



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño de una Prótesis de Mano Impresa en 3D Accionada Corporalmente

Design of a Prosthetic 3D- Printed Body-Powered Hand

Autor

Eduardo Larriba Llamas

Director

Francisco Javier Medel Rezusta

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D^a. _____, en
aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de
septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el
Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,
Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
(Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser
citada debidamente.

Zaragoza,

Fdo:

AGRADECIMIENTOS

Sirvan estas líneas para agradecer a algunas personas que han sido importantes en la elaboración de este Trabajo Fin de Grado.

Mi agradecimiento a Francisco Javier Medel por haberme guiado durante estos meses que ha durado el trabajo y por haber hecho posible este proyecto.

Quiero dar también las gracias a todos los familiares, compañeros y amigos que han estado durante los cuatro años apoyándome.

Diseño de una Prótesis de Mano Impresa en 3D Accionada Corporalmente

Design of a Prosthetic 3D- Printed Body-Powered Hand

RESUMEN

Actualmente, hay multitud de personas afectadas por amputaciones en la extremidad superior o malformaciones en esta misma zona del cuerpo, que hacen necesaria una prótesis para poder realizar las tareas cotidianas. Este tipo de prótesis ortopédicas son de muy elevado coste, por ello muchos ingenieros y usuarios con conocimientos en impresión y diseño 3D han llevado a cabo múltiples diseños de prototipos en aras de intentar reducir este coste.

En este trabajo se ha realizado un estudio de numerosos artículos de investigación con el fin de encontrar el diseño más desarrollado de mano protésica realizado exclusivamente con impresora 3D. Tras hacer esta búsqueda, se han fijado los parámetros y características finales que tiene que tener una mano protésica para satisfacer la necesidad del paciente amputado, cumpliendo con las cualidades de estética, funcionalidad y ergonomía. Se ha fijado el tipo de prótesis a diseñar para amputados transradiales, ya que ésta amputación es la más frecuente dentro de las de la extremidad superior. La prótesis escogida como base para aplicar las mejoras pertinentes ha sido la *Kwawu*. A esta prótesis se le han aplicado algunas mejoras obtenidas de otros diseños de prótesis, así como otras mejoras de autoría propia, con el fin de conseguir una prótesis más funcional y con mejor estética y calidad.

Los resultados han sido satisfactorios, obteniendo una prótesis que el usuario puede imprimir en su casa de manera económica con una impresora 3D, con una buena funcionalidad, y con una estética muy similar a la de una mano humana.

CONTENIDO

1. Memoria
2. Anexo A
3. Anexo B



Universidad
Zaragoza

MEMORIA

Diseño de una Prótesis de Mano Impresa en 3D Accionada Corporalmente

Design of a Prosthetic 3D- Printed Body-Powered Hand

Autor

Eduardo Larriba Llamas

Director

Francisco Javier Medel Rezusta

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Manos Protésicas: Solución a Diferentes Problemáticas.	1
1.2 Manos Protésicas: Estado del Arte	3
1.3 Manos Protésicas: <i>Kwawu</i>	5
1.4 Limitaciones de la Mano <i>Kwawu</i> y Posibles Mejoras . . .	5
1.5 Objetivo y Alcance del Proyecto.	7
2. Metodología, Materiales y Técnicas	9
2.1 Metodología	9
2.2 Materiales.	10
2.3 Técnicas	12
2.3.1 Diseño por CAD.	12
2.3.2 Impresión 3D.	12
3. Resultados y Discusión	14
3.1 Resultados de Diseño	14
3.2 Resultados de la Impresión Dual	16
3.3 Ensamblaje y Accionamiento Mecánico	16
3.4 Recubrimientos.	17
3.5 Valoración de las Opciones de Fabricación, Ensamblaje y Acabado.	18
3.6 Pruebas.	19
3.7 Discusión	20
3.8 Incidencias durante la Realización del Trabajo. . . .	21
3.9 Propuestas Posibles de Mejora	21
4. Conclusiones	22
4.1 Conclusiones Generales	22
4.2 Posible Comercialización.	22
4.3 Experiencia adquirida	23
5. Referencias	24

Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Tipos de Amputaciones por Zonas</i>	<i>1</i>
<i>Ilustración 2. Simbraquidactilia en Mano.</i>	<i>1</i>
<i>Ilustración 3. Kwawu 2.0</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 4. Ensamblaje Mano Protésica.</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 5. Agarre Tipo Gancho</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 6. Agarre Tipo Pinza</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 7. Propiedades Mecánicas del PLA</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 8. Propiedades Mecánicas del TPU</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 9. Diseño Árbol de Agarre</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 10. Árbol de Agarre Ensamblado</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 11. Diseño Árbol de Agarre.</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 12. Árbol de Agarre Ensamblado</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 13. Adaptador Brazo-Mano.</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 14. Unión Adaptador-Prótesis</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 15. Mano Ensamblada</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 16. Parte Impresa en PLA</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 17. Diseño Prueba Dual.</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 18. Recubrimiento con Silicona</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 19. Objetos a Coger en la Prueba Realizada</i>	<i>19</i>

1. Introducción

1.1. Manos Protésicas: Solución a Diferentes Problemáticas

Según la Organización Mundial de la Salud, alrededor de tres millones de personas en el mundo han sufrido una amputación en alguna de sus extremidades superiores a lo largo de su vida. Entre todos los amputados, en cuanto a la extremidad superior se refiere (*Ilustración 1*), un 65% de ellos ha sufrido una amputación transradial [1], es decir, se le ha amputado mano y muñeca. Este tipo de amputación es mucho más frecuente que otras como la transcarpal, la de codo o la transhumeral, pero todas éstas tienen en común que dejan al paciente imposibilitado para la realización de una gran cantidad de tareas de la vida diaria.

1. Transfalangeal
2. Transmetacarpal
3. Transcarpal
4. Desarticulación de la muñeca
5. Amputación transradial (debajo del codo)
6. Desarticulación de codo
7. Amputación transhumeral (encima del codo)
8. Desarticulación de hombro
9. Amputación de clavícula

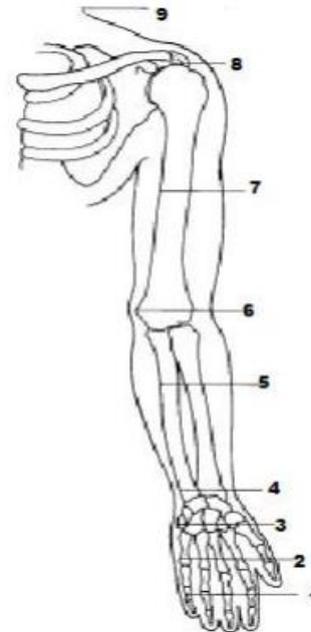


Ilustración 1. Tipos de Amputaciones por Zonas [26]

La simbraquidactilia es un tipo de malformación congénita, que hace disminuir en gran medida el tamaño de los dedos (“braqui-”) y posibilita que algunos puedan estar unidos entre sí (“sindactilia”) [2]. Según el Estudio Colaborativo Latinoamericano de Malformaciones Congénitas, tres de cada 10 000 nuevos nacidos, padecen este tipo de malformación [3], dando lugar a que no puedan desarrollar con normalidad las actividades cotidianas, al tener la mano completamente con forma de muñón (*Ilustración 2*).



Ilustración 2. Simbraquidactilia en Mano [3]

Como se ha visto, tanto las malformaciones como las amputaciones de la extremidad superior, cada vez afectan a más población convirtiéndose en un problema que requiere ser solucionado. Esta solución existe afortunadamente a día de hoy y tiene un nombre: ortopedia.

Las prótesis ortopédicas han tenido una gran evolución y actualmente cumplen con su cometido de manera notable, pero no son asequibles para todo el mundo. Este tipo de prótesis suelen alcanzar valores desde 4 000 \$ hasta 50 000 \$, lo cual hace que para muchas personas adquirir una prótesis ortopédica sea una utopía más que una realidad [4].

Todo esto hace pensar que la solución ideal a este problema todavía no está definida. Por este motivo, multitud de científicos y personas relacionadas con este mundo han decidido darle una posible solución: la impresión 3D.

La impresión 3D es un mundo que empezó en 1983 con Charles W. Hull, creando la primera pieza impresa en 3D [5]. Desde entonces, ésta ha evolucionado de tal manera que, actualmente, se puede tener una impresora en casa por un módico precio. Este desarrollo ha hecho que el diseño de piezas impresas en 3D ya no tenga ningún tipo de límites y que los materiales usados hayan evolucionado a la par obteniendo mejores propiedades físicas y mecánicas.

Este desarrollo de la impresión y diseño en 3D a nivel *amateur*, ha hecho que la comunidad “*maker*” (movimiento cultural contemporáneo que tiene como lema “Do It Yourself”, es decir, “Hazlo Tú Mismo” [6]) haya crecido mundialmente, con un progresivo número de personas desarrollando diseños y haciéndolos realidad en sus impresoras. Este crecimiento ha hecho que el problema relacionado con el excesivo coste de las prótesis ortopédicas llegara a la comunidad *maker* y ésta empezara a trazar soluciones.

El factor principal que provoca el encarecimiento de las prótesis ortopédicas es tanto el material, siendo muchas veces metales de alto valor como el titanio [7], como el método de producción. Cada individuo es diferente, y una prótesis que se adapta perfectamente a una persona puede resultarle altamente incómoda a otra. Esto hace que el método de producción tenga que ser en su mayoría personalizado dependiendo de la persona que adquiere la prótesis, encareciendo así el producto.

En este punto es donde ha empezado la Comunidad *Maker* a ofrecer soluciones, ofertando en muchas ocasiones precios hasta 10 veces inferiores a los de las prótesis ortopédicas habituales [4]. Estos precios se explican por el coste de los materiales, como PLA (ácido poliláctico) o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) (materiales típicos en la impresión 3D), los cuales van desde 15 hasta 50 euros el kilogramo, dependiendo de la calidad del producto y su proceso de fabricación [8]. Además, el hecho de que con una impresora se puedan hacer piezas, casi sin límites de diseño y a un coste muy bajo, permite que por ligeros cambios del producto en la personalización de éste no haya que cambiar el proceso de producción en su conjunto.

En el caso de las piezas impresas en 3D, lo que hace encarecer al producto es encontrar a la persona que diseñe las piezas en un software CAD, aunque este coste, añadiéndole los materiales, sigue siendo muy inferior en comparación con otros métodos de fabricación tradicionales.

