidades en este campo.

Otro caso que ha creado controversia es el uso de la impresión 3D en la fabricación de medicamentos [35], sus detractores hablan de la posibilidad del abuso de medicamentos ya que su implementación cambiaría radicalmente la industria farmacéutica. El primer fármaco impreso en 3D llamado Sprintam ha obtenido la autorización de los Estados Unidos en la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) [36]. La ventaja que puede aportar la impresión 3D es que permite fabricar píldoras muy porosas, lo que permite altas dosis de fármaco en una sola píldora y permite que se disuelva rápidamente y también se pueden imprimir dosis no estandarizadas para niños o ancianos.

### 1.3.2. ¿Por qué una prótesis impresa en 3D?

Las prótesis impresas en 3D, como hemos visto en el apartado anterior, son un buen ejemplo de la influencia que puede tener esta técnica en la industria, por lo que a continuación vamos a detallar las razones por las cuales las prótesis impresas en 3D tienen sentido y por qué esta tecnología promete convertirse en un estándar y la opción más viable:

**Precio:** una prótesis comercial suele costar entre \$5.000 - \$50.000 por lo que innumerables personas no pueden permitirse las prótesis que ayudarían a mejorar su calidad de vida, mientras que una prótesis impresa en 3D puede costar unos cientos de dólares. Hay equipos de voluntarios, como el proyecto E-Nable, que han conseguido elaborar manos protésicas por el precio de unos \$50 [37] y han compartido sus diseños con el mundo gratuitamente, para que cualquier persona con una impresora 3D pueda imprimir una prótesis en casa. Un caso que fue bastante publicitado fue el de Easton LaChapelle [38], un estudiante de 17 años, que para ayudar a una niña de 9 años cuyos padres no se podían permitir una prótesis nueva y más grande por \$80.000, diseñó y fabricó una prótesis impresa en 3D, controlada por una diadema equipada con electroencefalografía (EEG) a través de la cual las ondas cerebrales controlaban el movimiento de la prótesis y publicó sus diseños para que cualquier persona pudiese fabricarla o mejorar el diseño. Esta prótesis costó menos de \$500, por lo que es innegable la diferencia económica que presenta una prótesis fabricada con esta tecnología.

**Velocidad:** el tiempo de fabricación de una prótesis convencional generalmente se extiende a varios meses, en comparación, una prótesis impresa en 3D puede llegar a fabricarse en un solo día.

**Customización:** las prótesis impresas en 3D se pueden personalizar o adaptar fácilmente al propietario e incluso se han realizado diseños para el uso en actividades específicas como montar en bicicleta. Este nivel de personalización también podría darse con las prótesis convencionales, pero elevarían enormemente su coste.



**Expansión:** uno de los problemas que tienen las prótesis convencionales en niños es que, al estar en continuo desarrollo, las prótesis se quedan pequeñas y necesitan reemplazar la extremidad con el fin de acompañar el crecimiento del niño. Este continuo reemplazo puede ser un proceso muy costoso, por lo que la facilidad de producción y el menor coste de las prótesis impresas 3D cobran aún más peso e incluso han empezado a desarrollarse prótesis impresas en 3D elásticas que podría “crecer” con el niño.

## 1.4. Estudio de modelos

### 1.4.1. Selección del tipo de prótesis

Como se ha visto anteriormente, podemos decir que hay dos tipos principales de prótesis en función de si presentan movimiento o carecen de él. Para este proyecto se ha optado por las prótesis activas, ya que la funcionalidad que aporta el movimiento es realmente interesante para el usuario que la porta.

Dentro del grupo de las prótesis activas, se pueden encontrar diferentes proyectos realizados mediante impresión 3D. A continuación, enumeraremos las más interesantes para este proyecto.

#### **Robotic Arm 3D Printed**

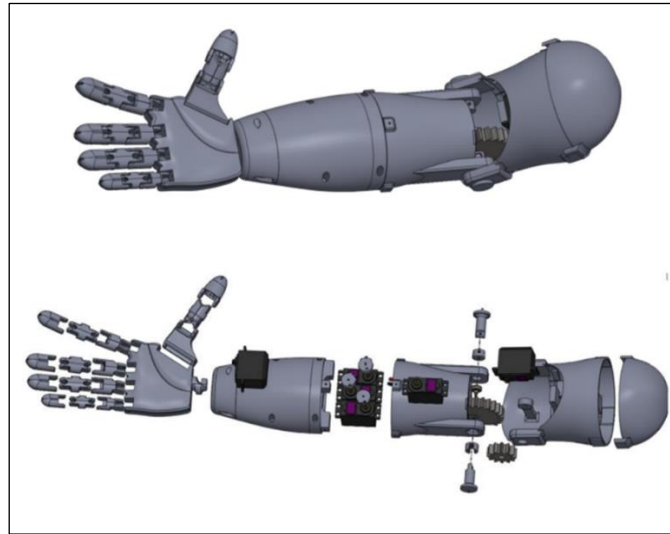
Proyecto open source realizado por Will Donaldson disponible en la comunidad Maker Instructables [39]. El proyecto consiste en un brazo robótico dotado de movimiento gracias a unos servomotores colocados en la palma de la mano protésica que accionan los cables conectados a las falanges de la mano. El diseño está realizado en Autodesk Fusion 360 y aunque el proyecto no trata exactamente de una prótesis, podría ser interesante convertir este brazo robótico en una prótesis mioeléctrica.



**Figura 1.18** Brazo robótico del proyecto **Robotic Arm 3D Printed** [39]

### **3D Printed Myoelectric Prosthetic Arm**

Proyecto realizado como Trabajo Final de Estudios por Mahdi Elsayed Hussein [40]. En este proyecto, Mahdi realiza el diseño de una prótesis mioeléctrica compuesta por mano, antebrazo y bíceps. El modelo fue diseñado para su posterior fabricación mediante impresión 3D. El movimiento de los dedos se realiza a través de unos servomotores colocados en el antebrazo que contraen un cable conectado al extremo de la falange. A parte del movimiento de los dedos, la prótesis está dotada de movimiento tanto en la muñeca (movimiento rotacional) como en el codo gracias a un sistema de engranajes accionados por un servomotor. El diseño fue realizado en SolidWorks y el autor compartió tanto la tesis como el modelo 3D [41] con el fin de que cualquier persona pueda editar el modelo.



**Figura 1.19 Modelo de la prótesis mioeléctrica realizada por Mahdi Elsayed Hussein [40]**

## **Open Bionics**

Esta compañía nace como la continuación del proyecto The Open Hand Project [42], liderado por Joel Gibbard. The Open Hand Project se originó con el principal objetivo de desarrollar una mano robótica open-source de bajo presupuesto, teniendo una gran acogida y consiguiendo financiarse mediante crowd-funding. Tras ganar varios premios en 2013 y 2014, Joel Gibbard fundó junto a Samantha Payne Open Bionics [43], una empresa cuyo objetivo es el de diseñar y fabricar prótesis avanzadas y de calidad por un precio asequible.

Aunque siguen ofreciendo algunos modelos al público [44], se han centrado más en comercializar sus propias prótesis llamadas Hero Arm, que presentan temáticas de superhéroes.

Sus prótesis son mioeléctricas y tienen un acabado muy pulido y profesional, por lo que en un principio sería difícil encontrar mejoras para estas.

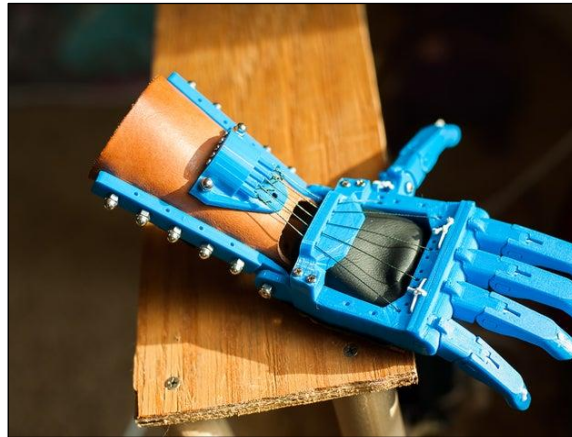


**Figura 1.20** Prótesis mioeléctrica de Open Bionics [45]

### **E-Nable**

Bajo el lema “*Enabling the future*”, E-Nable [46] crea y comparte con el mundo sus diseños open-source de dispositivos de asistencia. Se trata de una comunidad internacional cuyo objetivo es el de diseñar y compartir el modelo de prótesis mecánicas de manos accionadas por un cable. Hay toda una red global de voluntarios que usan sus impresoras 3D para fabricar estas prótesis y donarlas a aquellas personas que lo necesiten.

Tienen diferentes prototipos [47] que, aunque todos ellos son prótesis mecánicas accionadas mediante cables que transmiten el movimiento, hacen que la persona interesada en la prótesis pueda escoger en función del grado de su discapacidad [48].



**Figura 1.21 Modelo de la prótesis Talon Hand de E-Nable [49]**

### **Field Ready**

Esta ONG sin ánimo de lucro trabaja en países subdesarrollados aportando instrumentos o artículos para resolver los diferentes problemas humanitarios. Field Ready [50] fue fundada por profesionales con el fin de contribuir al crecimiento de países en desarrollo, prestando ayuda humanitaria, servicios técnicos y de diseño e ingeniería, tomando prestada toda la tecnología del primer mundo para plantar cara a los problemas de estos países.

Field Ready ha demostrado la utilidad que puede tener la impresión 3D en la ayuda humanitaria [51], por ejemplo, tras el terremoto que tuvo lugar en Nepal en 2015, de una magnitud de 7.8 en la escala de Richter, más de 2.8 millones de personas tuvieron que desplazarse de sus hogares a campos de refugiados. Uno de estos campos de refugiados, de más de 200 personas, estaba abastecido por una sola tubería conectada a un pozo. Cuando esta tubería se rompió, dejando sin suministro de agua a todo el campamento, intentaron repararla, con bolsas de plástico y cinta, sin éxito. Buscar un repuesto no era opción ya que se encontraban en un campamento remoto en medio de un país recuperándose de una catástrofe natural, por lo que Field Ready, sin ningún tipo de experiencia previa con este problema, comenzó a trabajar en un diseño de este repuesto para imprimirlo con una impresora 3D. En menos de un día fueron capaces

de tomar las medidas necesarias, hacer el modelado de la pieza e imprimirla, resolviendo el problema en un periodo corto de tiempo y a un precio minúsculo. Este caso es un claro ejemplo de la importancia que puede tener la impresión 3D en países en vías de desarrollo.

El diseño de prótesis de mano que ha desarrollado Field Ready es de una prótesis mecánica, accionada con el movimiento de la muñeca. Este diseño no es accionado mediante cables, sino que se acciona directamente, mediante un mecanismo, con el giro de la muñeca. Se requieren menos accesorios y herramientas que las otras prótesis ya que se fabrica todo mediante la impresión 3D a excepción de la sujeción de la prótesis al brazo, que se puede utilizar un simple trapo.



**Figura 1.22 Modelo de prótesis de Field Ready [52]**

#### 1.4.2. Justificación del modelo escogido

De los modelos vistos anteriormente, la prótesis de Open Bionics, la prótesis mioeléctrica y la mano robótica, pese a tener las ventajas de poder adaptarse a amputaciones en las que la muñeca no tiene movilidad y pueden llegar a tener mayor precisión, tienen la gran desventaja de su complejidad. Para una persona sin conocimientos técnicos sería muy difícil que consiguiese fabricar estas prótesis,

sumado a que conseguir todos los componentes electrónicos no sería una tarea fácil en según qué países.

Por otro lado, las dos prótesis mecánicas de Field Ready y E-Nable son fáciles de fabricar para cualquier persona que sepa usar una impresora 3D y apenas necesitan componentes auxiliares y herramientas, por lo que los hacen perfectos para países menos desarrollados.

De estas dos prótesis, finalmente se decidió modificar la prótesis de E-Nable ya que, aunque todos los componentes de la prótesis Field Ready se pueden imprimir y sería más fácil de llevar a lugares donde no tienen acceso a estos componentes, el modelo de E-Nable tiene las siguientes ventajas:

- Los dedos están separados entre sí, por lo que se podría aprovechar para que se adaptase y se cerrase cada dedo lo necesario para el agarre en objetos irregulares.
- Según los comentarios de los makers que han impreso el modelo de field ready, han tenido muchos problemas a la hora de hacer que funcione, por lo que parece que este modelo tiene ciertos problemas de diseño y funcionamiento.
- Se puede ajustar el agarre con los tensores, es decir, tensar o destensar el cable para que se adapte con la movilidad de la persona que utilice la prótesis.