Aprovechándose de todos estos beneficios, la comunidad *maker* ha realizado multitud de prototipos de prótesis, focalizándose sobre todo en la extremidad superior del cuerpo. Estas prótesis en su mayoría son de diseño libre, es decir, se pueden descargar y editar gratuitamente. Esto hace que se hayan desarrollado de manera exponencial y que, en la actualidad, si se busca en *Internet* se encuentre una cantidad enorme de diseños gratuitos preparados para ser imprimidos [9]. Hay organizaciones, como Enabling The Future [10], que incluso ofrecen este tipo de prótesis impresas en 3D de manera altruista. Sin embargo, en su mayoría, el desarrollo de las prótesis ha sido de manera individual por los usuarios.

Este desarrollo individual hace que, por una parte, haya multitud de diseños muy similares y con habilidades diferentes, pero también origina que las prótesis no

hayan evolucionado tanto como podrían haberlo hecho. Prueba de ellos es que no existen muchos grupos de investigación que se hayan centrado en ver las ventajas o inconvenientes de la gran multitud de diseños que se encuentran en Internet.

Por este motivo, se ha realizado un estudio de las diferentes manos protésicas diseñadas para poderse fabricar mediante impresión 3D y de los artículos científicos relacionados con el tema. El estudio se ha centrado en las prótesis con accionamiento corporal, es decir, cuyo movimiento es producido de manera mecánica por medio del cuerpo, dejando a un lado las prótesis con accionamiento electrónico.

1.2. Manos Protésicas: Estado del Arte

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha realizado una revisión de la literatura disponible acerca de las prótesis de extremidad superior. A continuación, se han mencionado los aspectos más importantes de los artículos que más relevancia han tenido en el desarrollo del trabajo realizado. Cada artículo se ha resumido individualmente.

- En el trabajo realizado por Cuellar y colaboradores, se ha presentado una mano protésica fabricada completamente con impresión 3D. Ésta prótesis es impulsada corporalmente y se ayuda de un cable de tipo bowden (acero trenzado) para transmitir el movimiento. Esta prótesis no está diseñada para ningún tipo de amputación en concreto. (Cuellar, Smit, Breedveld, & Plettenbur, 2019) [11]
- En la Conferencia Internacional de Innovación en la Ingeniería y la Ciencia (IGSES), se ha presentado una prótesis para pacientes con malformaciones en la mano (simbraquidactilia). La prótesis se ha ensamblado con diferentes tipos de materiales, imprimiéndolos en 3D por separado. Se ha utilizado un escáner 3D para personalizar la prótesis dependiendo del paciente. (Mohammad Azeeb, Wan Fatimatul Aifaa, Helmi, & Abdul Halim, 2019) [2]
- Investigadores chilenos han hecho un estudio con un grupo de pacientes amputados para saber los requerimientos y detalles a mejorar de la prótesis *Cyborg Beast*. (Giaconia, y otros, 2019) [12]
- En el trabajo realizado por Charbel y colaboradores, se ha realizado un estudio del TPU (poliuretano termoplástico) como material elastomérico para poder añadir en una prótesis, sus propiedades dependiendo de la geometría. (Charbel, Geoffrey, Marc, & Gursel, 2019) [13]
- Investigadores de la universidad de Qatar han hecho un estudio de la posición natural de la mano humana y han diseñado la prótesis fijándose en ésta. Han utilizado material de mayor rigidez (PLA) y elástico (TPU) para fabricar la prótesis, imprimiendo los materiales por separado. (Farah, Elsadig, & John-John, 2019) [3]
- En la conferencia internacional de bioinformática y bioingeniería, se ha presentado una prótesis con posibilidad de edición desde un fichero Excel. Esto se ha logrado con la ayuda de escáneres 3D y realizando una parametrización de la mano humana. La prótesis está diseñada para amputaciones transcarpales y posee un recubrimiento de silicona en los dedos para facilitar el agarre. (Marlene, Rodrigo, Midori, & Renato, 2018) [14]
- En el trabajo realizado por Jhon-Jhon y colaboradores, se ha fabricado una prótesis pasiva con impresora 3D, recubierta con silicona para acabar con un

aspecto muy similar a una mano humana. Esta prótesis se ha realizado para amputaciones con desarticulación de codo. (John-John, M. Khaleel & Nitish, 2018) [4]

- En el libro presentado por Jelle ten Kate y colaboradores, se ha hecho un estudio de artículos y prótesis de diseño libre. Se han analizado características físicas y mecánicas así como diseños, precios y funcionalidad. (Jelle ten, Gerwin, & Paul, 2017) [15]
- Investigadores españoles han diseñado una prótesis impresa en 3D, no específica para una amputación en concreto. Han usado sensores para medir las fuerzas que se pueden aplicar en cada dedo. (Immaculada & Antonio, 2017) [16]
- Desde la universidad de Taiwan, se ha presentado la organización *Enabling The Future*. Se explican las labores que ésta desempeña y se expone el caso de un paciente que ha sido ayudado por la organización. (Wu & Shieh, 2016) [17]
- En el trabajo realizado por Zuniga y colaboradores, se ha realizado un estudio de la mano protésica *Cyborg Beast* como alternativa a las prótesis ortopédicas comerciales de alto valor. (Zuniga, y otros, 2016) [18]
- Investigadores estadounidenses han hecho un análisis de las diferentes propiedades de materiales elásticos, dependiendo de su estructura de impresión y han implementado en una mano protésica accionada electrónicamente. (W. O'Brien, y otros, 2018) [19]
- En el trabajo realizado por Rui y colaboradores, se ha diseñado una mano protésica con un recubrimiento de un material elastomérico. La prótesis es accionada de manera electrónica. (Rui, Pedro, Anibal , Mahmoud , & Carmel , 2017) [20]

Todas las prótesis analizadas tienen cables y cordones, ya sean rígidos o elásticos, como elementos flexores y extensores de los dedos. Todas las prótesis tienen también una distribución de fuerzas igual, es decir, con este tipo de prótesis no se pueden mover los dedos de manera independiente, sino todos a la vez.

En cuanto a las propiedades cinemáticas, en general los grados de libertad oscilan entre 10 y 15. En la mayoría de prótesis el agarre no es adaptativo, es decir, la mano no se adapta al objeto a agarrar. Mayoritariamente, las prótesis son capaces de realizar agarres de fuerza y agarres laterales, como por ejemplo en el caso de tomar botellas de agua u objetos cilíndricos. Es menos frecuente el agarre de precisión, que se necesita para usar un cubierto o coger una canica. El agarre que menos se ha implementado en las manos protésicas es el de gancho, es decir, habiendo un objeto con una forma no definida en una superficie, cogerlo de manera vertical, como si se tratase del gancho de una de las máquinas recreativas de las ferias.

En su mayoría, las prótesis están hechas con impresoras FDM, es decir, modelado por deposición fundida. Este tipo de impresoras son las más baratas y comunes del mercado y también se han utilizado en este Trabajo Fin de Grado. Los materiales mayormente usados son el PLA y el ABS, polímeros rígidos. Otros materiales usados, aunque en menor cantidad, son el Filaflex o Ninjaflex, nombres comerciales para el polímero flexible TPU. Este material es usado como elemento articular, es decir, se usa para sustituir las articulaciones del cuerpo aprovechando sus propiedades elásticas.

1.3. Manos Protésicas: *Kwawu*

De entre todas las prótesis estudiadas tanto en artículos como en portales web, la que más ha destacado ha sido la *Kwawu 2.0* [21] (*Ilustración 3*).

Esta mano protésica es de las más desarrolladas que se pueden encontrar. La forma es muy similar a la de una mano humana en reposo (se puede apreciar en el diseño 3D de la mano que ésta ha sido obtenida mediante escáner 3D y se ha realizado un proceso de ingeniería inversa posterior). La funcionalidad que alcanza este modelo de mano protésica es de alto grado, como se puede apreciar en vídeos del propio creador [22].



Ilustración 3. Kwawu 2.0 [23]

En siguientes apartados se analizará esta prótesis con mayor profundidad.

1.4. Limitaciones de la Mano *Kwawu* y Posibles Mejoras

Para orientar el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha realizado un análisis en profundidad de la prótesis *Kwawu* para encontrar las posibles limitaciones y puntos fuertes de este diseño de mano protésica.

Para analizar más detalladamente esta prótesis, la mano *Kwawu* ha sido fabricada con una impresora *Ender 3*, permitiendo el análisis exhaustivo del acabado, proceso de ensamblaje, así como de su funcionalidad, basándose en la observación directa de un modelo físico. De esta manera, se ha obtenido una buena imagen de la prótesis, teniendo en cuenta que el objetivo es que el usuario la imprima él mismo y la ensamble con facilidad. Los materiales, el coste y el tiempo invertido en realizar esta primera impresión 3D se ha desarrollado más adelante en el apartado segundo del trabajo.

En cuanto al diseño 3D se refiere, se ha visto que la prótesis *Kwawu* ostenta una forma muy similar a una mano humana en su estado de reposo, por lo que en cuanto a la apariencia, ésta ha cumplido correctamente con los requerimientos del usuario.

Después del ensamblaje de la prótesis [24], se han hecho algunas pruebas sencillas agarrando objetos cotidianos de diferentes formas. Tras estas pequeñas pruebas, se han obtenido las siguientes conclusiones.

Al estar la prótesis impresa con PLA, un material rígido, ha tendido a deslizarse al intentar coger otros objetos rígidos. Esto se ha debido a que la superficie de contacto entre las dos superficies rígidas (la superficie de la mano y el objeto) ha sido muy pequeña, por lo cual han acabado resbalando. La mano humana, al tener la piel y los músculos, se acomoda con gran facilidad a la forma del objeto a tomar. Así, ha surgido un primer problema: el agarre en objetos rígidos.

Por otra parte, al ensamblar la prótesis, la tensión de los cables y la colocación del árbol de agarre (color verde en la *Ilustración 4*) ha sido vital para que la prótesis haya tenido un buen funcionamiento. Como se ha visto en la *Ilustración 4*, el diseño

del árbol de agarre, hace que el ensamblaje sea complejo y que dependiendo de su posición, unos dedos hayan ejercido más fuerza que otros. De esta manera, para un usuario que simplemente quiere montar la prótesis rápidamente y usarla, se ha visto como una molestia el tener que hacer pruebas hasta conseguir un ensamblaje perfecto.