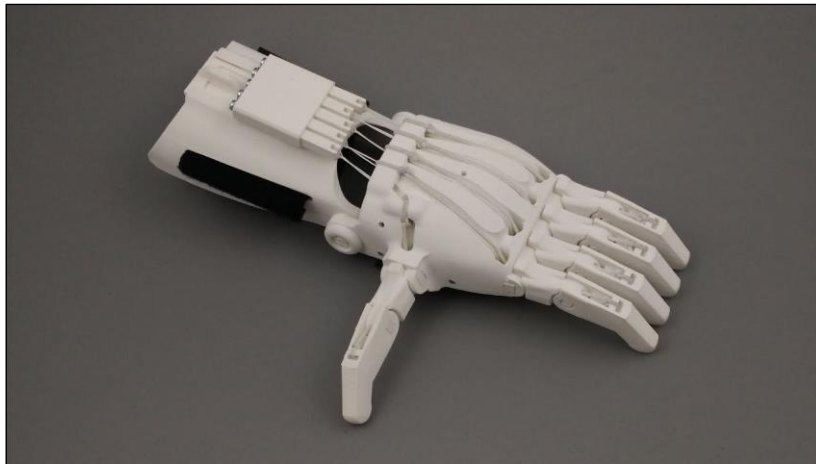
	Robotic Arm	Myoelectric Arm	Open Bionics	E-Nable	Field Ready
Prótesis Mecánica	✗	✗	✗	✓	✓
Prótesis Eléctrica	✓	✗	✗	✗	✗
Prótesis Mioeléctrica	✗	✓	✓	✗	✗
No necesita movilidad	✓	✓	✓	✗	✗
No necesita componentes electrónicos	✗	✗	✗	✓	✓
No necesita conocimientos avanzados	✗	✗	✗	✓	✓

Tabla 1.9 Comparación de características de las diferentes prótesis



# Capítulo 2. DISEÑO

## 2.1. Estudio del modelo

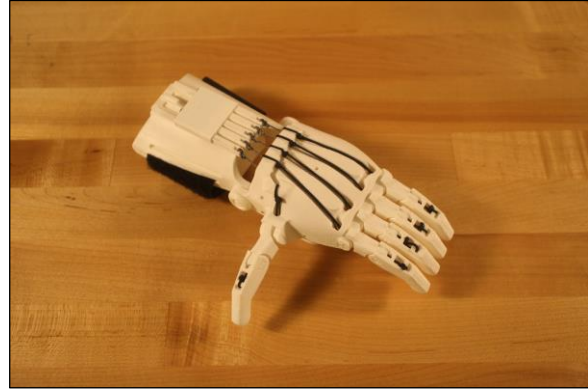


**Figura 2.1 Prótesis escogida de E-Nable: The Raptor Reloaded [53]**

El funcionamiento del modelo escogido de E-Nable, The Raptor Reloaded, es relativamente sencillo, aprovechando el giro de la muñeca para contraer los dedos gracias a unos cables que recorren la palma de la mano. Para volver a la posición inicial, es decir, para la extensión de los dedos cuando no se está ejerciendo presión debido al giro de la muñeca, los dedos tienen unos cables elásticos por la parte de arriba de la mano que hacen que los dedos vuelvan a la posición de reposo.



**Figura 2.2 Cables para la retracción de los dedos [54]**



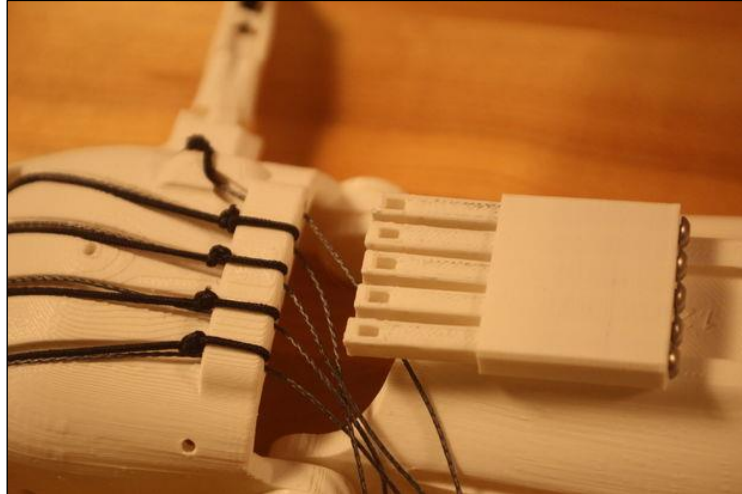
**Figura 2.3 Cables elásticos para la extensión de los dedos [54]**

En la Figura 2.2 se pueden observar los cables, que recorren la palma de la mano desde la punta de los dedos hasta el tensor, que permiten la retracción de los dedos. Y en la Figura 2.3 se pueden observar los cables elásticos que recorren la parte superior de la mano que permiten la extensión de los dedos cuando dejamos de ejercer presión.



**Figura 2.4 Velcros para la sujeción de la prótesis [55]**

Para la sujeción de la prótesis al antebrazo, se utilizan unas tiras de velcro que pueden ser ajustadas para que quede bien sujeta al antebrazo. Estas tiras de velcro se pueden ver en la Figura 2.4.

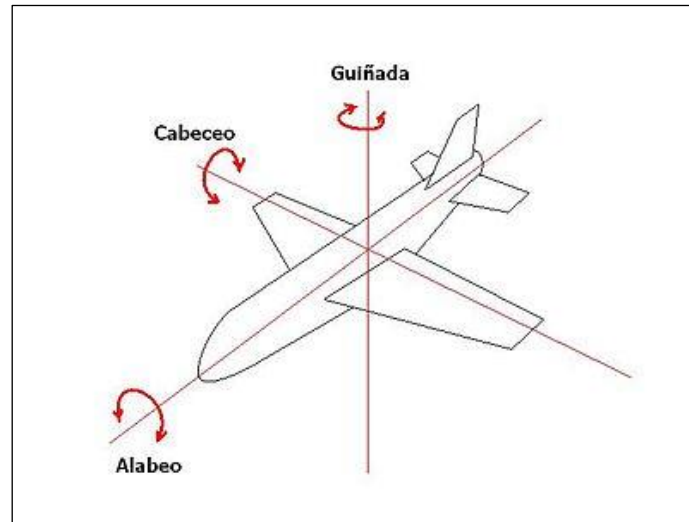


**Figura 2.5 Foto detalle del tensor [54]**

Para conseguir el movimiento de agarre de los dedos, se utiliza el movimiento de cabeceo<sup>1</sup> de la mano, que tensa los cables y retrae los dedos. Para conseguir la tensión necesaria en los cables, se utiliza el tensor de la Figura 2.5. Girando los tornillos, se desplazan las piezas móviles hacia delante y hacia atrás, haciendo que el cable se tense o destense hasta que se alcance una posición óptima.

---

<sup>1</sup> De ahora en adelante se referirá a los giros de la muñeca con la denominación que se utiliza en aviación: alabeo, cabeceo y guiñada, como se puede ver en la Figura 2.6



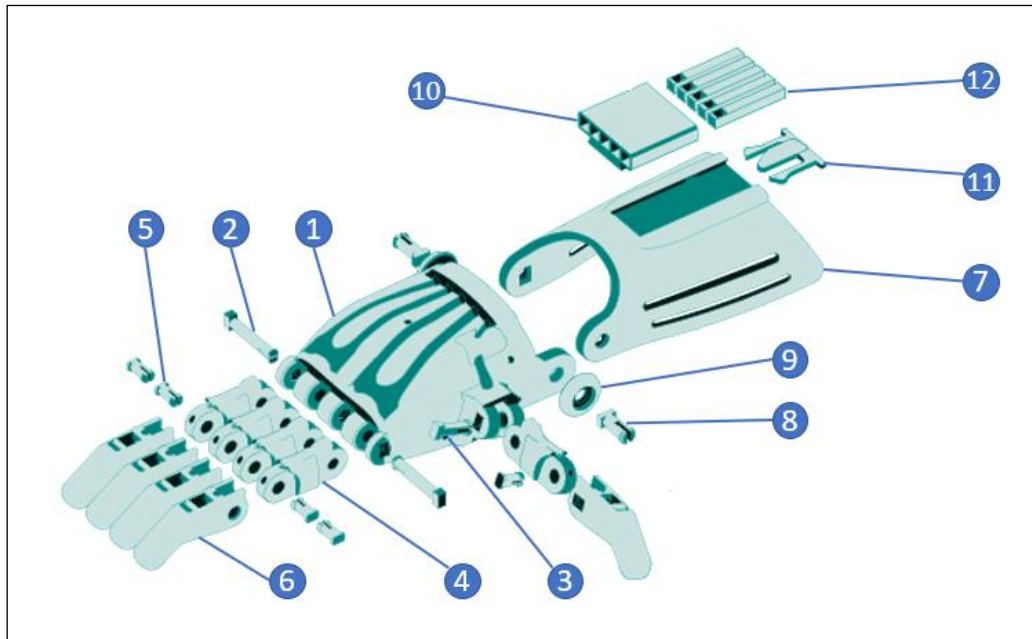
**Figura 2.6 Denominación del giro según el eje de rotación [56]**

### 2.1.1. Diferenciación de las piezas

Como se puede observar en la tabla 2.1, la prótesis original está compuesta por 12 piezas diferentes. A continuación, se detalla qué función tiene cada pieza en el funcionamiento de la prótesis.

<i>Pieza</i>	<i>Uds</i>	<i>Nombre de la pieza</i>
1	1	Right palm o Left palm
2	2	Knuckle pin
3	1	Thumb pin
4	5	Proximal
5	5	Finger pin
6	5	Fingertip
7	1	Gauntlet
8	2	Wrist pin
9	2	Wrist pin cap
10	1	Tensioner
11	1	Retention clip
12	5	Tensioner pin

**Tabla 2.1** Listado de piezas del modelo original



**Figura 2.7** Explosionado de la prótesis con numeración de las piezas

La pieza 1 (Palm) representa la palma de la mano, a esta pieza van conectadas las piezas de los dedos y también la parte que sujeta la prótesis al antebrazo. En esta pieza es donde se ejerce la fuerza para la retracción de los dedos. En la parte inferior, es decir, lo que correspondería a la palma de la mano, se puede poner una tira de tela que se sujete con unos tornillos en los orificios que hay en la parte inferior o imprimir otra pieza que coincida con los orificios para los tornillos. Tiene unos orificios para conducir los cables de retracción de la mano en dirección al tensor y los cables elásticos se anudan a esta pieza en la parte más próxima al tensor.

Las piezas 2, 3, 5 y 8 (Knuckle, Thumb, Finger y Wrist pins) actúan como eje para unir y, a la vez, permitir el giro de las piezas entre sí. Las piezas 2, 3 y 5 permiten el giro de los dedos y la pieza 8 el de la muñeca.

Las piezas 4 y 6 (Proximal y Fingertip) representan las falanges de los dedos. Aunque en la anatomía humana hay tres falanges, este modelo ha fusionado dos de ellas; las falanges distales y medias son la pieza llamada Fingertip y las falanges proximales la pieza Proximal. La pieza Fingertip lleva dos orificios para anudar tanto el cable de la



retracción de los dedos por la parte de abajo, como el cable elástico por la parte superior. La pieza Proximal también tiene dos orificios para conducir sendos cables hacia la pieza Palm.

La pieza 9 (Wrist pin cap) sirve para que el Wrist pin permanezca en su posición, ya que el orificio en la palma es más grande que esta pieza.

La pieza 7 (Gauntlet) va unida a la mano protésica y es la que se encarga de sujetar la prótesis al antebrazo de la persona que use la misma. Gracias a su forma, rodea el antebrazo y se adapta a él, en los laterales tiene unos orificios para poner el velcro que rodeará el antebrazo por la parte de abajo. También tiene una ranura en la parte superior para colocar el tensor, que se introduce desde la parte de atrás.

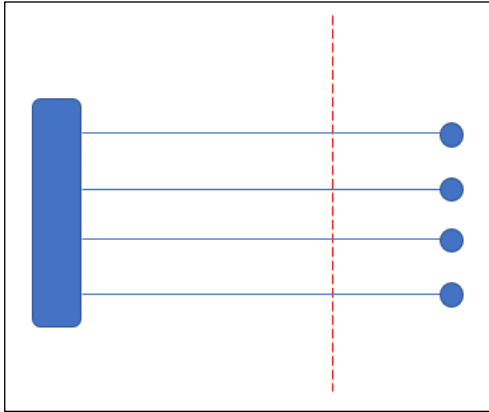
Por último, el conjunto del tensor está compuesto por dos piezas, la pieza 10 (Tensioner), como se ha podido ver anteriormente, se coloca en el Gauntlet y la pieza 13 (Tensioner pin) es la parte móvil a la que se anudan los cables que permiten la retracción y permiten su ajuste ya que se desplazan con el giro de un tornillo. Todo este conjunto está sujeto por la pieza 12 (Retention clip) para que no se salga de su posición.

### 2.1.2. Limitaciones del modelo

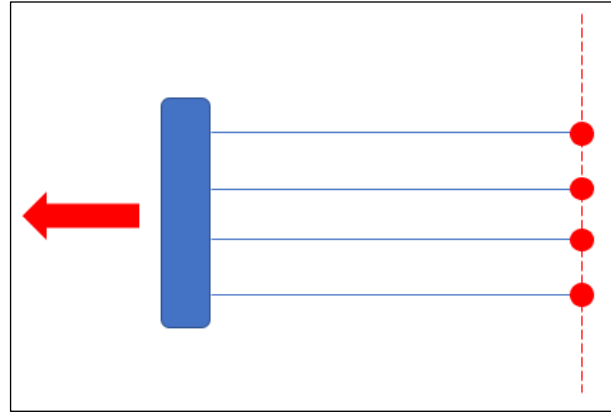
Tras el estudio del modelo, se detectaron dos principales limitaciones:

- El modelo solo permite el giro de la muñeca en el eje de rotación de cabeceo, limitando el movimiento de guiñada que permite la articulación de la muñeca. Esto dificulta algunos movimientos, por lo que sería de gran utilidad que también permitiese el giro en este eje de rotación.
- El tensor, al no tener ningún tipo de rotación, impide que el agarre de los dedos se adapte a objetos irregulares. Para poder observar con mayor claridad este fenómeno, a continuación, se detallarán las diferentes situaciones que se podría encontrar y cómo actuaría el tensor. La pieza azul representa el tensor, la línea

azul los cables y los círculos las terminaciones de los dedos, presentando dos estados: rojo cuando el dedo está tocando el objeto, por lo que estaría “sujetándolo” y azul, que indica cuando está en el aire sin tocar el objeto. Y, por último, la línea roja discontinua representa el objeto que queremos agarrar o sujetar.

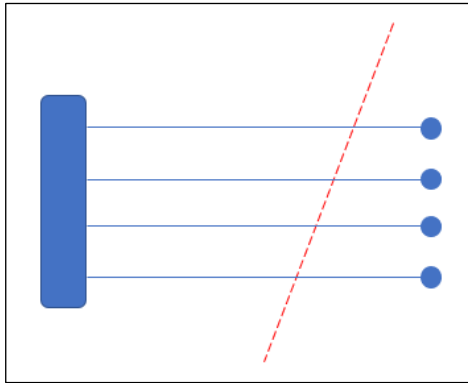


**Figura 2.8** Ejemplo del comportamiento del tensor original frente a un objeto regular

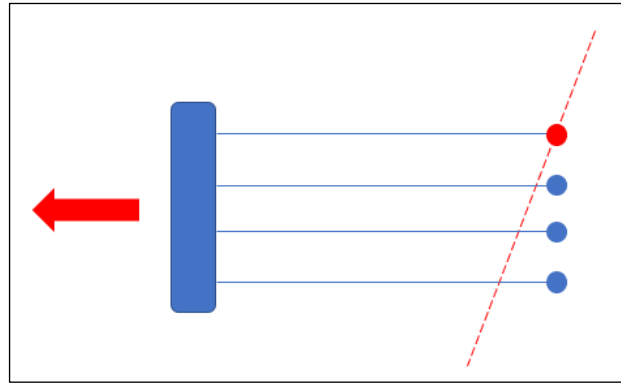


**Figura 2.9** Ejemplo del comportamiento del tensor original accionado frente a un objeto regular

Como se puede observar en las figuras anteriores, al accionarse el tensor, los dedos se retraen por igual hasta llegar al objeto y todos los dedos lo sujetan por igual, por lo que, para objetos regulares, este tensor funciona correctamente.



**Figura 2.10** Ejemplo del comportamiento del tensor original frente a un objeto irregular



**Figura 2.11** Ejemplo del comportamiento del tensor original accionado frente a un objeto irregular

Como se puede observar en el caso de un objeto irregular, cuando un dedo entra en contacto con el objeto, el cable se tensa por completo y no permite que los demás dedos sigan su retracción hasta llegar al objeto, por lo que se quedan en el aire.

Esto hace que el agarre de objetos irregulares no sea óptimo y que en algunos casos sea incluso imposible realizar dicho agarre.

### 2.1.3. Mejoras propuestas

La solución propuesta para permitir el movimiento de cabeceo en la prótesis es la de dividir la pieza Gauntlet en dos diferentes piezas, una estaría sujeta al antebrazo del portador de la prótesis y la segunda actuaría como conexión entre la mano y la pieza sujeta al antebrazo. Esta última pieza permitiría el movimiento de guiñada con la pieza de la mano y el de cabeceo con la pieza del antebrazo, como se puede observar en la siguiente figura.

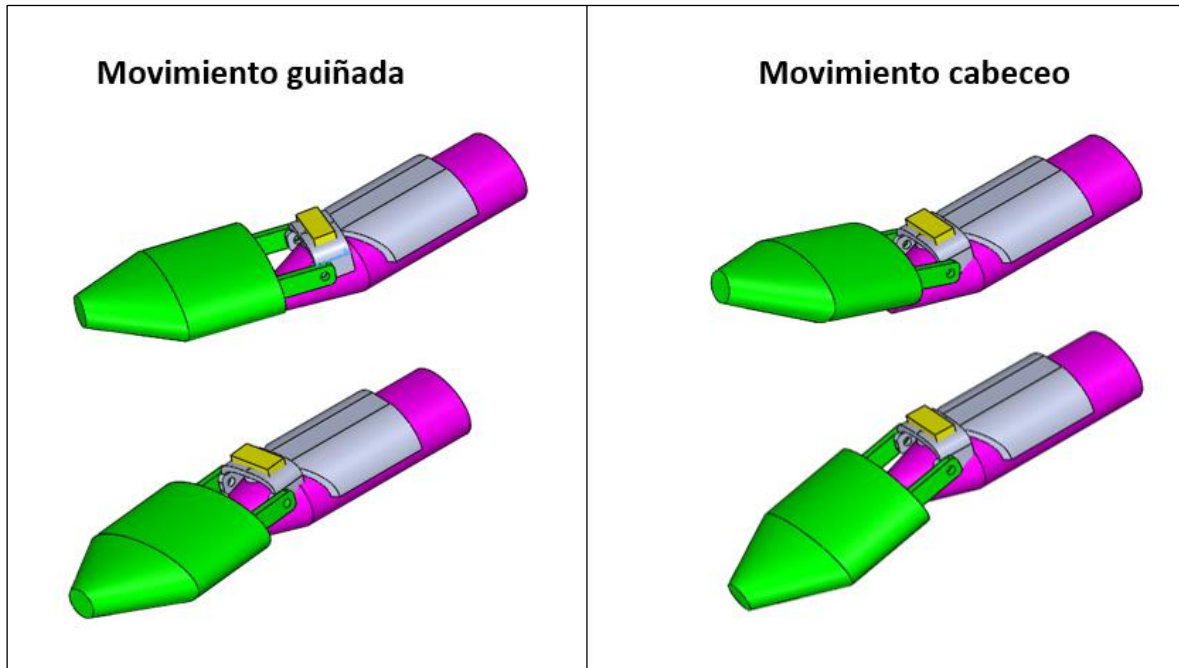
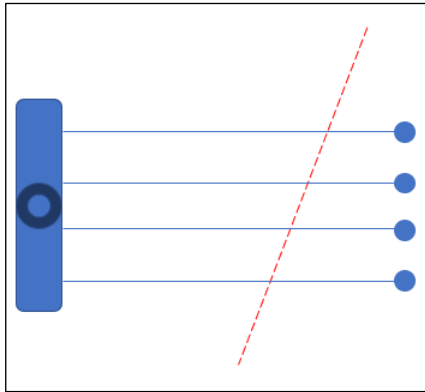


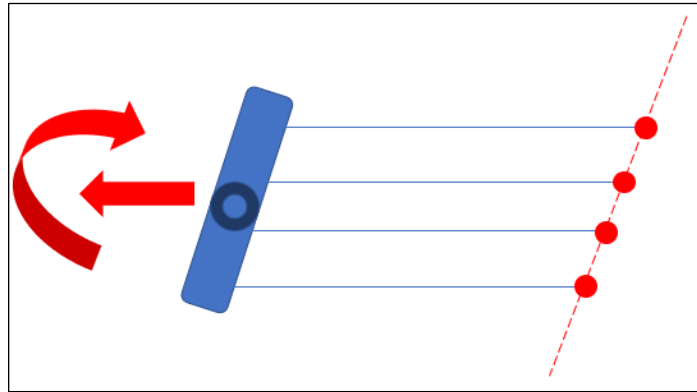
Figura 2.12 Propuesta para añadir el movimiento de cabeceo <sup>2</sup>

La propuesta para que el tensor permita el agarre de objetos irregulares es la de hacer que pueda rotar sobre sí mismo lo que permitiría que, cuando uno de los dedos toque o agarre el objeto, el tensor rote y permita que los demás dedos puedan llegar también a entrar en contacto con el objeto.

<sup>2</sup> La pieza verde representa la pieza de la mano, la pieza gris el conjunto del antebrazo, la pieza lila el brazo del portador de la prótesis y la pieza amarilla el tensor.

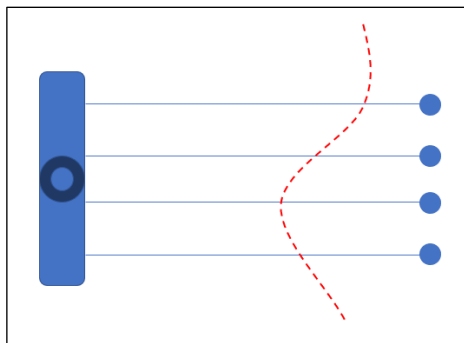


**Figura 2.13** Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto irregular lineal

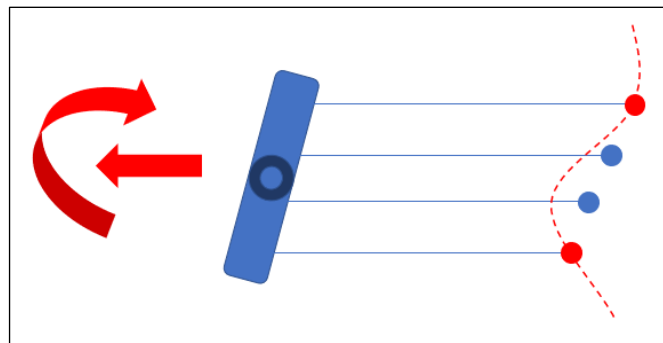


**Figura 2.14** Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto irregular lineal

Aunque esta solución permitiría la adaptación del agarre de los dedos frente a objetos irregulares que presenten una forma lineal, no permitiría el agarre de objetos totalmente irregulares ya que, como se puede observar en las Figuras 2.15 y 2.16, cuando dos de los dedos estuviesen en contacto con el objeto, los otros dos no tendrían contacto con el objeto y quedarían en el aire.



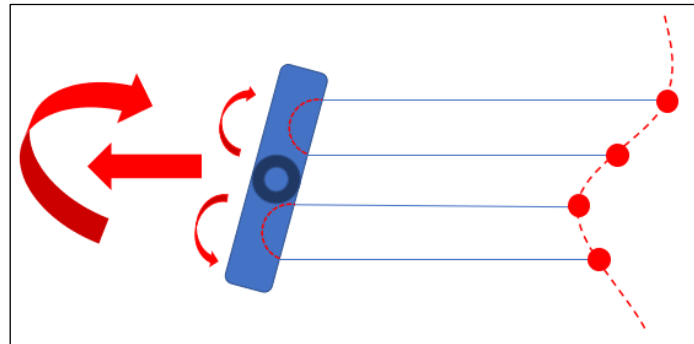
**Figura 2.15** Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto totalmente irregular



**Figura 2.16** Ejemplo del comportamiento del tensor propuesto frente a un objeto totalmente irregular

Para que la prótesis pueda adaptarse a objetos totalmente irregulares se ha propuesto como solución conectar los cables tensores de los dedos por parejas, es decir, usar un solo cable tensor para dos dedos. Al unirlos mediante un solo cable tensor, cuando uno de ellos entre en contacto con el objeto, el cable pueda pivotar o deslizarse y hacer

que el segundo dedo entre también en contacto con el objeto. Este comportamiento se puede ver explicado en la Figura 2.17.



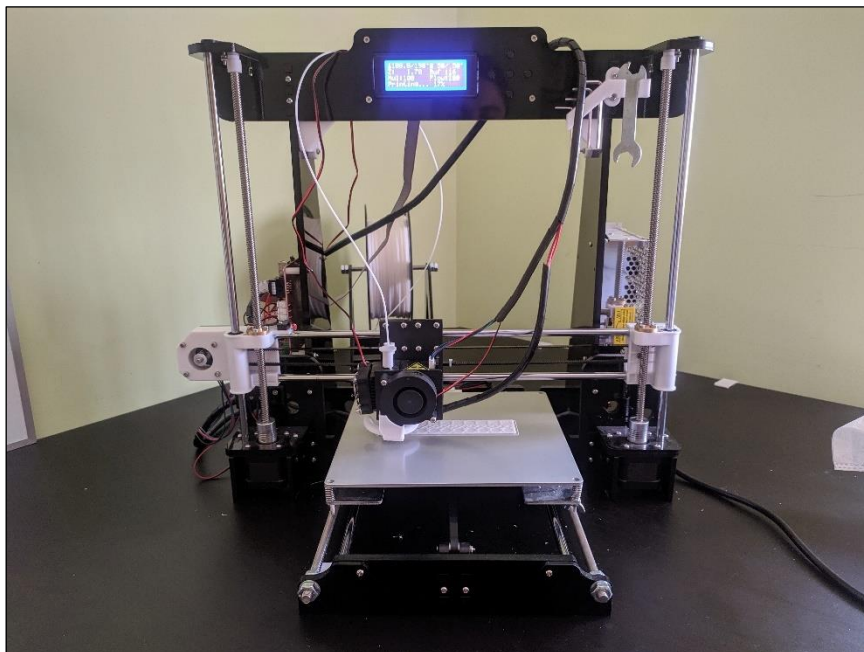
**Figura 2.17 Ejemplo del comportamiento de la solución propuesta frente a un objeto totalmente irregular**

## 2.2. Diseño de las mejoras

### 2.2.1. Definición de tolerancias

Como cualquier otro sistema de fabricación, la impresión 3D no es un proceso perfecto, existen diferencias entre el diseño inicial que queremos obtener y el objeto final que obtendremos al final del proceso. Estas pequeñas diferencias entre el diseño y el producto final, es lo que denominamos errores de fabricación.

Estos errores de fabricación están controlados por las tolerancias, que se deben tener en cuenta en la fase de diseño, ya que siempre debemos movernos en tolerancias que permitan que el objeto final sea aceptable y no se vea afectado en su funcionamiento.



**Figura 2.18 Impresora 3D utilizada (Anet A8)**

Por este motivo, es imprescindible conocer las tolerancias de la impresora que se va a utilizar, en este caso la impresora Anet A8. Para ello, se realizó la impresión de un test de tolerancia [57] con el fin de definir estas tolerancias.