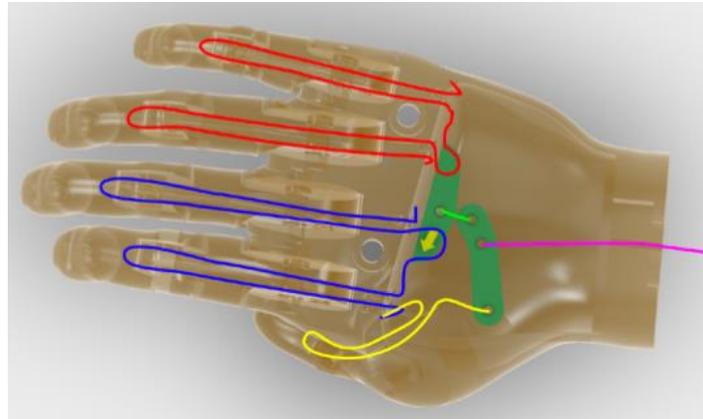


Ilustración 4. Ensamblaje Mano Protésica [25]

Una vez analizadas las deficiencias de la prótesis escogida, se ha realizado un análisis de los requerimientos más importantes de los pacientes amputados [12], para ver las posibles mejoras a realizar en la prótesis *Kwawu*.

Cuando un paciente que nunca ha usado una prótesis obtiene una, la finalidad que éste busca es volver a su situación de funcionalidad previa a la amputación u obtener una funcionalidad mejor que aquella con la que nació. Es por esto que las expectativas del paciente son muy elevadas y difíciles de cumplir por las prótesis. Hay varios puntos a evaluar dentro de los requerimientos que el paciente considera más importantes. A continuación se han evaluado por orden de importancia.

En primer lugar, la imagen. Sorprendentemente para muchos técnicos e ingenieros, la estética tiene mayor importancia que la funcionalidad. Hay usuarios que prefieren incluso una prótesis pasiva a una activa que sea antiestética. Esto se debe a que la prioridad de los pacientes es “ser uno más”. Muchos amputados llevan mucho tiempo considerándose “el bicho raro”, y con prótesis de colores llamativos o con formas robóticas se sienten incluso más incómodos que sin prótesis. Por estos motivos, las prótesis, tanto en color como en forma y tamaño, deben asemejarse a una mano humana.

En segundo lugar, la funcionalidad. La prótesis tiene que ser capaz de coger la inmensa mayoría de objetos de uso cotidiano: botellas, vasos, cubiertos, objetos pequeños, etc... Los pacientes alegan que una prótesis que no tenga la funcionalidad mínima como para aprehender los objetos de uso habitual, dificulta más que ayuda.

En tercer lugar, la ergonomía. Muchos usuarios dejan de usar sus prótesis porque no se acoplan de manera adecuada con la zona amputada: les hace rozaduras, les pesa mucho o el tacto es muy malo. Que la prótesis se ajuste a la zona amputada de manera correcta y tenga el tacto de una mano natural es algo muy solicitado por los pacientes.

En resumen, la prótesis tiene que ser una mejora para la vida del paciente y no un impedimento o una carga extra con la que lidiar.

1.5. Objetivo y Alcance del Proyecto

En este contexto, ha surgido la inquietud de poder hacer una agrupación de las prótesis mejor diseñadas, las más funcionales y las que más gustan a los pacientes, e intentar, partiendo de prótesis *Kwawu* como base, hacer alguna mejora para aportar ese conocimiento común que muchas veces el diseñador *maker* no tiene, o bien porque no le interesa y simplemente quiere hacer el trabajo por *hobbie*, o bien porque no está entre sus objetivos. En resumen, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado ha sido proponer un diseño de una prótesis de sencillo ensamblaje, buena funcionalidad, precio económico y sencilla fabricación.

Se ha decidido que el tipo de prótesis en la cual se ha centrado el proyecto, va a ser para amputados transradiales, siendo la prótesis mecánica. Esta elección se debe a los factores descritos a continuación.

En primer lugar, se ha decidido centrarse en la extremidad superior del cuerpo, ya que la impresión 3D, a nivel de usuario no profesional, todavía no dispone de materiales con especificaciones suficientes de tracción, compresión o fatiga necesarias para fabricar prótesis para las extremidades inferiores del cuerpo, ya que en su mayoría son materiales poliméricos.

En segundo lugar, se ha decidido centrarse en las prótesis realizadas para amputaciones transradiales, puesto que son las más frecuentes dentro de las amputaciones realizadas en las extremidades superiores.

En tercer lugar, se ha decidido focalizarse en las prótesis accionadas corporalmente, es decir, prótesis mecánicas cuyo movimiento es accionado por alguna parte del cuerpo del usuario. Se ha decidido así por varios motivos. El primer motivo es que, hoy en día, existe tecnología suficiente como para poder crear una prótesis que esté accionada electrónicamente, por ejemplo, con pequeños motores accionados por impulsos musculares mediante electromiografía (EMG). Pero esta tecnología, para que sea realmente funcional, conlleva mucho dinero y si se adquiere de manera económica es de mala calidad, produciendo ruidos y siendo muy poco funcional [27-30]. El segundo motivo es que si se estropea el arreglo es más complejo y sofisticado, ya que la programación de componentes electrónicos y la circuitería requieren de conocimientos profesionales. El tercer motivo es que el ensamblaje de la prótesis con sus componentes electrónicos es mucho más complejo que el de la prótesis sin éstos, lo cual se contrapone a la dirección del objetivo de facilitar el ensamblaje de la prótesis.

Teniendo los tres factores en cuenta y habiendo analizado las limitaciones de la prótesis *Kwawu*, así como las mejoras que solicitan los pacientes, se han identificado las características que debe tener un diseño de mano protésica y que han sido tenidas en cuenta en el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, las cuales expondremos a continuación.

Es esencial que el diseño de la mano protésica, es decir, la forma de ésta, se asemeje a la de una mano humana, ya que es el requerimiento principal de los pacientes.

El tacto de la mano ha de ser “blando” por fuera y “duro” por dentro, es decir, tiene que asemejarse al tacto que tiene una mano humana, diferenciándose entre las capas de piel y músculos (capa elástica) y el hueso (capa rígida). Este requerimiento

es necesario para el correcto agarre y adaptación de la mano protésica a los objetos que se van a tomar y para seguir en la línea de asemejarse a una mano humana.

La mano protésica se tiene que poder amoldar correcta y fácilmente al paciente, y tiene que ser lo más ligera posible, ya que al ser un objeto externo al cuerpo que se va a tener que llevar la mayor parte del día, tiene que ser cómodo y liviano llevarlo.



Ilustración 5. Agarre Tipo Gancho [31]

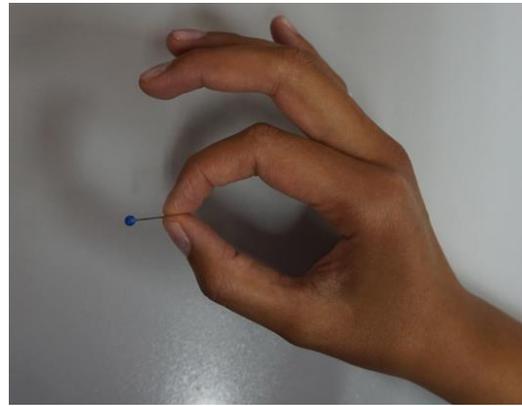


Ilustración 6. Agarre Tipo Pinza [32]

Ha de tener, al menos, cuatro diferentes tipos de agarres esenciales. El agarre de fuerza, para poder levantar objetos más pesados. El agarre lateral, para poder levantar objetos cotidianos como un vaso de agua. El agarre de precisión, para poder coger objetos pequeños, como pueden ser cubiertos, lápices u otros objetos cotidianos. Y, por último, el agarre del gancho (*Ilustración 5*), para poder coger objetos desde una superficie plana, por encima de ellos. Para que estos cuatro tipos de agarres se hagan correctamente, habrá que prestar especial atención al agarre tipo pinza (*Ilustración 6*) entre el pulgar y el índice, el cual es base de todos los agarres.

2. Metodología, Materiales y Técnicas

2.1. Metodología

En el presente Trabajo Fin de Grado, se han seguido los pasos que se detallan a continuación en orden cronológico:

- Revisión de la literatura de manos protésicas impresas en 3D (Semanas 1-2).
- Selección de mano a diseñar y elección de los materiales de la misma (Semanas 2-3).
- Pruebas de impresión con los materiales elegidos (Semanas 2-4).
- Diseño de la mano en software CAD (Semanas 3-6).
- Impresión del prototipo (Semanas 6-8).
- Montaje de la mano (Semanas 8-10).
- Pruebas finales de funcionalidad (Semanas 10-14).
- Escritura de la memoria (Semanas 3-15).

Como ya se ha mencionado en la introducción, el primer paso en este Trabajo Fin de Grado ha sido la revisión de la literatura científica y técnica sobre manos protésicas. La principal fuente de consulta ha sido la base de datos *Scopus* [33] que recoge las publicaciones de mayor relevancia en la investigación científica. Tras la revisión de la literatura, se ha seleccionado la prótesis (*Kwawu*) por ser de fácil fabricación por impresión 3D y ofrecer unas buenas características desde el punto de vista del paciente. Asimismo, el análisis de la mano *Kwawu* ha permitido identificar aspectos susceptibles de mejora que pueden ser fácilmente implementables.

Se ha seguido rediseñando la prótesis en software CAD, partiendo del diseño escogido anteriormente e incluyendo planteamientos de otras prótesis.

Después, se han elegido los materiales con los que se ha ensamblado la prótesis, haciendo pruebas entre ellos, tanto los usados para impresión 3D, como para el ensamblaje de la prótesis. Una vez se ha obtenido el diseño completo de la prótesis con sus accesorios, se ha procedido a la impresión de éstos y su posterior ensamblaje.

Cuando la mano protésica se ha ensamblado correctamente, se han realizado diversas pruebas de funcionalidad para poder evaluarla y se ha acabado escribiendo una breve memoria del trabajo realizado.

Todas estas tareas no se han llevado a cabo de manera secuencial, sino concurrente. Esto quiere decir que, por ejemplo, a la vez que se ha estado imprimiendo una parte del diseño de la prótesis, se ha podido estar haciendo cambios en el diseño y mejoras, ya que diseñar una prótesis que cumpla los requerimientos a la primera es algo muy complejo.