Para esta primera impresión se utilizaron los siguientes parámetros de impresión:

<b>Quality</b>			
Layer Height	<input type="text" value="0.2"/>	mm	
<b>Shell</b>			
Wall Thickness	<input type="text" value="0.8"/>	mm	
Wall Line Count	<input type="text" value="2"/>		
Top/Bottom Thickness	<input type="text" value="0.8"/>	mm	
Top Thickness	<input type="text" value="0.8"/>	mm	
Top Layers	<input type="text" value="4"/>		
Bottom Thickness	<input type="text" value="0.8"/>	mm	
Bottom Layers	<input type="text" value="4"/>		
Horizontal Expansion	<input type="text" value="0"/>	mm	
<b>Infill</b>			
Infill Density	<input type="text" value="15"/>	%	
Infill Pattern	<input type="text" value="Grid"/>		
<b>Material</b>			
Printing Temperature	<input type="text" value="190"/>	°C	
Build Plate Temperature	<input type="text" value="50"/>	°C	
Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>		
<b>Speed</b>			
Print Speed	<input type="text" value="60"/>	mm/s	
<b>Travel</b>			
Z Hop When Retracted	<input checked="" type="checkbox"/>		
<b>Cooling</b>			
Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan Speed	<input type="text" value="100.0"/>	%	
<b>Support</b>			
Generate Support	<input type="checkbox"/>		
<b>Build Plate Adhesion</b>			
Build Plate Adhesion Type	<input type="text" value="Brim"/>		

Figura 2.19 Parámetros de impresión para el test de tolerancias



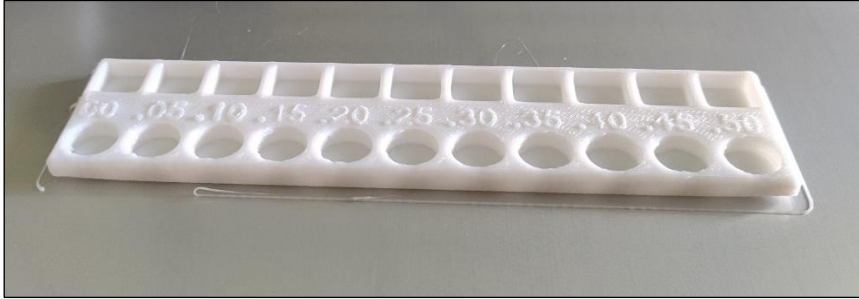


Figura 2.20 Test de tolerancia

Con este test de tolerancia se puede observar el juego<sup>3</sup> que se debe utilizar a la hora del diseño para que, en el momento de la impresión, el ajuste entre las piezas se corresponda con el diseño y pueda desarrollar la función deseada, ya que estas piezas pueden haber sido diseñadas para que permanezcan fijas, puedan rotar o deslizarse entre sí.

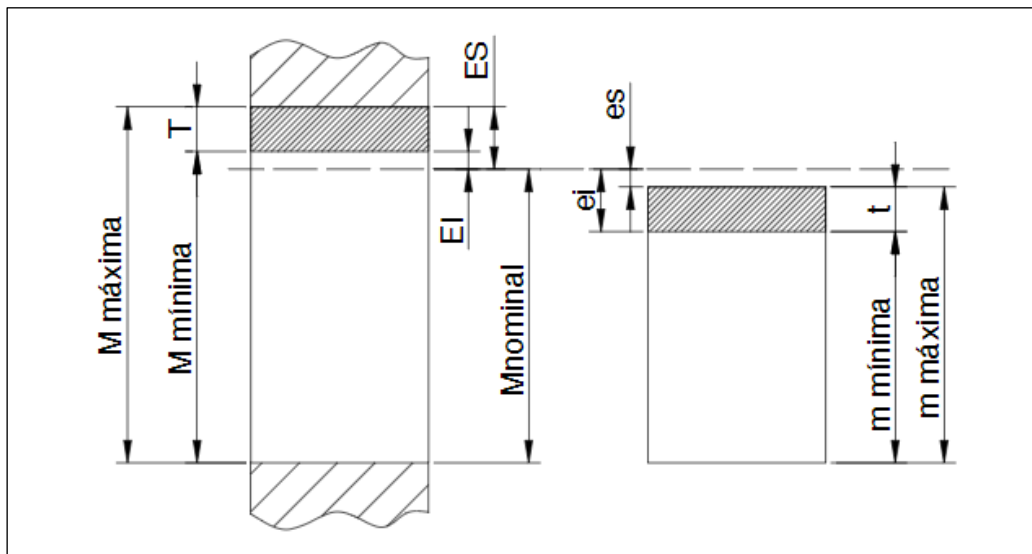


Figura 2.21 Representación esquemática de las tolerancias [58]

El test consta de tres piezas, las dos primeras son un cilindro y un prisma cuadrangular que actúan de macho en la segunda pieza, que es la que aparece en la Figura 2.20 y, como se puede observar en la imagen, presenta unos orificios circulares y cuadrados

<sup>3</sup> Diferencia entre las medidas, antes de ensamblar, del agujero y del eje, cuando esta diferencia es positiva, es decir, cuando la medida del eje es inferior a la del agujero.

de diferentes tamaños. El tamaño de estos orificios viene determinado por el macho y la tolerancia que viene señalada en la pieza, es decir, siendo el cilindro de diámetro 10mm, el primero orificio marcado como .00 es de diámetro 10mm, el siguiente marcado como 0.05 es de 10.05mm y así sucesivamente.

El resultado que se obtuvo fue que para tolerancias menores de 0.45mm no se podía insertar el macho en el orificio, en el de 0.45 se podía insertar con cierta dificultad, pero no se podía rotar y en el de 0.5 se podía insertar relativamente bien, pero costaba bastante rotar la pieza, por lo que se decidió diseñar dos orificios más de 0.55 y 0.6 para ver su comportamiento. El resultado de este segundo test fue que para el orificio de 0.55 entraba fácilmente y rotaba bien y para el de 0.66 permitiría un diseño que necesitase cierto deslizamiento entre sí.

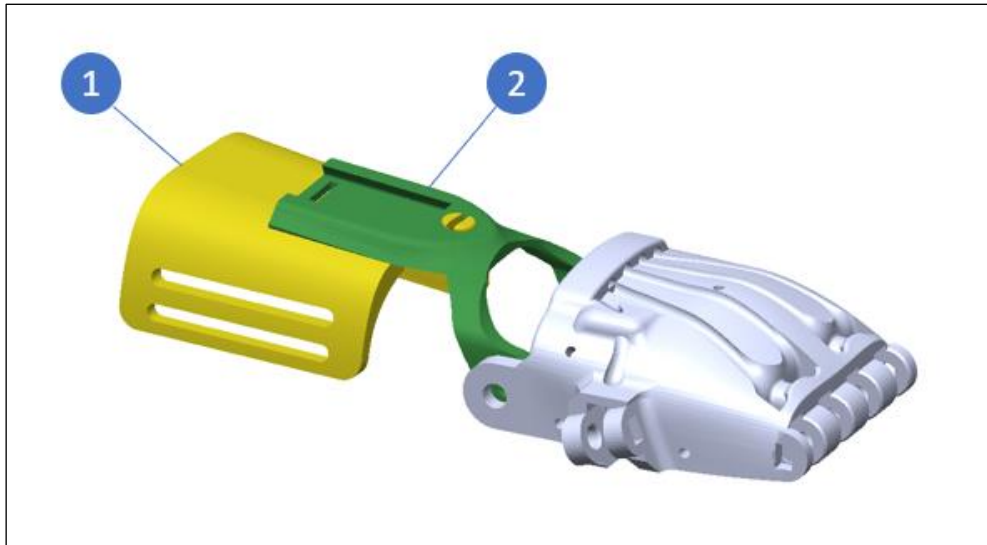
Por tanto, tras las anteriores pruebas, se seleccionaron las siguientes tolerancias de diseño:

Tipo de movimiento	Tolerancia
Fijo	0.45mm
Rotación	0.55mm
Deslizamiento	0.6mm

**Tabla 2.2 Tolerancias escogidas para la fase de diseño**

### 2.2.2. Giro de la prótesis

Como se propuso anteriormente, para permitir el movimiento de cabeceo en la prótesis, se ha sustituido la pieza Gauntlet por dos piezas diferentes, una que permita el movimiento de la prótesis en las dos direcciones deseadas y otra que permitirá la sujeción de la prótesis al antebrazo.



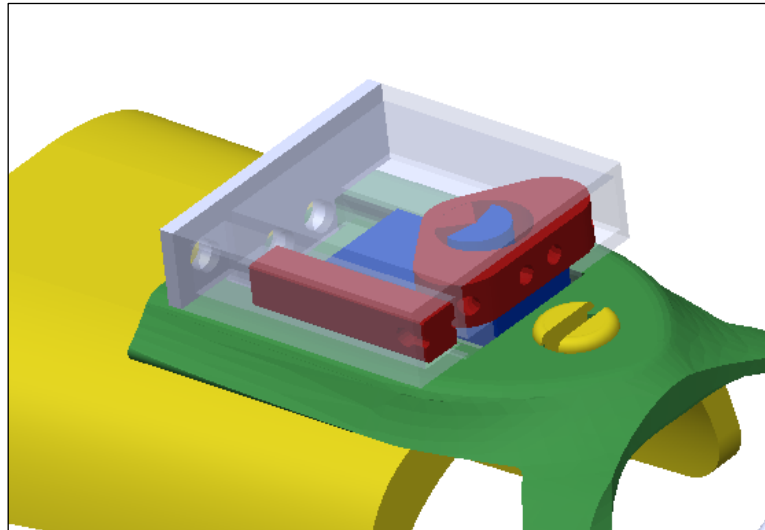
**Figura 2.22** Diseño de la propuesta para el giro de la prótesis

Como se puede observar en la Figura 2.22 se han diseñado dos piezas diferentes:

1. La pieza Fixed Gauntlet, cuya forma se adapta al antebrazo y presenta dos orificios en cada lado en los que se insertarían los velcros para sujetar la prótesis al antebrazo del portador de la prótesis.
2. La pieza Rotating Gauntlet, sirve como nexo entre las piezas Fixed Gauntlet y Palm. Para conectar todas estas piezas, presenta tres orificios: dos de ellos para conectarla con la pieza Palm mediante un pasador que se imprimirá a parte y el tercero para unirla con la pieza Fixed Gauntlet mediante una unión que no necesita de piezas auxiliares ni tornillos.

### 2.2.3. Modificación del tensor

Para permitir el agarre de objetos irregulares, se ha diseñado el tensor para que, gracias a una pieza móvil, pueda rotar sobre sí mismo. En la Figura 2.23 se puede observar el tensor ensamblado sobre la pieza Rotating Gauntlet.

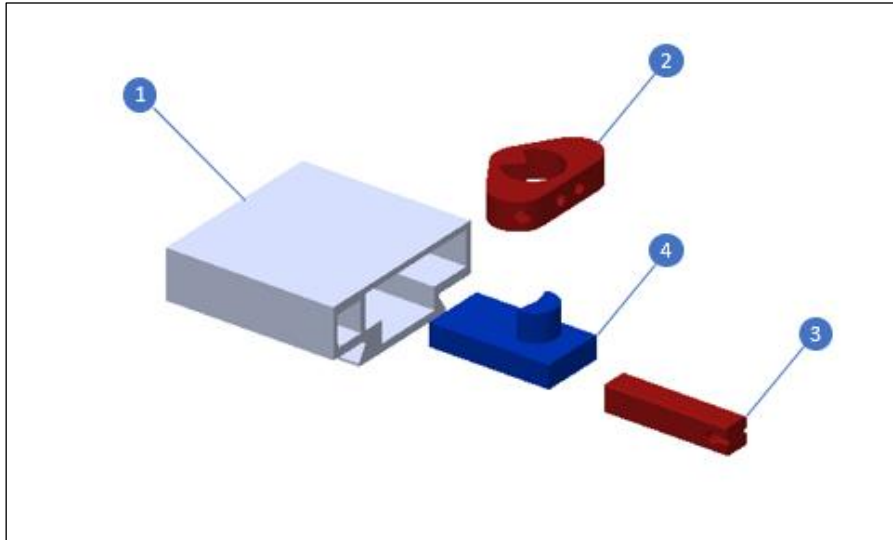


**Figura 2.23** Diseño de la propuesta para el tensor

Como se observa en las Figuras 2.23 y 2.24, el conjunto del tensor se divide en cuatro piezas diferentes, que se han nombrado en inglés para que sean coherentes con las piezas anteriores.

1. La pieza Gripper Box es la que se encarga de alojar a las demás piezas, va encajada en la pieza Fixed Gauntlet gracias a la forma de cuña que presenta en la parte inferior. Presenta unos orificios en la parte posterior para alojar los tornillos que servirán para tensar los cables y en la parte frontal está abierta para poder insertar los demás componentes del tensor.
2. La pieza Whippletree, denominada así por su similitud con el mecanismo que sirve para distribuir la fuerza de manera uniforme en vehículos de tracción animal, presenta un orificio en la parte central con un vértice que le permite rotar y una serie de orificios en la parte frontal para conectar los cables tensores que estarán conectados con los dedos de la prótesis a excepción del dedo pulgar.
3. La pieza Thumb Tensioner sirve como tensor del dedo pulgar, presenta dos orificios: el primero sirve para anudar el cable tensor del pulgar de la prótesis y el segundo para insertar el tornillo que servirá para tensar dicho cable.

4. La pieza Swivel Pin funciona como pivote para la pieza Whippetree y, además, presenta unos orificios en la parte posterior para la inserción de unos tornillos que permitirán tensar los cables que van anudados a la pieza Whippetree.



**Figura 2.24 Vista explosionada del tensor**

En las Figuras 2.25 y 2.26 se puede observar el movimiento de rotación que hace la pieza Whippetree cuando uno de los dedos de la prótesis se encuentra con una resistencia, lo que permite el agarre de objetos irregulares.

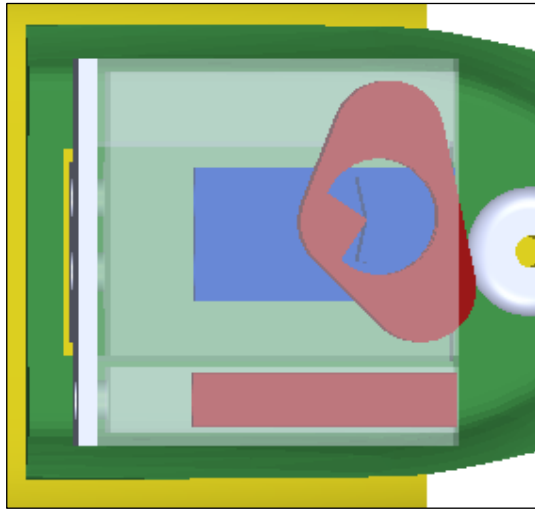


Figura 2.25 Ilustración del movimiento de giro 1

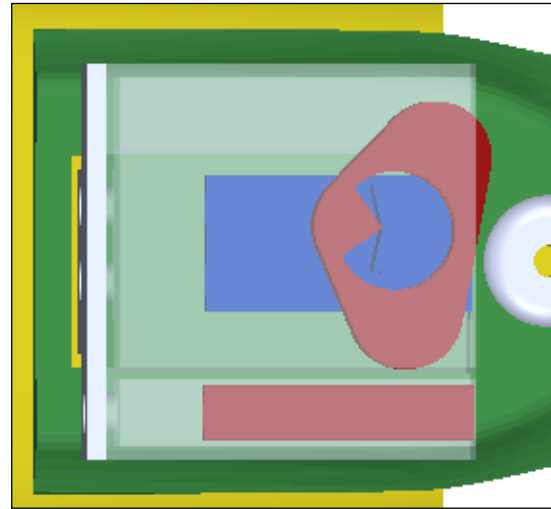


Figura 2.26 Ilustración del movimiento de giro 2

#### 2.2.4. Fijación del tensor

La solución para limitar el movimiento hacia atrás del conjunto del tensor en el modelo original no se adaptaba al nuevo diseño ya que, para el diseño original, no suponía un inconveniente su tamaño, puesto que iba fijada a la pieza Gauntlet y esta era bastante más voluminosa. Pero en este nuevo diseño, el tensor va acoplado a la pieza Rotating Gauntlet por lo que, al girar, si se mantiene la solución inicial, esta pieza quedaría en el aire.

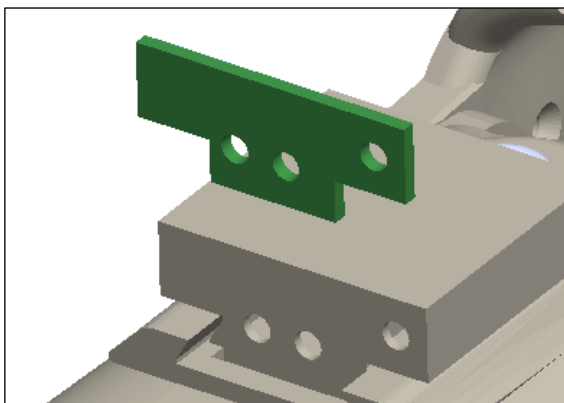


Figura 2.27 Diseño de la fijación del tensor 1

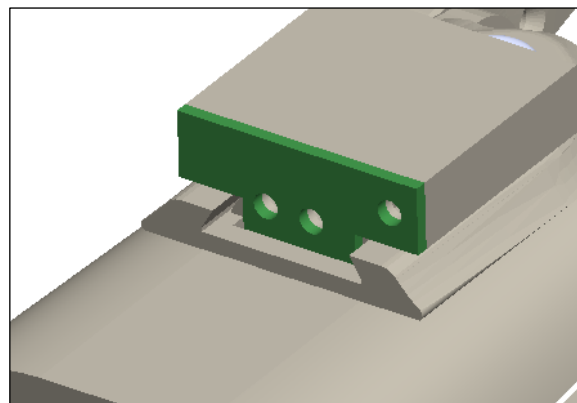
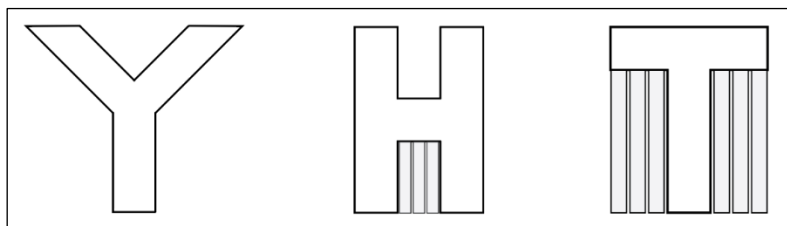


Figura 2.28 Diseño de la fijación del tensor 2

Por este motivo, se ha optado por diseñar una nueva pieza, como se puede observar en las Figuras 2.27 y 2.28, que va encajada en un orificio de la pieza Rotating Gauntlet y fijada gracias a los mismos tornillos que se utilizan para el tensor.

### 2.3. Adaptación de las piezas para su impresión 3D

La impresión 3D, como cualquier otro método de fabricación presenta algunas limitaciones, una de estas limitaciones es que no puede imprimir sobre el aire. En la impresión 3D cada capa se imprime sobre la anterior o ligeramente desplazada sobre la misma lo que permite imprimir modelos con un ángulo menores de  $45^\circ$ . Cuando el modelo a imprimir presenta ángulos de más de  $45^\circ$  es más que probable que falle la impresión, aunque hay alguna excepción como veremos más adelante.



**Figura 2.29** Diferentes tipos de estructuras que requieren soporte [59]

En la figura 2.29 se pueden observar diferentes tipos de voladizos:

1. En el primero (Y) el voladizo presenta un ángulo algo menor de  $45^\circ$ , por lo que no sería necesario añadir un soporte y se podría imprimir fácilmente.
2. En el segundo (H) presenta lo que se denomina *Bridge* o *Puente*, se diferencia de un voladizo normal en que la parte que está sobre el aire está conectada por los dos extremos al modelo. En este caso, aunque en la imagen ha añadido soporte, dependerá de la distancia entre los dos extremos la necesidad o no de añadir el mismo; para puentes menores de 5mm no es necesario ya que la impresora puede utilizar el mismo modelo como apoyo y la distancia no es demasiado grande como para que el filamento caliente se curve hacia abajo.
3. En el tercero (T) el voladizo es de  $90^\circ$  y al contrario que en el caso anterior, no tiene la posibilidad de utilizar el mismo modelo como apoyo, por lo que será

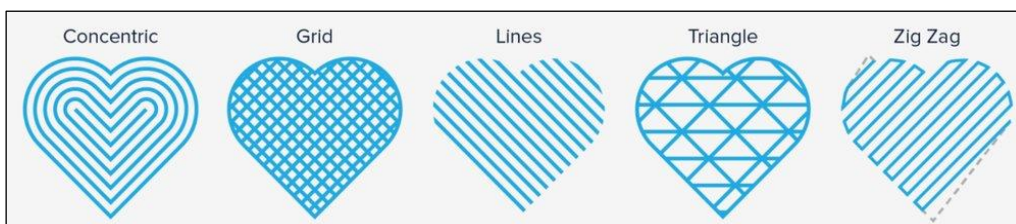


necesario añadirle un soporte. En la Figura 2.30 podemos ver la comparativa de la impresión de este modelo con soporte y sin él.



**Figura 2.30 Comparativa de la impresión de una T con soporte y sin él [59]**

Dependiendo del software, podemos encontrarnos con diferentes tipos de soportes, en la Figura 2.31 se puede observar los principales tipos de soportes que suelen incluir en los diferentes softwares que permiten añadirlos al modelo. En este caso, y aprovechando que es el mismo que se utilizará para la impresión, se utilizará Ultimaker Cura como software. Finalmente, se utilizó la opción por defecto en el programa, que es el soporte en zigzag.



**Figura 2.31 Principales tipos de soportes [60]**

Generalmente se recomienda una densidad del soporte entre el 10% y el 15%. Para los soportes de nuestras piezas, se usará una densidad de 15%, ya que la impresora está

configurada con una velocidad de impresión relativamente baja y para impresiones lentas se recomienda subir la densidad de los soportes.

Se puede configurar el lugar de colocación del soporte, escogiendo si quieres que se apoye solo en la cama de impresión o en cualquier sitio (incluido el modelo); esta última opción ha sido la escogida para la impresión.

Y, por último, el ángulo del voladizo necesario para el que el software añada el soporte se ha configurado en 50°, ya que para ángulos de 45° no suele presentar fallos en la impresión.

# Capítulo 3. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

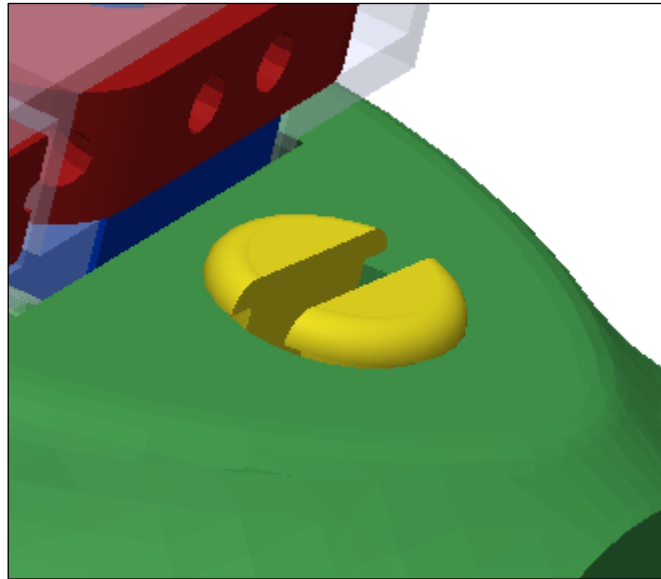
## 3.1. Fabricación

Una vez finalizado el diseño, la fase de fabricación se ha dividido en diferentes etapas:

1. Comprobación de las partes críticas del modelo, imprimiendo las piezas o partes de las piezas más críticas para comprobar su resistencia y que funcionan tal y como se había pensado en la fase de diseño.
2. Cambios en el diseño si alguna de las piezas comprobadas en el punto anterior necesita alguna modificación.
3. Impresión 3D de todas las piezas del modelo.
4. Preparación de las piezas tras su impresión en 3D.
5. Montaje o ensamblaje del modelo.
6. Ajustes necesarios para el correcto funcionamiento de la prótesis.

### 3.1.1. Comprobación de las partes críticas

Ya en la fase de diseño se señalaron algunas de las posibles zonas críticas del modelo, la primera de ellas es la unión entre las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet, ya que debe soportar el esfuerzo del giro de la muñeca.



**Figura 3.1 Unión entre las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet**

Para imprimir esta unión, se ha seccionado la zona de la unión en la pieza Fixed Gauntlet y se ha diseñado un cilindro con el diámetro de la unión para comprobar que las tolerancias son correctas y que se puede insertar correctamente. Los parámetros de impresión utilizados para estas configuraciones son los siguientes:

<b>Quality</b>			
Layer Height		0.2	mm
<b>Shell</b>			
Wall Thickness		0.8	mm
Wall Line Count		2	
Top/Bottom Thickness		0.8	mm
Top Thickness		0.8	mm
Top Layers		4	
Bottom Thickness		0.8	mm
Bottom Layers		4	
Horizontal Expansion		0	mm
<b>Infill</b>			
Infill Density		20	%
Infill Pattern		Lines	
<b>Material</b>			
Printing Temperature		190	°C
Build Plate Temperature		50	°C
Enable Retraction		<input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Speed</b>			
Print Speed		60	mm/s
<b>Travel</b>			
<b>Cooling</b>			
<b>Support</b>			
Generate Support		<input checked="" type="checkbox"/>	
Support Placement		Everywhere	
Support Overhang Angle		50	°

**Figura 3.2** Parámetros de impresión para las comprobaciones de las partes críticas



**Figura 3.3** Piezas impresas para la comprobación de la unión de las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 1



**Figura 3.4** Piezas impresas para la comprobación de la unión de las piezas Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 2

Tras la impresión de las piezas, se procedió a su ensamblaje y se comprobó que las tolerancias eran las correctas pero la pieza que actúa como macho tenía menos flexibilidad de la que se pensó en la fase del diseño y era imposible insertarla en el cilindro sin que esta se rompiese.



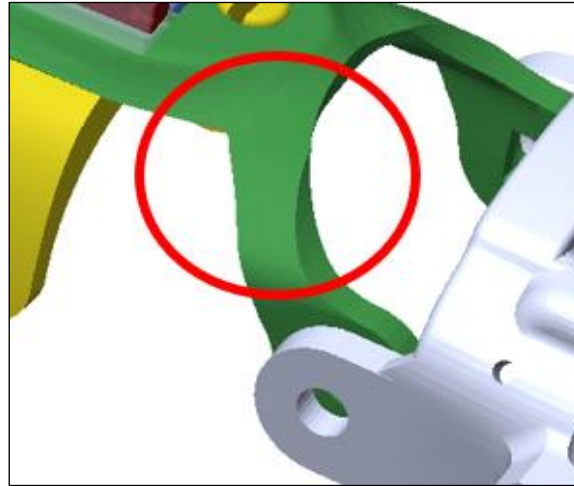
**Figura 3.5** Rotura de las piezas de la unión entre Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 1



**Figura 3.6** Rotura de las piezas de la unión entre Fixed Gauntlet y Rotating Gauntlet 2

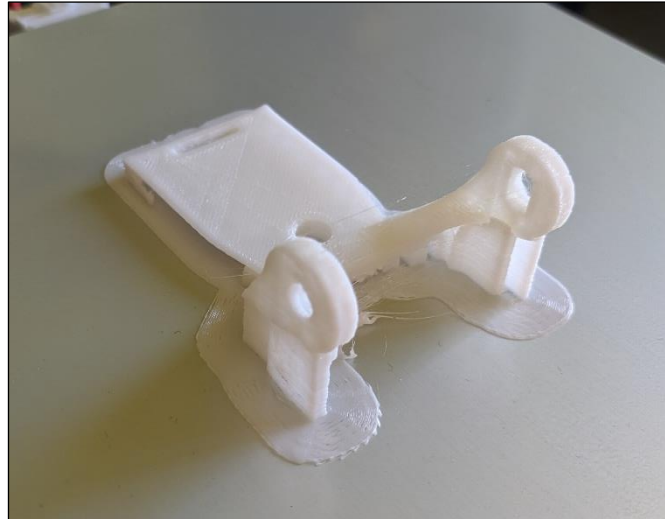
Otra de las partes críticas del modelo es la señalada en la Figura 3.7 en la pieza Rotating Gauntlet, ya que no es muy gruesa y debido al cambio de geometría que presenta,

acumulará las tensiones generadas al aplicar la fuerza necesaria para contraer los dedos de la prótesis.