Como material adicional, se han usado diferentes herramientas o componentes para acabar de ensamblar la prótesis de manera correcta, tales como alicates o pistolas de silicona.

2.2. Materiales

En esta sección se han repasado las principales características de los materiales utilizados para fabricar por impresión 3D la mano protésica, así como las herramientas usadas y los costes de ello.

Para las impresoras, se ha usado como material el PLA y el TPU, siendo el PLA un material rígido y el TPU un material flexible. Se pueden ver las propiedades mecánicas de los materiales en las *Ilustraciones 7 y 8*.

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-
Dureza	83 (Shore D)	Durómetro

Ilustración 7. Propiedades Mecánicas del PLA [34]

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	26,0 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la deformación	8,6 MPa	ASTM D638
Esfuerzo de tracción a la rotura	39,0 MPa	ASTM D638
Alargamiento a la deformación	55,0 %	ASTM D638
Alargamiento a la rotura	580,0 %	ASTM D638
Resistencia a la flexión	4,3 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	78,7 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	34,4 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-
Dureza	95 (Shore A) 46 (Shore D)	ASTM D2240 Durómetro

Ilustración 8. Propiedades Mecánicas del TPU [35]

Estas propiedades mecánicas se han medido con unos parámetros de impresión concretos obtenidos de la compañía *Ultimaker*, los cuales se pueden ver en el Anexo B. Dependiendo de los parámetros de impresión, las propiedades pueden variar, por lo que las propiedades vistas en las *Ilustraciones 7 y 8* sirven para saber cualitativamente el comportamiento del material, pero en ningún caso podemos tomar estos valores como absolutos.

Cabe destacar de entre las propiedades del PLA su dureza, que es casi el doble de la dureza del TPU. Destacar también el módulo de elasticidad y el módulo de flexión del PLA los cuales son dos órdenes de magnitud superiores respecto del TPU. A su vez el TPU tiene un alargamiento a la rotura dos órdenes de magnitud superior al PLA.

Otros materiales usados en el ensamblaje de la mano protésica, han sido los cables/cuerdas que se han utilizado para darle movimiento a la prótesis. Se han utilizado seis tipos diferentes de materiales para poder darle las características apropiadas a la prótesis. Estos materiales han sido:

- Acero trenzado de 1.5 milímetros de diámetro, recubierto de PVC transparente.
- Algodón encerado de 1 milímetro de diámetro.
- Nylon trenzado de 1 milímetro de diámetro.
- Caucho de 1.5 milímetros de diámetro.
- Silicona de 1 milímetro de diámetro.
- Goma elástica recubierta de cuerda de 1 y 1.5 milímetros de diámetro.

Se ha usado también silicona termofusible en formato barra para realizar recubrimientos y fijar algunas zonas de la prótesis. Para fundir la silicona se ha utilizado una pistola caliente de uso doméstico [23].

A continuación, se muestra una tabla con los precios de los materiales y el lugar de donde se han obtenido.

Material	Precio	Referencia
PLA Ultimaker	46.59 €/Kg	[36]
TPU Ultimaker	95.99 €/Kg	[37]
PLA Creality	15.61 €/Kg	[38]
TPU Creality	34.64 €/Kg	[39]
Cable Acero - PVC	0.20 €/metro	[40]
Cable Algodón Encerado	0.15 €/metro	[41]
Cable Nylon Trenzado	0.10 €/metro	[42]
Cable Caucho	0.25 €/metro	[43]
Cable Silicona	0.15 €/metro	[44]
Cable Goma Elástico	0.20 €/metro	[45]
Barras Silicona	4.05 €	[46]

Excluyendo el precio de las impresoras y de los software utilizados, el precio a pagar por los materiales de la prótesis ha sido de 220-230 €; este valor, incluyendo todos los materiales adquiridos para estimar si eran los oportunos y los materiales definitivos usados.

2.3. Técnicas

2.3.1. Diseño por CAD

Los software CAD utilizados en este Trabajo Fin de Grado han sido, de la familia de *Autodesk* (Estados Unidos), el programa *Inventor Professional* [47] y, de la familia de *Siemens* (Alemania), el programa *Solid Edge* [48]. Se han utilizado indistintamente dependiendo de las operaciones que se han realizado en los sólidos a diseñar o editar. En las operaciones realizadas mediante modelado sólido se ha utilizado el programa *Inventor* y para el modelado de superficies se ha preferido usar *Solid Edge*. Ambos software CAD se han usado en modelado ordenado (modelado indirecto) para poder editar *a posteriori* las operaciones realizadas.

Se ha tenido que usar el diseño CAD para dos fines. El rediseño del árbol de agarre y del adaptador mano-brazo, ambos modelos partiendo desde cero. En segundo lugar se han utilizado los programas de diseño asistido por ordenador para modificar la mano protésica y poder imprimirla con materiales diferentes. En este caso, han predominado las operaciones booleanas a la hora de realizar las modificaciones en los programas informáticos indicados.

Uno de los aspectos que se ha contemplado a la hora de proponer un diseño mejorado para la mano protésica ha sido usar un material menos rígido que el PLA, para que, de esta manera, el tacto de la prótesis pueda asemejarse al de una mano humana. Además, a la ventaja anterior se le suma que, al usar un material elástico, puede verse incrementada la superficie de contacto entre la prótesis y el objeto rígido a coger. Sin embargo, enseguida resultó evidente que diseñar y fabricar toda la prótesis en su conjunto con materiales elásticos podría hacerle perder la rigidez necesaria, implicando que no tenga la capacidad de agarrar ningún tipo de objeto pesado. Por ello, la prótesis a diseñar ha combinado materiales elásticos con materiales rígidos.

Tras haber acabado los diseños anteriores, se ha procedido a realizar la programación de los parámetros de impresión pertinentes e imprimir las piezas diseñadas.

2.3.2. Impresión 3D

El software usado para editar los parámetros de impresión ha sido, de la familia de *Ultimaker* (Países Bajos), el programa *Cura* [49]. Éste cuenta con más de 500 parámetros de impresión a editar y se ha ajustado a los requerimientos exigidos.

Las impresoras a utilizar para fabricar la prótesis, han sido la *Ultimaker 3 Extended* [50], la cual tiene la posibilidad de utilizar una extrusión dual, y la *Creality Ender 3* [51], la cual solo dispone de un extrusor. Ambas impresoras son de tipo FDM, es decir, Moldeado por Deposición Fundida, y de uso casero. La impresora más económica es la *Creality Ender 3*, con un rango de precios de entre 170 y 180 €. La *Ultimaker 3 Extended* oscila entre los 3500 y 4500 €, por lo que, en relación con su precio, tendrá mejores propiedades y calidad de impresión.

Los parámetros escogidos para imprimir las piezas se han mostrado en el Anexo A. De entre todos los parámetros editados, los correspondientes a la

retracción, las velocidades de impresión y las temperaturas han sido los más importantes de cara a obtener piezas con mayor calidad.

Con respecto a la retracción, al imprimir con TPU se ha optado por bajar los valores de *Distancia de Retracción* y *Velocidad de Retracción*. Esto se ha hecho ya que, al ser un material elástico, no soporta altas velocidades de extrusión. Por el contrario, si se observan los valores tomados para el PLA, se puede ver que se han escogido los valores que el programa suministra por defecto.

Las velocidades de impresión han sido esenciales a la hora de lograr una buena calidad en las piezas. Se ha optado por unas velocidades bajas en líneas generales, para conseguir una mejor calidad superficial en la pieza y se han bajado más todavía las velocidades en el caso de impresión con TPU.

Con respecto a la temperatura, tanto en el caso del PLA como en el caso del TPU, se ha optado por calentar el plato de impresión hasta 80 °C y el extrusor hasta 220 °C. Se ha escogido esta temperatura de cama caliente ya que, teniendo en cuenta una hipotética impresión dual, esta temperatura es lo suficientemente elevada como para poder imprimir de manera correcta. Además, esta temperatura asegura un buen pegado a la cama caliente del material a utilizar. Con respecto a la temperatura del extrusor, se ha escogido el valor anterior para que ambos dos materiales se impriman de manera fluida pero sin excederse para evitar goteo en los desplazamientos.

A la hora de imprimir las piezas con la impresora de un solo extrusor, no se ha presentado ningún problema y las piezas han sido correctas en cuanto al acabado superficial y calidad solicitada.

Para poder imprimir con la impresora de doble extrusión, se ha habilitado un parámetro extra (Anexo A), para favorecer la calidad de la pieza y evitar la deposición de filamentos de arrastre. Este parámetro ha sido la *Torre Auxiliar*, la cual ha favorecido que al imprimir la pieza en cuestión, el hilo se haya impreso correctamente disminuyendo el impacto de la retracción elevada por el cambio de tobera.

3. Resultados y Discusión

3.1. Resultados de Diseño

La primera de las piezas que se diseñó fue el árbol de agarre, puesto que era la pieza más sencilla. Se ha rediseñado un árbol más compacto para que de esta manera sea más sencillo el ensamblaje (*Ilustraciones 9 y 10*). Se ha diseñado de una sola pieza en vez de en dos, pensando que el ensamblaje sea más sencillo para el usuario.

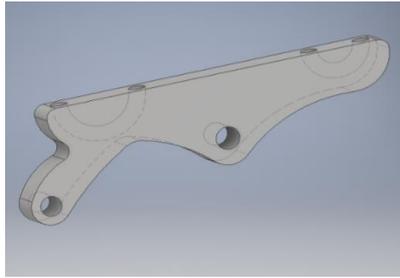


Ilustración 9. Diseño Árbol de Agarre



Ilustración 10. Árbol de Agarre Ensamblado

Alternativamente, se ha realizado un segundo diseño para poder comparar entre ambos y escoger el más adecuado. Se ha construido más compacto intentando preservar las medidas de anchura, como se puede apreciar en las *Ilustraciones 11 y 12*.

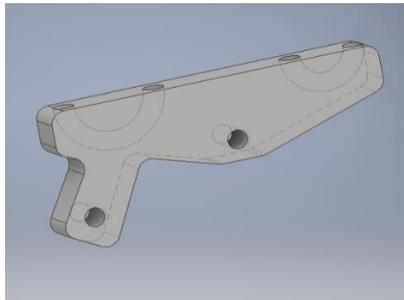


Ilustración 11. Diseño Árbol de Agarre



Ilustración 12. Árbol de Agarre Ensamblado

Tras el diseño del árbol de agarre, se decidió seguir por el adaptador mano-brazo. Este adaptador tiene dos funcionalidades. La primera es la de unir la prótesis con la zona amputada del paciente. La segunda es la de adaptarse de la mejor manera posible al muñón del paciente, sin producirle molestia alguna. Con estas dos condiciones de funcionalidad se ha procedido a elaborar el diseño mejorado.

Se ha pensado fabricarlo con material flexible (TPU) para que se pueda adaptar de manera sencilla al paciente, permitiendo cierta capacidad de movimiento a la mano protésica. Se ha añadido una oquedad interior para que el cable tensor pueda pasar por el interior del adaptador sin romper la estética de la prótesis. Se puede ver detalladamente en la *Ilustración 13*.

El adaptador se ha unido a la mano protésica mediante un tornillo, cuya cabeza ha ido alojada en una oquedad hexagonal en la mano protésica (*Ilustración 14*). El tornillo se ha roscado en su punta haciendo de esta manera presión para que el adaptador tenga un buen fijado con la prótesis. Tanto el tornillo como la tuerca han sido impresos en 3D.

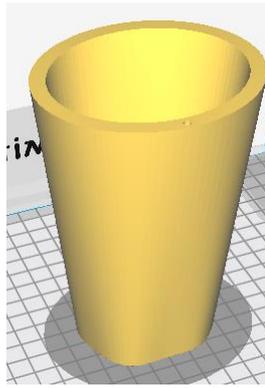


Ilustración 13. Adaptador Brazo-Mano

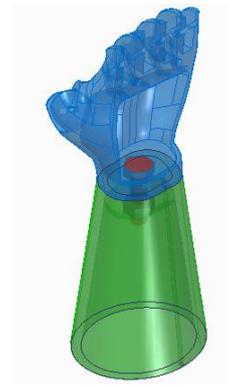


Ilustración 14. Unión Adaptador-Prótesis

Una vez finalizadas las dos nuevas piezas, se ha empezado a rediseñar la mano protésica partiendo del diseño CAD de ésta. Se ha realizado un diseño para poder imprimirse en una misma impresora de un solo extrusor.

En el diseño final, como se puede ver en la *Ilustraciones 15 y 16*, se ha optado por imprimir con TPU (Color morado) los finales de los dedos y parte de la zona baja de la palma de la mano.



Ilustración 15. Mano Ensamblada



Ilustración 16. Parte Impresa en PLA

Los dedos se han diseñado con una oquedad en el interior para conectar la parte de la prótesis impresa con TPU, con la zona impresa con PLA (Color amarillo). De esta manera, se consigue darle mayor rigidez al dedo y ayudar a su ensamblaje para el que se ha utilizado un elemento adhesivo.

Tras este modelo diseñado para impresión por partes mediante un solo extrusor, se diseñó un modelo para impresión mediante extrusión dual. De esta manera, se ha conseguido que el diseño sea más libre ya que no hay que fijarse en el posterior ensamblado de las partes. En el Anexo B se incluyen imágenes de cada parte de la prótesis.

Con este diseño, se ha querido que el tacto de la mayor parte de la prótesis sea lo más parecido al de una mano humana, recubriendo así toda la parte superficial de la prótesis de material elástico TPU y dejando las zonas interiores y de paso de cables tensores para el material rígido PLA. Esto se ha hecho realizando operaciones booleanas y modelado de superficies, para no estropear la estética de la prótesis. También se han añadido espesores en la zona de la palma de la mano para ganar elasticidad. Esto se ha realizado mediante protrusiones y solevaciones.

3.2. Resultados de la Impresión Dual

A causa de la crisis sanitaria y el estado de alarma derivados por la COVID-19, no se ha podido utilizar la impresora *Ultimaker* como se había planteado, por lo cual solo se ha podido imprimir una primera prueba de un diseño sencillo (*Ilustración 17*) para comprobar que los materiales tienen compatibilidad a la hora de imprimirse de manera dual. Tras la impresión del primer diseño de prueba, se ha visto que el PLA y el TPU no son compatibles, ya que al imprimirse las capas deslizan entre ellas, es decir, las capas de PLA no se unen correctamente a las capas de TPU. Sin embargo, también se ha podido comprobar que, dependiendo del diseño de la pieza, esta falta de adhesión entre capas de diferente material pasa desapercibida, ya que aunque las piezas de TPU y PLA estén despegadas entre sí, al formar parte de un diseño que facilita la unión de ellas de manera natural, éstas se imprimen correctamente y su funcionalidad es la deseada. En la *Ilustración 17*, se puede comprobar que al estar la parte impresa con TPU (color blanco) rodeando a la parte interior impresa en PLA (color gris), aunque este último esté despegado, no tiene capacidad de movimiento en la pieza.



Ilustración 17. Diseño Prueba Dual

3.3. Ensamblaje y Accionamiento Mecánico

Una vez impresos todos los componentes de la prótesis, se ensamblaron usando diferentes cables de entre los expuestos en el apartado 2.2. A continuación, se incluye la justificación del uso de unos cables frente a otros.

En primer lugar, se desechó el uso de los cables de caucho [44] y silicona [46]. Esto se fundamentó en la baja resistencia a la tracción y a la alta capacidad de deformación plástica que poseen ambos materiales.

En segundo lugar, se han ensamblado la prótesis con los cuatro tipos de cables restantes para elegir el de propiedades óptimas. A continuación, se detalla el proceso seguido:

- Caso 1: cable de acero trenzado recubierto de PVC [41]. Este cable es el que posee mayor módulo de elasticidad y resistencia a la tracción de los cables disponibles. Al montar el prototipo, se ha visto que era muy complejo el proceso de ensamblaje debido a las propiedades del material y a que el cable se iba deformando en el proceso. Una vez acabado el ensamblaje, era evidente que costaba mucho esfuerzo que la mano protésica se moviera, siendo esto contrario a lo deseado.
- Caso 2: cable de goma elástica [46]. Este cable tiene un módulo de elasticidad muy bajo y a su vez tiene buena resistencia a la tracción, debido a las propiedades elásticas. El prototipo se ha montado de manera muy sencilla. Al probar la prótesis, se ha visto que la fuerza que se ha aplicado para accionar el movimiento ha sido baja, pero la fuerza que ha ejercido a su vez la prótesis sobre el objeto a agarrar ha sido también muy baja.

- Caso 3: cable de nylon trenzado [43]. Este cable presenta una buena resistencia a la tracción y cierta capacidad elástica. Ensamblar el prototipo ha sido muy sencillo. Al montarlo se han obtenido buenos resultados, consiguiendo una fuerza de agarre proporcional a la fuerza ejercida. Se ha visto que, debido a la pequeña capacidad elástica del cable, al intentar la ejecución de un agarre de precisión, la prótesis ha fallado.
- Caso 4: cable de algodón encerado [42]. Este cable posee buena resistencia a la tracción y nula capacidad elástica. Se ha ensamblado con mucha facilidad y la fuerza ejercida ha sido proporcional a la fuerza de agarre de la mano protésica. En los cuatro tipos de agarre probados ha dado un resultado positivo.

Tras ensamblar la prótesis, para ajustarla ya completamente al paciente, se ha pensado que el esquema más cómodo es el propuesto por Cuellar, Smit, Breedveld & Plettenbur en su artículo [11]. En éste, mediante un arnés que se coloca en el hombro opuesto a la amputación, se sujeta el cable tensor de la prótesis y se ayuda de esta manera a su sujeción. Aunque son medios muy económicos, debido a la situación de reducción de movilidad por la pandemia mundial, se ha utilizado un agarre con idéntica función a la explicada, pero de ámbito más doméstico.

3.4. Recubrimientos

Para conseguir mayor superficie de contacto entre la mano protésica y el objeto en cuestión, se le ha añadido un pequeño recubrimiento con silicona (*Ilustración 18*), como en algunas de las prótesis estudiadas.



Ilustración 18. Recubrimiento con Silicona

El recubrimiento de silicona se ha añadido con una pistola térmica de uso doméstico, siempre manteniendo en mente la comodidad del usuario a la hora de ensamblar la prótesis por su cuenta. Se ha optado por la silicona en el recubrimiento ya que este material es un polímero que tiene propiedades elásticas. Esto hace que, en el contacto con el objeto a agarrar, la silicona se expanda y la superficie de contacto de la prótesis con el objeto sea mayor.

Este recubrimiento se ha realizado sobre la prótesis base, impresa exclusivamente con material rígido PLA.

3.5. Valoración de las Opciones de Fabricación, Ensamblaje y Acabado

Tras el ensamblaje de la prótesis, se han obtenido los siguientes resultados.

En primer lugar, tras las pruebas de ensamblaje y accionamiento con los distintos cables tensores, se ha decidido utilizar el cable de algodón encerado. Esta elección se ha debido a que el resto de cables han tenido o dificultades en el ensamblaje, o deficiencias a la hora de utilizar la prótesis, mientras que el cordón de algodón encerado no ha mostrado ninguna deficiencia apreciable.

En segundo lugar, se ha desechado el uso de un recubrimiento de silicona. Esto se ha debido a que el resultado que se ha obtenido tras realizar algunas pruebas, ha sido bueno, pero no excelente, es decir, la prótesis ha mejorado pero hay objetos que han persistido en su dificultad para ser agarrados. Esto ha podido ser porque la capa de silicona aplicada ha sido muy fina, y las propiedades de elasticidad se han visto reducidas por este motivo. Usar una capa más gruesa rompería la estética de la prótesis totalmente.

En tercer lugar, con respecto al árbol de agarre, se ha escogido el segundo diseño por ser más compacto. Se ha comprobado que el ensamblaje del primer diseño más amplio, con respecto a la pieza base de la prótesis, ha sido más sencillo, sin embargo la fuerza a aplicar ha sido mayor para una menor fuerza de agarre. Esto se ha debido a que al unir los 5 dedos en un mismo árbol, éste se ha diseñado con un tamaño demasiado grande, lo cual ha impedido el máximo recorrido de algunos dedos esenciales en el agarre de tipo pinza, como el índice. Este mayor tamaño, ha hecho que el árbol haya chocado con las paredes de la prótesis, dificultando mucho el avance y haciendo que no se haya podido completar el recorrido del movimiento. Por este motivo, se ha escogido el segundo diseño, el cual tras ensamblarlo y accionarlo no presentaba problemas de choque con las paredes de la prótesis y ha realizado el recorrido de manera completa, solucionando así el problema descrito.