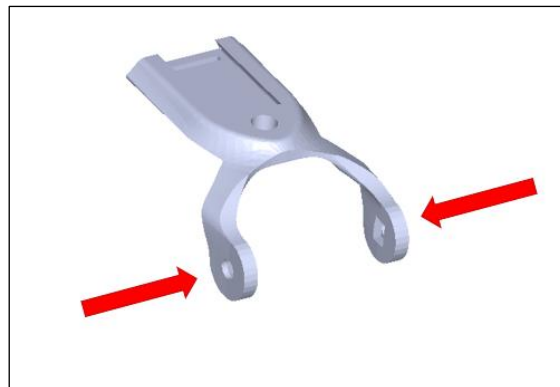
**Figura 3.7 Zona crítica en la pieza Rotating Gauntlet**

La pieza se ha impreso con los mismos parámetros de impresión que la pieza anterior y con soporte, ya que hay varias zonas en voladizo. Se ha escogido esta posición para la impresión porque es la que menos soportes necesita, ya que más soporte equivale a un mayor tiempo de impresión, mayor gasto de filamento y, por tanto, mayor coste.



**Figura 3.8 Pieza Rotating Gauntlet impresa con soportes**

Una vez terminada la impresión y eliminados los soportes se aplicaron fuerzas en diferentes direcciones para comprobar que la pieza podría soportar los esfuerzos y, aunque en general soportaba bien los esfuerzos, se fracturó al aplicar la fuerza en la dirección que se muestra en la Figura 3.9.



**Figura 3.9 Dirección de las fuerzas que causaron la rotura de la pieza Rotating Gauntlet**

En la Figura 3.10 se puede observar la rotura de la pieza y en la Figura 3.11 se puede ver con detalle cómo al eliminar el soporte, la zona en la que irá encajado el tensor queda demasiado irregular y podría presentar problemas al insertar el tensor y conlleve más tiempo a la hora de preparar las piezas para el ensamblaje.



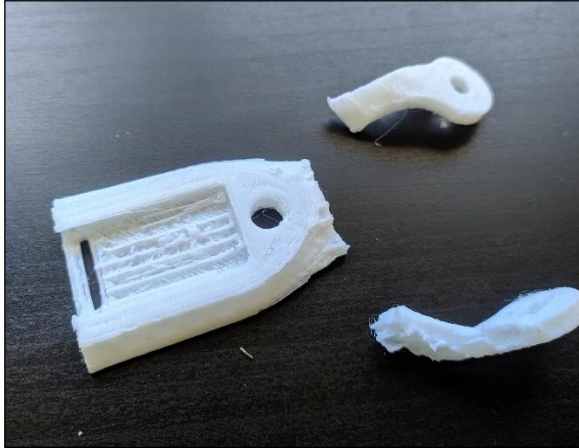


Figura 3.10 Rotura de la pieza Rotating Gauntlet

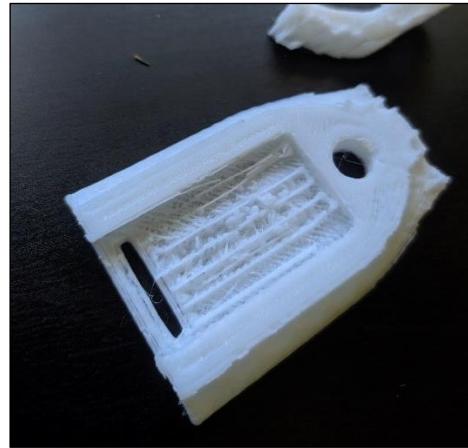


Figura 3.11 Detalle de la zona del tensor tras eliminar los soportes

### 3.1.2. Cambios en el diseño

En el caso de la unión entre las piezas Rotating Gauntlet y Fixed Gauntlet se ha propuesto una nueva solución que, como se puede observar en las Figuras 3.12 y 3.13, consta de un orificio en la pieza Fixed Gauntlet para insertar un tornillo y una nueva pieza impresa en forma de arandela que junto al tornillo harán que la pieza Rotating Gauntlet quede fijada verticalmente con la pieza Fixed Gauntlet.

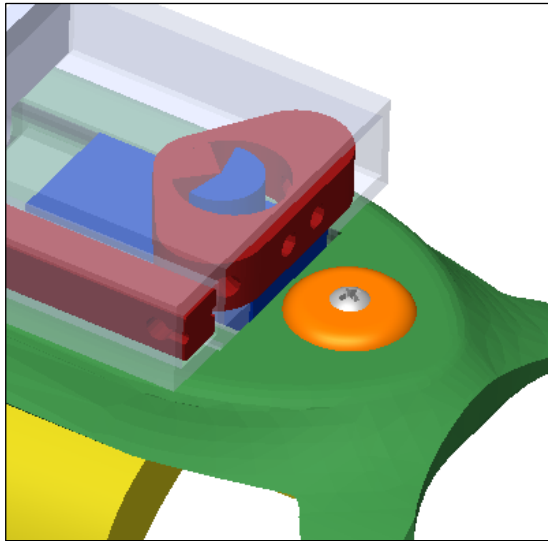


Figura 3.12 Nueva unión entre las piezas Rotating Gauntlet y Fixed Gauntlet

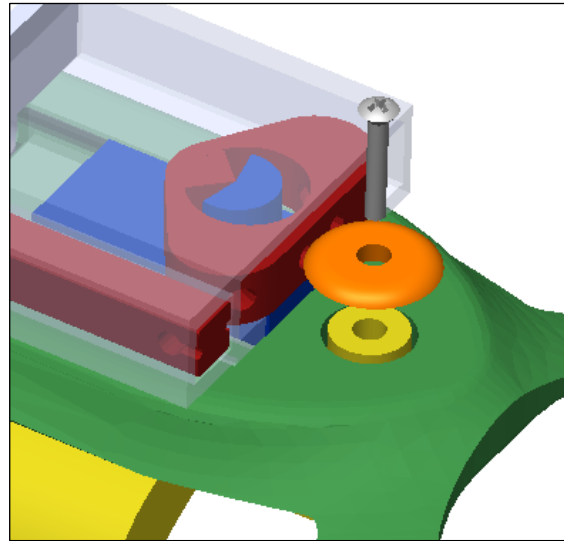


Figura 3.13 Nueva unión entre las piezas Rotating Gauntlet y Fixed Gauntlet explosionada

Para el caso de la pieza Rotating Gauntlet se dio más espesor a la zona donde había roto la pieza en la prueba anterior y se estableció el Infill a un 30% ya que, al aumentar la estructura interna de la pieza, aumentará su resistencia.

Y para mejorar la calidad final de la impresión, se cambiará la posición de la pieza, con el fin de evitar los soportes en la zona del tensor.

### 3.1.3. Impresión 3D

Una vez modificadas las piezas críticas, se procede a la impresión de todas las piezas que conforman la prótesis. Aunque sería más rápido imprimir todas las piezas a la vez repartidas por la cama de la impresora, se decidió imprimir pieza por pieza o pequeños grupos de piezas, ya que al ser la primera impresión del modelo podría haber algún fallo en alguna pieza en concreto y esto haría que fallase toda la impresión, con el malgasto de material y tiempo que esto supone.

<i>Pieza</i>	<i>Uds</i>	<i>Nombre de la pieza</i>
1	1	Palm
2	2	Knuckle pin
3	1	Thumb pin
4	5	Proximal
5	5	Finger pin
6	5	Fingertip
7	1	Fixed gauntlet
8	1	Rotating gauntlet
9	2	Wrist pin
10	2	Wrist pin cap
11	1	Gripper box
12	1	Whipple tree
13	1	Thumb tensioner
14	1	Swivel pin
15	1	Gauntlet cap

**Tabla 3.1** Listado de piezas del modelo final

Para imprimir estas piezas, se utilizaron los parámetros de impresión mostrados en la Figura 3.14 excepto para la pieza Rotating Gauntlet que se aumentó el Infill a 30%.


























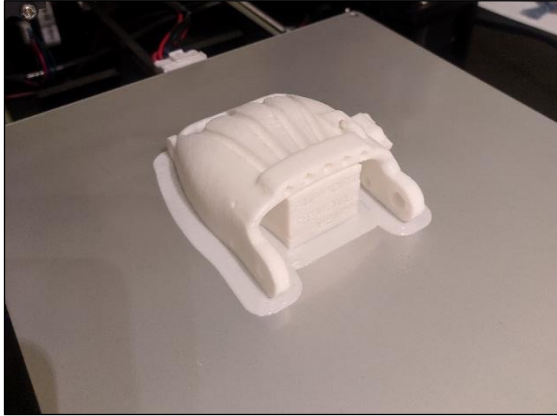
 <b>Quality</b> 		
Layer Height 	0.2	mm
 <b>Shell</b> 		
Wall Thickness	0.8	mm
Wall Line Count	2	
Top/Bottom Thickness	0.8	mm
Top Thickness	0.8	mm
Top Layers	4	
Bottom Thickness	0.8	mm
Bottom Layers	4	
Horizontal Expansion	0	mm
 <b>Infill</b> 		
Infill Density	20	%
Infill Pattern	Grid	
 <b>Material</b> 		
Printing Temperature	200	°C
Build Plate Temperature 	60	°C
Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	
 <b>Speed</b> 		
Print Speed	60	mm/s
 <b>Travel</b> 		
 <b>Cooling</b> 		
 <b>Support</b> 		
Generate Support 	<input type="checkbox"/>	
 <b>Build Plate Adhesion</b> 		
Build Plate Adhesion Type 		Brim 

Figura 3.14 Parámetros de impresión utilizados para la prótesis

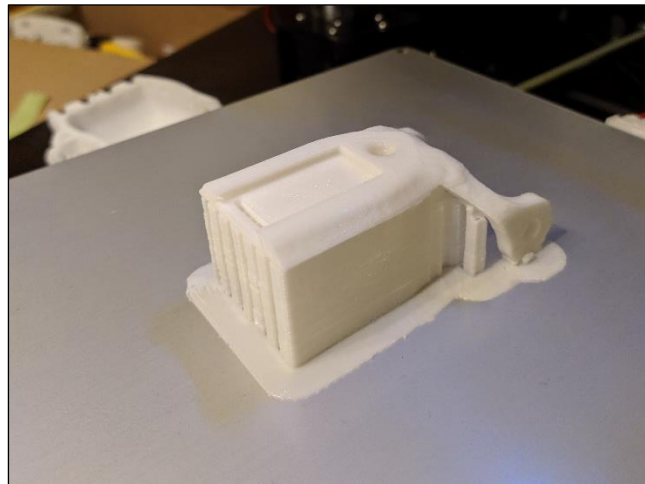


**Figura 3.15** Pieza Palm impresa con soporte



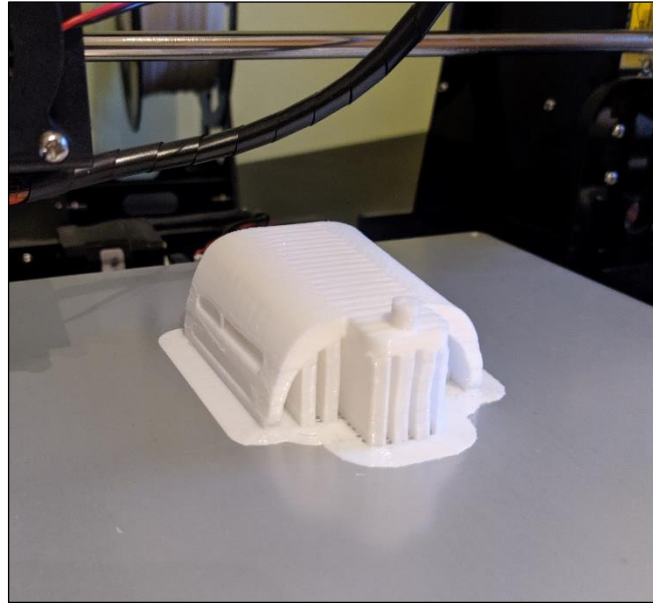
**Figura 3.16** Pieza Palm impresa después de quitar el soporte

La pieza Palm se imprimió con soporte ya que la zona central interna presentaba ángulos mayores de  $50^\circ$ . Una vez eliminado el soporte y comprobado que la pieza no ha presentado ningún fallo de impresión, se continuó con la impresión de las demás piezas.