En cuarto lugar, con respecto al adaptador mano-brazo, se ha visto que las características de flexibilidad presentadas por el adaptador se ajustan a la función requerida. Se ha comprobado también que el interior del adaptador presenta rugosidad, la cual puede subsanarse recubriendo la superficie con un material polimérico o con una fina capa de algodón para que el paciente no sienta ningún tipo de incomodidad con la prótesis.

En quinto lugar, se han analizado los resultados generales de la prótesis impresa con material rígido y flexible, pero con impresora de un solo extrusor. El ensamblado ha sido sencillo y las partes impresas con diferente material tienen un buen agarre entre ellas incluso sin añadir el material adhesivo. El tacto de los dedos, impresos en TPU, ha sido similar al de una mano humana, teniendo en primera instancia la zona “blanda” simulando la piel y músculos, hasta llegar a la zona “dura” del interior que simula los huesos. Sin embargo, hay zonas de la mano que todavía presentan una rigidez notable. Además, el tacto de la prótesis en la zona de los dedos podría mejorarse (por ejemplo en el dedo pulgar), ya que la zona rígida impresa, en algunos casos, ha predominado haciendo que la capa de material elástico fuera casi inapreciable.

3.6. Pruebas de Funcionalidad

Con el fin de comprobar la funcionalidad de la prótesis, se llevaron a cabo algunas pruebas de agarre con diferentes objetos. Estas pruebas se han realizado para poder comprobar las deficiencias que ha presentado el prototipo de mano protésica de este Trabajo Fin de Grado, y poder sacar conclusiones acerca del hipotético diseño final que habría que hacer llegar al paciente.

El prototipo usado para hacer las pruebas ha sido el visto en las *Ilustraciones 15 y 16*. Éste ha sido impreso por partes y posteriormente ha sido ensamblado. Este prototipo no tendrá la funcionalidad final del diseño propuesto para imprimir con la impresora de impresión dual *Ultimaker 3 Extended*, pero sí que se asemejará de manera suficiente para permitir extraer las conclusiones requeridas.

Se han colocado siete objetos a agarrar, como se pueden ver en la *Ilustración 19*. Estos objetos son, de izquierda a derecha: un dedo (parte de la prótesis), una mano de madera, una vela (simulando un vaso lleno con algún líquido), una botella de un litro de agua, un enchufe macho, un soldador y una funda con auriculares dentro.



Ilustración 19. Objetos a Coger en la Prueba Realizada

Se han ido cogiendo los siete objetos de diferentes maneras para poder evaluar de una mejor manera la prótesis y, así, poder ver las deficiencias de la misma. Como se puede comprobar en la *Ilustración 19*, los objetos tienen diferentes formas y pesos.

La mano protésica ha demostrado mayor facilidad de agarre con los objetos más pequeños. Estos son de bajo peso y su volumen no es lo suficientemente pequeño como para ser un problema al tomarlos. Sin embargo, al coger estos objetos cuesta que se mantengan en la dirección solicitada. Éste es el caso del soldador, el cual es un objeto pequeño y ligero, pero a la hora de manipularlo cuesta que se mantenga en la hipotética posición de uso.

Los objetos más grandes, como la mano de madera o la botella, tienen mayor dificultad a la hora de agarrarlos. Esto es debido a que hay que ejercer más fuerza para poder soportar el peso de los mismos. Sin embargo, una vez tomados, es más sencillo mantenerlos en la dirección deseada.

3.7. Discusión

Tras las pruebas realizadas con el último prototipo impreso, se ha llegado a algunas conclusiones. Antes de exponerlas, mencionar que ante la imposibilidad de realizar el prototipo fabricado con dos materiales mediante impresión dual, todos los comentarios se han formulado con respecto a las pruebas realizadas con el prototipo fabricado con la impresora *Ender 3*, pudiéndose obtener un resultado diferente si se tuviera la capacidad de imprimir el diseño más avanzado también desarrollado en este proyecto.

Una vez se han realizado las pruebas pertinentes con el prototipo protésico, se ha visto que, comparándolo con la mano humana, éste tiene muchas menos funcionalidades y que con una prótesis con las características del prototipo impreso, hay agarres comunes en aspectos cotidianos que entrañan mucha dificultad. Por ejemplo: agarrar un vaso de agua sin que se caiga, coger objetos de mayor tamaño o sostener un cubierto para comer. A la hora de coger los objetos en las pruebas, se ha visto que, habitualmente, no se logra coger de manera correcta el objeto requerido, de modo que posteriormente no se cayera o balanceara entre los dedos de la prótesis. Se ha visto que cuando la mano protésica agarra correctamente un objeto, el usuario lo nota, pero esto no ocurre con la mayoría de objetos a agarrar. Se ha visto también que, con la práctica, realizar los agarres se vuelve más sencillo y rápido, pudiendo tomar la gran mayoría de objetos a la primera con total seguridad.

Comentar que la prótesis, impresa con un color carne, es muy similar a una mano humana y que existen diferencias sustanciales entre: no llevar prótesis (nula funcionalidad y daño estético), llevar una prótesis pasiva con la que estéticamente se esté conforme pero sin aportar ninguna funcionalidad, y llevar una prótesis que cumpla la función estética y que tenga una funcionalidad aceptable. También se ha podido comprobar en las pruebas realizadas que, con los objetos de mayor peso, la prótesis pierde fuerza de agarre y hay que hacer mucha tensión para conseguir agarrarlos por unos segundos. Por el contrario, agarrar los objetos livianos es muy sencillo y no requiere apenas aplicar tensión. Esto podría ser de gran utilidad de cara a realizar tareas cotidianas como por ejemplo comer.

Respecto del adaptador brazo-mano, como se ha comentado anteriormente, es muy importante que se acople bien a la amputación, ya que se va a utilizar durante muchas horas. Además, hay amputaciones que dejan la zona del muñón muy sensible. Teniendo esto en cuenta, se ha obtenido un adaptador flexible que ha cumplido su función de sostener la mano protésica y, aunque no se ha podido comprobar experimentalmente la ergonomía de éste con un caso real, se ha podido ver que al ser elástico y flexible se puede adaptar con mayor facilidad a la amputación, pudiendo añadir adicionalmente un recubrimiento a la zona interior para que el tacto sea más cómodo.

Como conclusión final, la prótesis ha obtenido unas características buenas dentro de las habituales en el diseño de prótesis impresas en 3D, habiendo conseguido los objetivos marcados en cuanto a estética, funcionalidad y ergonomía. Sin embargo, queda mucho recorrido por hacer hasta conseguir que este tipo de prótesis fabricadas con impresión FDM tengan una funcionalidad con la cual puedan sustituir en gran medida a una mano humana. Por el momento la prótesis, para un usuario amputado, podría serle de gran ayuda a un precio muy económico. No obstante, todavía dista mucho de ser una opción real que le permitiera volver a un mundo antes de la amputación.

3.8. Incidencias en la Realización del Trabajo

Durante el desarrollo del trabajo, han ido surgiendo algunos problemas, los cuales se describen a continuación.

A raíz de la pandemia Mundial del COVID-19, ha habido varias semanas en las cuales no se ha podido avanzar en el trabajo de la manera deseada con el enfoque inicial. Al prorrogarse de manera definitiva el estado de alarma, con la imposibilidad del acceso a la Universidad para poder usar las herramientas necesarias para desarrollar el trabajo, éste se ha tenido que adaptar y reenfocar en diversas ocasiones, con la pérdida de tiempo que ello conlleva y la imposibilidad de realizar aspectos clave en el desarrollo del mismo.

La escasez de recursos para la realización del trabajo, tales como materiales o máquinas, ha sido otro problema con el que se ha lidiado a lo largo de todo el trabajo.

Teniendo todas las incidencias anteriormente mencionadas en cuenta, se ha podido en todo momento reconducir el trabajo por parte del Alumno y el Director y se ha realizado éste en el tiempo estipulado con el mejor resultado posible atendiendo a las circunstancias descritas.

3.9. Propuestas Posibles de Mejora

Uno de los aspectos a mejorar de la prótesis que se ha diseñado, serían los materiales de impresión.

El PLA y el TPU son materiales que no tienen capacidad de adhesión al imprimirlos por extrusión dual, es decir, que se despegan uno de otro. Por ello, sería mejor usar otra combinación de materiales como por ejemplo ABS y TPU.

Con respecto a la calidad de los materiales, se podrían usar materiales de mejores propiedades, tales como el Carbón-P (PETG, tereftalato de polietilenglicol, reforzado con fibras de carbono), material que daría mayores propiedades de resistencia y dureza que el PLA, y el Nylon, con mejor elasticidad que el TPU y mayor facilidad de impresión.

Otro aspecto a mejorar podría ser la integración de dispositivos electrónicos para que la prótesis se accionara electrónicamente. Por ejemplo, se podría incluir EMG, como en muchos otros prototipos de prótesis estudiados.

Si bien estas mejoras estarían ligadas a un aumento de presupuesto y de valor de la prótesis, debido al encarecimiento de los materiales y/o componentes electrónicos.

4. Conclusiones

4.1. Conclusiones Generales

En el trabajo realizado, se ha comenzado con la inquietud de solucionar el problema de la falta de prótesis ortopédicas de mano a un precio asequible. Tras hacer un estudio de la literatura disponible, se ha visto que mediante técnicas de fabricación aditiva económicas como la impresión 3D se pueden aportar soluciones económicamente asequibles a este problema. Se ha realizado un estudio en profundidad de las diferentes manos protésicas fabricadas por impresión 3D y se ha seleccionado la más desarrollada (*Kwawu 2.0*) de éstas anteriores para introducirle mejoras y poder obtener un producto de calidad.

Se ha rediseñado el árbol de agarre para que la mano tenga mayor fuerza de agarre y pueda coger objetos más pesados. También se ha rediseñado el prototipo para poderse imprimir con una impresora de doble extrusión. Esto se ha hecho para que la mano protésica se asemejara lo más posible a la mano humana, teniendo varias capas de material elástico en la superficie, simulando la piel y músculos humanos, mientras que en la parte interior se ha dispuesto un material rígido, simulando los huesos humanos. También se ha conseguido que la mano protésica pueda amoldarse a los objetos más fácilmente gracias a la superficie elástica mencionada anteriormente. Por último, se ha diseñado un adaptador de la mano protésica al brazo más ergonómico, consiguiendo que sea muy sencillo quitarse y ponerse la prótesis, y que esta no sea incómoda de usar.