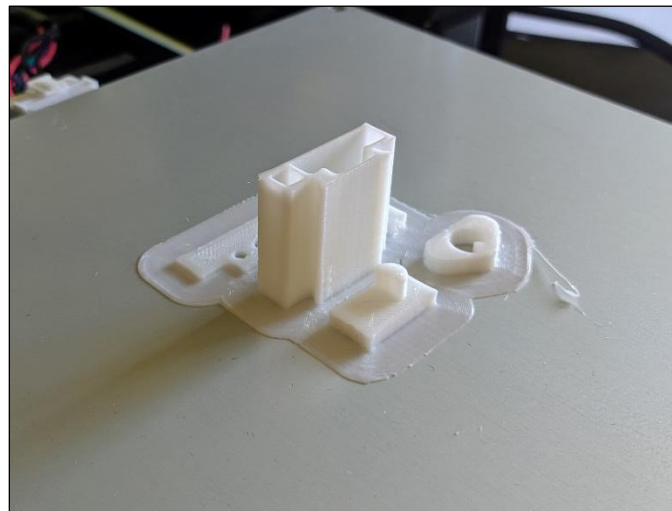
**Figura 3.17** Pieza Rotating Gauntlet impresa con soporte

Como ya se comentó anteriormente, se cambió la posición de la pieza Rotating Gauntlet para que el soporte estuviese en la parte inferior y se aumentó en Infill al 30%. Tras quitar el soporte y aplicar ciertas fuerzas en diferentes direcciones, se comprueba que los cambios han mejorado notablemente la resistencia de esta pieza.



**Figura 3.18** Pieza Fixed Gauntlet impresa con soporte

Para la pieza Fixed Gauntlet se usa soporte para la parte inferior y se vuelve a poner el Infill a 20%.



**Figura 3.19** Conjunto del tensor impreso

El conjunto del tensor se imprimió en una sola impresión. Como no se desactivó la generación automática de soporte, añadió soporte en los orificios de algunas piezas y

al ser tan pequeños, fue imposible retirarlos, por lo que tuvimos que volver a imprimir estas piezas.

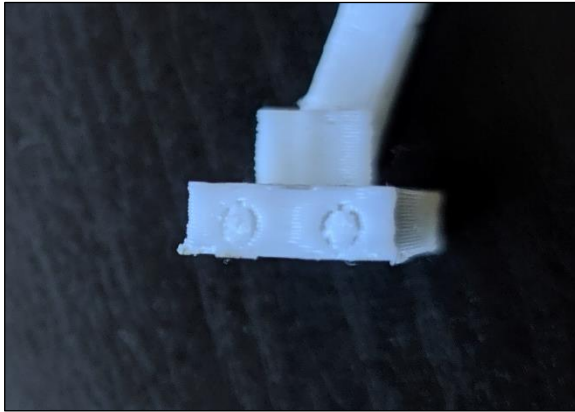


Figura 3.20 Pieza mal impresa del tensor 1



Figura 3.21 Pieza mal impresa del tensor 2

Y, por último, se procedió a imprimir el conjunto que forman los dedos de la prótesis, que no requerían de soporte adicional.

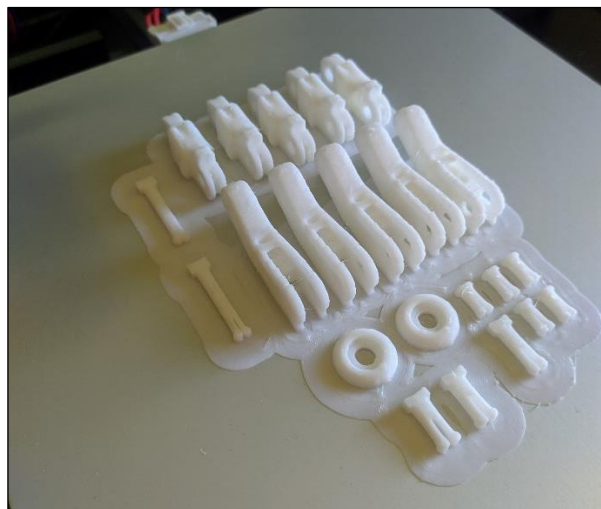


Figura 3.22 Conjunto de piezas que forman los dedos impresas

#### 3.1.4. Montaje

Una vez finalizada la impresión de todas las piezas que conforman la prótesis, se procede al montaje de esta. Empezando con la unión de las piezas Fixed y Rotating

Gauntlet con la pieza Palm con la ayuda de un tornillo. Tras este ensamblaje, se comprueba que ambas uniones funcionan perfectamente tal y como se planteó en el diseño.



**Figura 3.23 Montaje de las piezas Rotating y Fixed Gauntlet con la pieza Palm**

Y, para finalizar con el montaje de las piezas, se ensamblan el conjunto que forma los dedos de la prótesis en piezas anteriormente ensambladas.





**Figura 3.24 Montaje del resto de piezas de la prótesis**

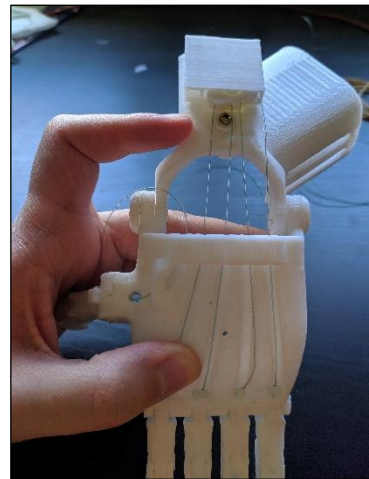
Una vez ensambladas todas las piezas, da comienzo el montaje de los cables tensores y los cables necesarios para la extensión de los dedos. Para los cables tensores se ha usado cable de nylon usado para la pesca y para los cables de la extensión de los dedos se han utilizado elásticos para el pelo.



**Figura 3.25 Elásticos y cables usados para la prótesis (cable elástico a la izquierda y cable tensor a la derecha)**



**Figura 3.26 Montaje de los cables tensores 1**



**Figura 3.27 Montaje de los cables tensores 2**

Para la colocación de los cables tensores, se comienza anudando los cables con el nudo de pesca que se muestra en la Figura 3.28 al extremo de un dedo, se pasa por la pieza Whippetree y se anuda el otro extremo del cable en el extremo del siguiente. Una vez colocados los cables tensores, se ensambla el resto del tensor.

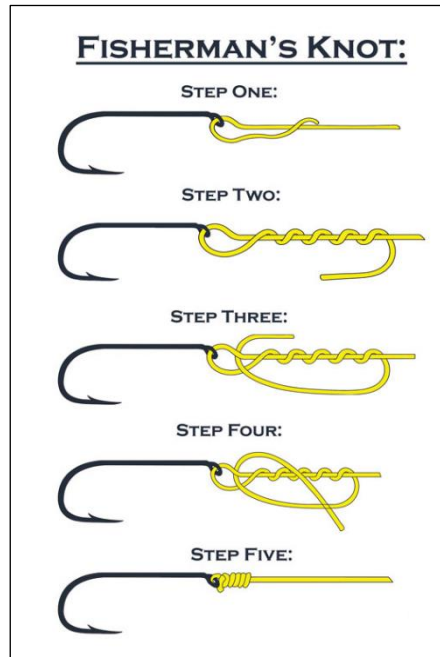
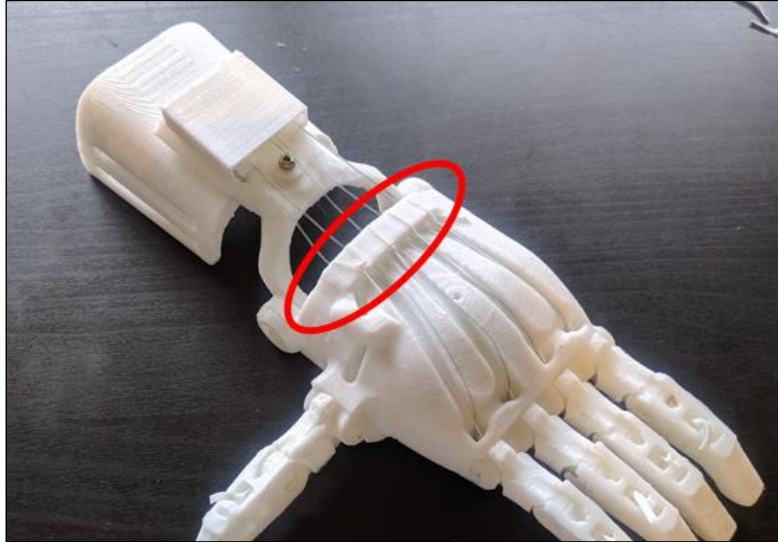


Figura 3.28 Fisherman's knot [61]

Y, por último, se colocan los cables elásticos que permitirán la retracción de los dedos. Se anudan un extremo del cable a la punta del dedo y el otro donde nos indica la Figura 3.29.



**Figura 3.29** Indicación del lugar en el que se anudan los cables elásticos

Tras varios días de uso y transcurridos del montaje, los cables elásticos comenzaron a deteriorarse y desgarrarse, por lo que se reemplazaron por los cables elásticos que aparecen en la Figura 3.30. En vez de estar anudados a en el mismo lugar que lugar que anteriormente, se unen por parejas, es decir, como se hizo con los cables tensores, se anuda un extremo del cable elástico a un dedo, y el otro extremo al siguiente.

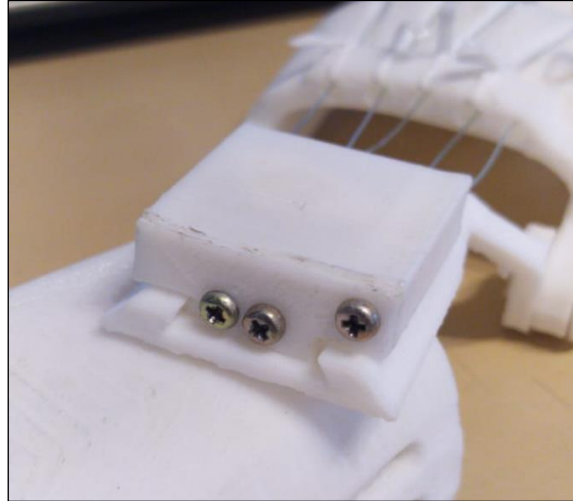


**Figura 3.30 Cambio de cables tensores**

### 3.1.5. Ajustes

Una vez finalizado el montaje de la prótesis, es necesario realizar un ajuste del tensor para que la prótesis funcione adecuadamente y permita el agarre de los objetos.

En la Figura 3.31 se puede observar los tornillos que permiten este ajuste, ya que, al girarlos en sentido horario aleja las piezas móviles de la punta de los dedos haciendo que el cable tensor esté más estirado y al girarlos en sentido antihorario produce el efecto contrario.



**Figura 3.31 Tornillos tensores**

Con este ajuste, se debe conseguir que los cables estén totalmente tensos e incluso que los dedos estén un poco flexionados, cuando la prótesis esté recta, es decir, que la pieza Fixed Gauntlet esté alineada con la pieza Palm. Permitiendo así que el mínimo giro de muñeca inicie la retracción de los dedos, ya que los miembros amputados no tienen un gran rango de movimiento.



**Figura 3.32 Prótesis con los cables tensados**

## 3.2. Análisis del resultado final

Una vez concluido el montaje y el ajuste de la prótesis se procede al análisis del resultado final y de su funcionamiento. En primer lugar, se hablará de las limitaciones del modelo original y comprobando si la solución aportada ha sido válida para erradicar dichas limitaciones.

La primera limitación que presentaba el modelo es que no permitía el giro de la muñeca en el eje de rotación de cabeceo, dificultando así algunos movimientos.

La otra principal limitación que presentaba el modelo original era el agarre de objetos irregulares, ya que el modelo impedía que los dedos de la prótesis se adaptasen a dichos objetos mediante la flexión individual de cada dedo.

Tras las modificaciones realizadas, se observa cómo la prótesis puede realizar movimientos en los ejes de rotación de cabeceo y guiñada y, como se puede observar en la Figura 3.33, el modelo propuesto para el tensor que permite la rotación sobre sí mismo funciona correctamente, permitiendo que cada dedo pueda adaptarse al contorno de objetos irregulares.



**Figura 3.33** Demostración del agarre de objetos irregulares

Otra modificación realizada es en el diseño de la fijación del tensor, ya que era demasiado voluminosa para estar en una pieza que estaría en continuo movimiento. La solución aportada es más que válida, ya que se ha podido recortar la pieza móvil, es fácil de montar y pese a que es una solución un tanto simple, cumple con su función perfectamente y el tensor no presenta ningún tipo de movimiento u holgura.

Tras varias pruebas con diferentes tipos de objetos, se han podido observar las diferentes limitaciones de esta prótesis. Por un lado, debido al limitado rango de movimiento de la muñeca, la prótesis no puede ejercer demasiada fuerza, por lo que se hace imposible el agarre de objetos algo pesados. Se necesita un rango de movimiento de unos 35º-40º para poder accionar por completo los dedos, es decir, para conseguir flexionar por completo los dedos, por lo que una persona que tenga limitado el movimiento en la muñeca puede que no sea capaz de accionar la prótesis por completo.

También se ha observado que la falta de adherencia en la punta de los dedos dificulta el agarre de objetos, ya que tienden a resbalar y aunque se aplique fuerza es difícil atraparlos.





**Figura 3.34 Demostración del agarre en un objeto cilíndrico**

Debido a la geometría de la prótesis, funciona correctamente con objetos medianos como el que se muestra en la Figura 3.34, pero presenta dificultades al intentar manipular objetos pequeños, ya que pueden deslizarse entre los dedos, y objetos muy grandes, ya que carece de un agarre que se adhiera al objeto.



## Capítulo 4. CONCLUSIONES

Con este proyecto, se pretendía desarrollar tanto el diseño como la fabricación de una prótesis funcional del conjunto mano y antebrazo mediante la tecnología de fabricación aditiva, para ello se ha podido aplicar gran cantidad de los conocimientos aprendidos durante el Grado en Ingeniería Mecánica, entre los que destacan los de la asignatura de Diseño Industrial y el uso del software de diseño en 3D.