Como aportaciones propias que se han añadido al trabajo, cabe destacar las consideraciones generales sobre los parámetros para tener en cuenta a la hora de diseñar una prótesis y las mejoras que se han realizado a la prótesis *Kwawu*, así como la introducción de la impresión dual en el mundo de las prótesis, la cual a día de hoy no tiene gran representación dentro de los estudios de la fabricación aditiva e impresión 3D.

Con respecto a los objetivos marcados en la introducción de ensamblaje sencillo, buena funcionalidad, precio económico y fácil fabricación, se han cumplido obteniendo una prótesis de buena calidad, que un usuario puede hacerse en su propia casa con un coste de no más de 500 euros contando impresora y materiales.

4.2. Posible Comercialización

Como se ha comentado en la introducción, el número de personas que solicita prótesis es cada vez mayor, y es muy reducido el número de empresas que ofrecen prótesis ortopédicas a un precio económico.

En la actualidad, no existe ninguna empresa que a nivel profesional se dedique a vender prótesis realizadas por impresión 3D de tipo FDM. Sí que hay algunas empresas que tienen apartados en sus páginas web donde dan a conocer algunos proyectos de investigación sobre este tipo de prótesis o que explican cómo fabricar manos protésicas impresas paso por paso.

Si se quisiera sacar el modelo de mano protésica diseñado al mercado, no tendría sentido vender los archivos de la prótesis para que el cliente la fabricase, ya que multitud de páginas web distribuyen estos archivos gratuitamente.

El modelo de ventas más acorde con el producto sería el de un producto ensamblado y listo para funcionar. También se podrían comercializar las piezas por separado. De esta manera, si al cliente se le rompiera una pieza de la prótesis, podría adquirirla.

La inversión a realizar para sacar el producto al mercado no sería alta, ya que sumando el precio de crear una página web para el producto, junto con las impresoras adecuadas, los materiales y la inversión en publicidad, con una inversión de 1 000 € podría llevarse a cabo el proyecto. Mil euros los cuales se dividirían en: dos tercios en la impresora y los materiales, y el otro tercio en la página web (hosting, dominio, etc.) y en la inversión publicitaria para dar a conocer el proyecto.

4.3. Experiencia Adquirida

A lo largo del desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se han ido adquiriendo diversas habilidades que antes no se poseían. A continuación, se presentan las habilidades adquiridas, dividiéndolas en dos puntos de vista: profesional y personal.

Desde el punto de vista profesional, se ha aprendido a buscar información de calidad en las plataformas más actuales de literatura científica. También se ha profundizado más en el aprendizaje de diferentes software de diseño CAD e Impresión 3D. Por último, se ha aprendido a elaborar de manera adecuada un informe del trabajo realizado, adjuntando la bibliografía y referencias usadas de otros artículos científicos o sitios web usados como la norma indica.

Desde el punto de vista personal, ha sido todo un reto enfrentarse a un trabajo propuesto por el alumno, con la motivación que ello conlleva. Ha sido una gran experiencia de aprendizaje cometer fallos y tener que volver a solucionarlos o reenfocar planteamientos. El hecho de descubrir que en el mundo de la ingeniería, se trabaja habitualmente con el método ensayo-error, ha sido otro gran conocimiento adquirido, el cual ha hecho que se haya aprendido a contener de mejor manera las emociones y estados anímicos, habilidad que en proyectos de carácter ingenieril es esencial para poder desarrollarlos de manera óptima.

5. Referencias

- [1] Farah, A., Elsadig, M., & John-John, C. (2019). *Design and Analysis of Flexible Joints for a Robust 3D Printed Prosthetic Hand*. Qatar University, Mechanical and Industrial Engineering, Toronto.
- [2] Soldado, F. (s.f.). *cirujiamanoinfantil*. Obtenido de http://www.cirujiamanoinfantil.com/es/malformaciones/dedos_cortos_braquidactilia_simbraquidactilia_sindrome_de_la_brida_amniotica
- [3] Mohammad Azeeb, M., Wan Fatimatul Aifaa, W. F., Helmi, R., & Abdul Halim, A. (October de 2019). Development of 3D Printed Symbrachydactyly Prosthetic Hand. *Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication*.
- [4] JOHN-JOHN, C., M. KHALEEL, A., & NITISH, T. (2018). *A Method for 3-D Printing Patient-Specific Prosthetic Arms With High Accuracy Shape and Size*.
- [5] LÓPEZ, J. M. (28 de Abril de 2019). *Hipertextual*. Obtenido de La primera impresora 3D: convirtiendo píxeles en materia: <https://hipertextual.com/2019/04/primera-impresora-3d>
- [6] *Wikipedia*. (s.f.). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Cultura_Maker
- [7] Flores, O. M. (21 de Enero de 2020). *Minería en Línea*. Obtenido de <https://mineriaenlinea.com/glosario/titanio/>
- [8] *PLA y ABS precios* . (s.f.). Obtenido de https://www.google.es/search?q=pla+y+abs+precios&sxsrf=ALeKk030foFTcqAn3Rf7PrDOKCzKIh5QHQ:1588840222390&source=lnms&tbm=shop&sa=X&ved=2ahUKEwiewr2Iq6HpAhVT8OAKHXiDAZ8Q_AUoA3oECA0QBQ&biw=1511&bih=730
- [9] *YEGGI*. (s.f.). Obtenido de <https://www.yeggi.com/q/prosthetic+hand/>
- [10] *ENABLING THE FUTURE*. (s.f.). Obtenido de <http://enablingthefuture.org/>
- [11] Cuellar, J. S., Smit, G., Breedveld, P., & Plettenbur, A. A. (2019). Functional evaluation of a nonassembly 3D-printed hand prosthesis. *Institution of Mechanical Engineers*.
- [12] Giaconia, C., Nahuelhual, P., Dote, J., Cubillo, R., Fuentes, G., & Zúñiga, J. (2019). Experiences of the use of 3D printed hand orthoprosthesis (Cyborg Beast) in adolescents with congenital hand amputation and their main caregivers: A study of cases. *Revista Chilena de Pediatría*.
- [13] Charbel, T., Geoffrey, M. S., Marc, i. h., & Gursel, A. (2019). 3D Printable Linear Soft Vacuum Actuators: Their Modeling, Performance Quantification and Application in Soft Robotic Systems. En *TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*.
- [14] Marlene, B., Rodrigo, V.-C., Midori, S., & Renato, M. (2018). A parametric 3D-printed body-powered hand prosthesis based on the four-bar linkage mechanism . *International Conference on Bioinformatics and Bioengineering*. Lima, Peru.
- [15] Jelle ten, K., Gerwin, S., & Paul, B. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. En *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*.
- [16] Inmaculada, L.-H., & Antonio, P.-G. (2017). System for the experimental evaluation of anthropomorphic hands. Application to a new 3Dprinted prosthetic hand prototype. En *International Biomechanics* (4:2, 50-59).
- [17] Wu, P.-H., & Shieh, J.-S. (2016). *3D Printed Prosthetic Hands*. Chungli, Taiwan.

- [18] Zuniga, J., Katsavelis, D., Peck, J., Stollberg, J., Petrykowski, Carson, A., & Fernandez, C. (2016). Cyborg Beast: a low cost 3d-printed prosthetic hand for children upper-limb differences. *BMC Research Notes*.
- [19] W. O'Brien, K., A. Xu, P., J. Levine, D., A. Aubin, C., Yang, H.-J., F. Xiao, M., . . . F. Shepherd, R. (2018). Elastomeric passive transmission for autonomus force-velocity adaptation to 3D-printed prosthetics. *Science robots*.
- [20] Rui, P. R., Pedro, A. L., Anibal, T. A., Mahmoud, T., & Carmel, M. (2017). Fabrication and characterization of bending and pressure sensors for a soft prosthetic hand. *Journal of Micromechanics and Microengineering*.
- [21] *Autodesk360*. (s.f.). Obtenido de <http://a360.co/2h6U9rv>
- [22] Buchanan, J. (s.f.). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=o5p5qpXizaQ>
- [23] *One Monk Claping*. (s.f.). Obtenido de Kwawu 2.0 Prosthetic Hand: <http://www.onemonkclapping.com/index.php/portfolio/kwawu-2-0-prosthetic-hand/>
- [24] *RS*. (s.f.). Obtenido de https://es.rs-online.com/web/p/cintas-de-gancho-y-bucle/8904161?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_ES_ES_Adhesivos_And_Sellantes_Y_Cintas-_-Cintas-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&aud-813230962291:pla-584921381411&&cm_mmc=ES-PLA-_-google-_-XXX_CSS_ES_ES_Adhesivo
- [25] *Maker Bot Thingiverse*. (s.f.). Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:2774477>
- [26] Nieto Diaz Lavana, I. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SOCKET DE MIEMBRO SUPERIOR CON SUSPENSIÓN AJUSTABLE*. Ingeniería Mecánica-Mecatrónica.
- [27] U, F., U, G., S A, U., & Y S, N. (2019). EMG control of a 3D printed myo electric prosthetic hand. *Materials Science and Engineering*.
- [28] Michael D., P., Nathaniel R., O., Jacob A., G., David T., K., Mark R., B., Tyler S., D., . . . Gregory A., C. (2019). *A Modular Transradial Bypass Socket for Surface Myoelectric Prosthetic Control in Non-Amputees*.
- [29] Inhoe, K., Gordon K., L., Chan Yong, P., Janghyuk, L., & Euicheol, J. (2019). Clinical outcomes of a low-cost single-channel myoelectric-interface three-dimensional hand prosthesis. *APS*.
- [30] Chanin, J., & Nuttawut, S. (2018). Artificial Human Arm Controlled by Muscle Electromyography (EMG). *Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT)*.
- [31] Jake. (26 de July de 2017). *Peak Strength and Fitness*. Obtenido de Technique Tuesday: Wrist Position Overhead in the Snatch: <https://peakstrengthandfitness.com/technique-tuesday-wrist-position-overhead-snatch/>
- [32] *Asociación Española de Esclerosis Múltiple de Albacete*. (7 de Octubre de 2019). Obtenido de Rehabilitación de las manos: Pinzas más usadas en las actividades de la vida diaria: <https://emalbacete.es/pinzas-mas-usadas-en-las-actividades-de-la-vida-diaria/>
- [33] *SCOPUS*. (s.f.). Obtenido de <https://www.scopus.com/home.uri>
- [34] *Ultimaker*. (s.f.). Obtenido de <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>
- [35] *Ultimaker*. (s.f.). Obtenido de