Durante todo el proceso han surgido diferentes dificultades que se pudieron solventar convenientemente y, como conclusión, se puede afirmar que el proyecto llevado a cabo ha logrado cumplir todas las condiciones impuestas previamente al comienzo de su desarrollo, además de implementar nuevas características adicionales a las requeridas.

No obstante, de cara al futuro este proyecto puede ser ampliado y mejorado para lograr un modelo más funcional y que satisfaga todas las necesidades de un posible usuario. Algunas de estas mejoras son las siguientes:

- Mejorar el agarre o adherencia en la punta de los dedos de la prótesis. Podría usarse empuñaduras de gel para dedos llamadas Tippi, que se pueden encontrar fácilmente en Internet y, al ser de gel, mejorarían enormemente el agarre de los dedos.
- Aunque los cables elásticos funcionan correctamente, sería interesante cambiar la idea del diseño y poner pequeños elásticos en las articulaciones de los dedos como presentan otros modelos, ya que podría facilitar su montaje.
- Convertir la prótesis mecánica realizada en una eléctrica que, por ejemplo, se active al detectar cierto rango de movimiento de la muñeca y haga que los dedos se flexionen. Esto podría aumentar la fuerza que ejerce la prótesis al cerrar la mano y ayudaría a manipular objetos de mayor peso.

Por último, se debe hacer hincapié en tres detalles que el autor considera fundamental para comprender la magnitud y dificultad del trabajo desarrollado. En primer lugar, el tiempo empleado para el diseño y la fabricación de la prótesis. En segundo lugar, la relevancia del desarrollo de una prótesis de bajo coste que podría llegar a tener en países subdesarrollados. Y, en tercer lugar, el enorme desarrollo que aún queda por delante en cuanto a prótesis fabricadas mediante técnicas de fabricación aditiva.

## Apéndice A. PRESUPUESTO

Tras la finalización del proyecto, y atendiendo a todos los materiales empleados, se puede hacer un cálculo aproximado del coste total de la fabricación de la prótesis.

En primer lugar, en la Tabla A.1, se muestra el material y el tiempo empleados para imprimir cada una de las piezas. En el caso de las piezas que son fabricadas más de una vez, pues se necesitan varias unidades para el montaje de la prótesis, el tiempo y material empleados que se refleja en la tabla es el total, es decir, de todas las unidades necesarias para el montaje de la prótesis.

<i>Pieza</i>	<i>Uds</i>	<i>Tiempo de impresión (min)</i>	<i>Material empleado (g)</i>
<i>Palm</i>	1	217	39
<i>Knuckle pin</i>	2	5	1
<i>Thumb pin</i>	1	2	< 1
<i>Proximal</i>	5	62	10
<i>Finger pin</i>	5	6	1
<i>Fingertip</i>	5	79	13
<i>Fixed gauntlet</i>	1	142	31
<i>Rotating gauntlet</i>	1	89	18
<i>Wrist pin</i>	2	4	1
<i>Wrist pin cap</i>	2	7	1
<i>Gripper box</i>	1	26	4
<i>Whipple tree</i>	1	4	1
<i>Thumb tensioner</i>	1	3	1
<i>Swivel pin</i>	1	5	1
<i>Gauntlet cap</i>	1	4	1
<b>Total</b>		<b>655</b>	<b>123</b>

Tabla A.1 Coste calculado para la impresión en 3D de la prótesis

Con estos datos, se puede hacer un cálculo aproximado del coste que conlleva imprimir las piezas con una impresora 3D. Por un lado, teniendo en cuenta que las bobinas de filamento de 1Kg de PLA suelen tener un precio de unos 20€, los 123 gramos de PLA empleados para la impresión de las piezas costaría alrededor de 2,50€. Por otro lado, tomando el coste de la luz en España de unos 0,15€/kWh y que el consumo medio de la impresora 3D es de unos 0,5kW, el coste derivado de la electricidad supondría unos 0,83€. Con estos datos y los reflejados en la Tabla A.2 se calcula el precio aproximado de los materiales necesarios para la fabricación de la prótesis teniendo en cuenta que, por ejemplo, el filamento se compra en bobinas de 300g o 1Kg y no se puede obtener exactamente el requerido para la impresión.

<i>Elemento</i>	<i>Detalles</i>	<i>Coste (€)</i>
<i>Bobina PLA</i>	Bobina PLA de 300g	9,90
<i>Consumo eléctrico</i>	5.5kWh	0,83
<i>Tornillería</i>	Kit de 8 tornillos	0,59
<i>Cable tensor</i>	200m Sedal de pesca	2,19
<i>Cable elástico</i>	1m Cordón elástico extrafuerte	0,70
<b>Total</b>		<b>13,51 €</b>

**Tabla A.2 Coste total de los materiales**

El cálculo del coste total de la impresión 3D resulta en que la fabricación de la prótesis diseñada en este proyecto tiene un coste de 13.51€ aunque hay que puntualizar que se han obviado algunos costes. Por un lado, el coste de una impresora 3D, ya que hay una gama muy amplia de impresoras 3D que pueden ir desde unos 150€ hasta más de 5.000€ dependiendo de la calidad final que quieras obtener y no es necesario adquirir una para la fabricación de esta prótesis ya que hay empresas que se dedican a imprimir en 3D. Por otro lado, y posiblemente el más costoso, habría que tener en cuenta el coste humano de trabajo (€/h). Se ha decidido obviar ambos costes porque este proyecto estaría enfocado principalmente a voluntarios que ya tuviesen en su poder una impresora 3D.

En definitiva, el coste de la fabricación de la prótesis diseñada en este proyecto cumple con el objetivo definido inicialmente ya que, aun asumiendo el coste de compra de una impresora 3D, es definitivamente más económico que una prótesis convencional.





## REFERENCIAS

- [1] A. J. Thurston, "Paré and prosthetics: The early history of artificial limbs," *ANZ J. Surg.*, vol. 77, no. 12, pp. 1114–1119, 2007.
- [2] "Prosthetic toe from ancient Egypt." [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prosthetic\\_toe.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prosthetic_toe.jpg).
- [3] E. Strait, "Prosthetics in Developing Countries," *White Pap.*, no. January, pp. 1–35, 2006.
- [4] J. L. Loaiza and N. Arzola, "Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano," *Dyna*, vol. 78, no. 169, pp. 191–200, 2011.
- [5] J. C. D. Montes and J. M. D. González, "Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano."
- [6] "Clases de prótesis." [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/latecnologiaendiscapitados/clases-de-protesis>.
- [7] J. M. Dorador González, P. Ríos Murillo, I. Flores Luna, and A. Juárez Mendoza, "Robótica y prótesis inteligentes," *Rev. Digit. Univ.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–15, 2005.
- [8] "Prótesis inteligentes y mecanismos para las manos." [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos109/protesis-inteligentes-y-mecanismos-manos/protesis-inteligentes-y-mecanismos-manos.shtml>.
- [9] "Development process for the use of 3D technology in the manufacturing of custom-made prosthetic arm sockets." [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Perfect-Fit-Development-process-for-the-use-of-Strömshed/c8174ec5addbd64ee427a2d3f42b38a71daaaee5>.
- [10] A. Majdi, A. Rani, R. Fua-Nizan, M. Din, A. azeez, and A. A. Aliyu, *Manufacturing Methods for Medical Prostheses– A Review*. 2017.
- [11] M. Bucco, "La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos (prótesis, fármacos, órganos)," 2016.

- [12] R. Arnott, "The RepRap project—open source meets 3D printing," in *Computer and Information Science Seminar Series*, 2008.
- [13] "RepRap v2 'Mendel' open-source FDM 3D printer." [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RepRap\\_%27Mendel%27.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RepRap_%27Mendel%27.jpg).
- [14] "MakerBot Founders and Final Prototypes."
- [15] H. Dietz, "How many people actually own a 3D printer?," 2019.
- [16] J. Frontodona Francolí and R. Blanco Díaz, "Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D," 2014.
- [17] J. M. Jordan, *3D Printing*. MIT Press, 2019.
- [18] "Diagram of SLA printing process." [Online]. Available: <https://www.whiteclouds.com/3DPedia/vat-polymerization.html>.
- [19] "FDM diagram." [Online]. Available: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
- [20] "Powder-Bed Fusion diagram." [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-powder-bed-fusion-process\\_fig1\\_271850494](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-powder-bed-fusion-process_fig1_271850494).
- [21] "Laminated Object Manufacturing Diagram." [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated\\_object\\_manufacturing](https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing).
- [22] "Binder Jetting Diagram." [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustrating-the-binder-jetting-technique\\_fig8\\_323398955](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-illustrating-the-binder-jetting-technique_fig8_323398955).
- [23] "Material Jetting Diagram." [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process\\_fig3\\_325876280](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-material-jetting-process_fig3_325876280).
- [24] "Directed Energy Deposition Diagram." [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/#!>
- [25] H. Dodziuk, "Applications of 3D printing in healthcare," *Kardiochirurgia i torakochirurgia Pol. Polish J. cardio-thoracic Surg.*, vol. 13, no. 3, p. 283, 2016.

- 
- [26] R. Sharma, "The 3D printing revolution you have not heard about," *Retrieved March*, vol. 14, p. 2014, 2013.
- [27] "Applications of 3D printing in dentistry." [Online]. Available: <http://www.dentalproductsreport.com/dental/article/10-things-you-need-know-about-3d-printing>.
- [28] "3D Printing of Hearing Aids at Widex, Denmark." [Online]. Available: <http://disruptiveinnovation.se/?p=343>.
- [29] A. Vance, "How about them gams: 3D printing custom legs," *Bloom. Businessweek*, vol. 3, 2012.
- [30] "Made in Gaza: Project Offers Open Source, Low-Cost, Locally 3D Printed Medical Supplies." [Online]. Available: <http://3dprint.com/95097/project-glia-gaza-strip/>.
- [31] E. Rodríguez García, "Este estetoscopio impreso en 3D puede salvar vidas," 2018.
- [32] "Classic Kids Books Made Tangible For The Blind With 3D Printing." [Online]. Available: <http://3dprintingindustry.com/news/classic-books-made-tangible-blind-3d-printing-66332/>.
- [33] S. V Murphy and A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs," *Nat. Biotechnol.*, vol. 32, no. 8, pp. 773–785, 2014.
- [34] "How 3D Printing With Stem Cells Will Alter The Future Of Medicine."
- [35] I. D. Ursan, L. Chiu, and A. Pierce, "Three-dimensional drug printing: a structured review," *J. Am. Pharm. Assoc.*, vol. 53, no. 2, pp. 136–144, 2013.
- [36] "This is the first 3D-printed drug to win FDA approval." [Online]. Available: <https://www.computerworld.com/article/3048823/this-is-the-first-3d-printed-drug-to-win-fda-approval.html>.
- [37] "\$50 3D Printed Hand." [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org/2014/04/20/comparing-42000-myoelectric-vs-50-3d-printed-hands/>.
- [38] D. Seitz, "Meet Easton LaChappelle, The 19-Year-Old Luminary Building A Cheaper, Better Prosthetic Limb."

- [39] W. Donaldson, "Robotic Arm 3D Printed." [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Robotic-Arm-3D-Printed-DIY-Initial-Prosthetic-Prot/>.
- [40] M. E. Hussein, "3D Printed Prosthetic Arm," 2013.
- [41] M. E. Hussein, "3D Printed Prosthetic Arm - Solidworks Files." [Online]. Available: <https://drive.google.com/drive/folders/1e-wlQ0iiDdNyWz2fzkwzrQ9xNT1m0rEW>.
- [42] J. Gibbard, "Open Hand Project Website." [Online]. Available: [openhandproject.org](http://openhandproject.org).
- [43] J. Gibbard and S. Payne, "Open Bionics Website." [Online]. Available: [www.openbionics.com](http://www.openbionics.com).
- [44] Open Bionics, "Open Bionics Free Models." [Online]. Available: <https://openbionicslabs.com/downloads/>.
- [45] "Brunel Hand 2.0." [Online]. Available: <https://openbionicslabs.com/shop/brunel-hand>.
- [46] J. Schull, "E-Nable Website." [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org/>.
- [47] J. Schull, "Current E-Nable design files." [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org/current-design-files/>.
- [48] J. Schull, "Diseños en función del grado de discapacidad." [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org/which-design/>.
- [49] "Talon Hand 2.0." [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org/current-design-files/talon-hand-2-0/>.
- [50] "Field Ready Website." [Online]. Available: <https://www.fieldready.org/about-us>.
- [51] S. Lipsky, A. Przyjemski, M. Velasquez, and J. Gershenson, "3D Printing for Humanitarian Relief: The Printer Problem," in *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, 2019, pp. 1–7.
- [52] "Field Ready Printed Prosthetic Hand."

- 
- [53] M. Sullivan, B. Oh, and I. Taylor, "3d Printed Prosthetic Hand," 2017.
- [54] "Assembly of E-Nable's Raptor Reloaded Hand." [Online]. Available: <https://www.instructables.com/id/Assembly-of-e-NABLEs-Raptor-Reloaded-Hand/>.
- [55] "Raptor Reloaded Print." [Online]. Available: <http://thrinter.com/raptor-reloaded-print/>.
- [56] "La historia de los aviones." [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/vienenyvanenelbuelo3025/>.
- [57] "Printer Tolerance Test," 2016. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2006297>.
- [58] "Representación esquemática de las tolerancias." [Online]. Available: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1542/course/section/1990/4.2 Ajustes.pdf>.
- [59] "Ilustración visual de diferentes tipos de estructuras que requieren de soporte." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/>.
- [60] "Support patterns." [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printing-support-structures/>.
- [61] "Fisherman's knot." [Online]. Available: <https://www.mossoak.com/our-obsession/blogs/fishing/five-knots-every-fisherman-should-know>.