- <https://ultimaker.com/download/73768/TDS%20TPU%2095A%20v3.010%20ES.pdf>
- [36] *ManoMano*. (s.f.). Obtenido de https://www.manomano.es/pistolas-de-encolar-3186?model_id=9897778&g=1&referer_id=689879&gclid=Cj0KCQjw-_j1BRDkARIsAJcfmTHVrL_VkrEKfTatn_7QEYjIKzM-7slh0YCSA4IaZ6YRTp7EZKb6aKwaAnECEALw_wcB
- [37] *LDLC High-Tech Experience*. (s.f.). Obtenido de https://www.ldlc.com/es-es/ficha/PB00221397.html?gclid=CjwKCAjwqdn1BRBREiwAEbZcR5N9kw0T6lFwkm98AXknasfi10Wk_Xug4214qZWXRH-X5-VknlYOnhoCnEOQAvD_BwE
- [38] *Farnell*. (s.f.). Obtenido de https://es.farnell.com/ultimaker/1755/filamento-impresora-3d-tpu-2-9mm/dp/2992614?gclid=CjwKCAjwqdn1BRBREiwAEbZcR2npCS8UJihhkYB_ACvS-wncvVMgVT1pKGLqWupQ151c oMgW45mP9BoCSkoQAvD_BwE&gross_price=true&mckv=s_dc|pcrid|359531025108|plid||kword||match||slid||pro
- [39] *Mastoner*. (s.f.). Obtenido de <https://www.mastoner.com/impresoras-3d/filamento-pla/filamento-pla-natural>
- [40] *Mastoner*. (s.f.). Obtenido de <https://www.mastoner.com/impresoras-3d/filamento-flexible/filamento-flexible-tpu-transparente>
- [41] *Cintatex*. (s.f.). Obtenido de <https://cintatex.es/cables-de-acero/530-cable-de-acero-plasticado-de-pvc-transparente-150mm.html>
- [42] *Cristalia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.abalorioscrystalia.com/abalorioscrystalia/5600996/1-metro-de-algodon-encerado-1-mm-azul-pastel.html>
- [43] *Cristalia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.abalorioscrystalia.com/abalorioscrystalia/4714206/1-metro-nylon-trenzado-1mm-amarillo.html>
- [44] *Cristalia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.abalorioscrystalia.com/abalorioscrystalia/2572560/1-metro-de-caucho-negro-1-50mm.html>
- [45] *Cristalia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.abalorioscrystalia.com/abalorioscrystalia/11220980/bobina-10-metros-hilo-de-silicona-transparente-0-8mm.html>
- [46] *Cristalia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.abalorioscrystalia.com/abalorioscrystalia/7136798/1-metro-de-cordon-elastico-1mm-rosa-fluor.html>
- [47] *AUTODESK*. (s.f.). Obtenido de https://www.autodesk.es/products/inventor-lt/subscribe?plc=INVLt&AID=11043037&PID=8227014&SID=jkp_CjwKCAjw4871BRAjEiwAbxXi20NKrYDIgNQJBwSMTRFqwVqaLLuNYihBEfZ2jLBwfGVfQeUc3HX8kxoCPIIQAvD_BwE&click_id=CjwKCAjw4871BRAjEiwAbxXi20NKrYDIgNQJBwSMTRFqwVqaLLuNYihB
- [48] *SIEMENS Ingenuity for Life*. (s.f.). Obtenido de <https://solidedge.siemens.com/es/>
- [49] *Ultimaker*. (s.f.). Obtenido de <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>
- [50] *Ultimaker*. (s.f.). Obtenido de <https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-3>
- [51] *Creality*. (s.f.). Obtenido de https://www.crealty3dshop.eu/collections/3d-printers/products/creality-ender-3-3d-printer-economic-ender-diy-kits-with-resume-printing-function-v-slot-prusa-i3-220x220x250mm?gclid=CjwKCAjw4871BRAjEiwAbxXi22YNA1EM72xSsDmYvU79vqPyR1jEKYj--xEP2-UgvNryP_nmW6



Universidad
Zaragoza

ANEXO A

Diseño de una Prótesis de Mano Impresa en 3D Accionada Corporalmente

Design of a Prosthetic 3D- Printed Body-Powered Hand

Autor

Eduardo Larriba Llamas

Director

Francisco Javier Medel Rezusta

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020

ÍNDICE

1. Parámetros Impresión 3D: PLA	1
2. Parámetros Impresión 3D: TPU	4
3. Parámetros Impresión 3D: Extrusión Dual	6

1. Parámetros Impresión 3D: PLA

 Calidad			
Altura de capa		0.2	mm
<i>Altura de capa inicial</i>	 	0.3	mm
 Perímetro			
Grosor de la pared		0.8	mm
<i>Recuento de líneas de pared</i>	 	3	
<i>Grosor superior/inferior</i>		0.8	mm
Grosor superior		0.8	mm
Capas superiores		4	
Grosor inferior		0.8	mm
Capas inferiores		4	
<i>Optimizar el orde...resión de paredes</i>		<input checked="" type="checkbox"/>	
<i>Paredes exteriore...es que interiores</i>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Expansión horizontal		0	mm
Habilitar alisado		<input type="checkbox"/>	
 Relleno			
Densidad de relleno		20	%
<i>Patrón de relleno</i>	 	Triángulos	
 Material			
<i>Temperatura de impresión</i>	 	220	°C
<i>Temperatura de impresión inicial</i>	 	220	°C
<i>Temperatura de impresión final</i>	 	220	°C
<i>Temperatura de...a de impresión</i>	 	80	°C
Flujo		100	%
Habilitar la retracción		<input checked="" type="checkbox"/>	

<i>Retracción en el cambio de capa</i>		<input checked="" type="checkbox"/>
Distancia de retracción		5 mm
<i>Velocidad de retracción</i>		50 mm/s
Velocidad de retracción		50 mm/s
Distancia de retrac...el cambio de tobera		16 mm
Velocidad de retrac...el cambio de tobera		20 mm/s
Velocidad		▼
<i>Velocidad de impresión</i>		25 mm/s
<i>Velocidad de relleno</i>		35 mm/s
<i>Velocidad de pared</i>		20 mm/s
Velocidad de pared exterior		20 mm/s
<i>Velocidad de pared interior</i>		25 mm/s
<i>Velocidad de desplazamiento</i>		160 mm/s
<i>Velocidad de capa inicial</i>		15 mm/s
Velocidad de impres... de la capa inicial		15 mm/s
<i>Velocidad de d...a capa inicial</i>		100 mm/s
Desplazamiento		▼
<i>Salto en Z en la retracción</i>		<input checked="" type="checkbox"/>
Refrigeración		▼
Activar refrigeración de impresión		<input checked="" type="checkbox"/>
Velocidad del ventilador		100.0 %
Velocidad normal del ventilador		100.0 %
Velocidad máxima del ventilador		100.0 %
Umbral de velocidad...xima del ventilador		10 s
Velocidad inicial del ventilador		0 %
Velocidad normal del ventilador a altura		0.3 mm
Velocidad normal d...entilador por capa		2
Tiempo mínimo de capa		10 s

Velocidad mínima		10	mm/s
<i>Levantar el cabezal</i>		<input checked="" type="checkbox"/>	
Soporte			▼
Generar soporte		<input type="checkbox"/>	
<i>Colocación del soporte</i>		Tocando la pla...	▼
<i>Ángulo de voladizo del soporte</i>		60	°
Adherencia de la placa de impresión			▼
<i>Tipo adherenci...a de impresión</i>		Borde	▼
Experimental			▼
<i>Soporte en árbol</i>		<input checked="" type="checkbox"/>	
<i>Ángulo de las rama...l soporte en árbol</i>		40	°
<i>Distancia de las ra...el soporte en árbol</i>		1	mm
<i>Diámetro de las ra...l soporte en árbol</i>		2	mm
<i>Ángulo de diámetro...l soporte en árbol</i>		5	°
<i>Resolución de colis...el soporte en árbol</i>		0.2	mm
<i>Grosor de las pare...l soporte en árbol</i>		0.4	mm

2. Parámetros Impresión 3D: TPU

Calidad		▼
Altura de capa		0.2 mm
Altura de capa inicial		0.3 mm
Perímetro		▼
Grosor de la pared		0.8 mm
Recuento de líneas de pared		3
Grosor superior/inferior		0.8 mm
Grosor superior		0.8 mm
Capas superiores		4
Grosor inferior		0.8 mm
Capas inferiores		4
Optimizar el orde...resión de paredes		<input checked="" type="checkbox"/>
Paredes exteriore...es que interiores		<input checked="" type="checkbox"/>
Expansión horizontal		0 mm
Habilitar alisado		<input type="checkbox"/>
Relleno		▼
Densidad de relleno		20 %
Patrón de relleno		Triángulos ▼
Material		▼
Temperatura de impresión		220 °C
Temperatura de impresión inicial		220 °C
Temperatura de impresión final		220 °C
Temperatura de...a de impresión		80 °C
Flujo		100 %
Habilitar la retracción		<input checked="" type="checkbox"/>

<i>Retracción en el cambio de capa</i>		<input checked="" type="checkbox"/>
<i>Distancia de retracción</i>		3 mm
<i>Velocidad de retracción</i>		30 mm/s
Velocidad de retracción		30 mm/s
Distancia de retrac...el cambio de tobera		16 mm
Velocidad de retrac...el cambio de tobera		20 mm/s
Velocidad		▼
<i>Velocidad de impresión</i>		20 mm/s
<i>Velocidad de relleno</i>		25 mm/s
<i>Velocidad de pared</i>		20 mm/s
Velocidad de pared exterior		20 mm/s
<i>Velocidad de pared interior</i>		20 mm/s
<i>Velocidad de desplazamiento</i>		160 mm/s
<i>Velocidad de capa inicial</i>		12 mm/s
Velocidad de impres... de la capa inicial		12 mm/s
<i>Velocidad de d...a capa inicial</i>		100 mm/s
Desplazamiento		▼
<i>Salto en Z en la retracción</i>		<input checked="" type="checkbox"/>
Refrigeración		▼
<i>Activar refrigeración de impresión</i>		<input type="checkbox"/>
Umbral de velocidad...xima del ventilador		10 s
Velocidad normal del ventilador a altura		0.3 mm
Velocidad normal d...entilador por capa		2
Tiempo mínimo de capa		10 s
Velocidad mínima		10 mm/s
<i>Levantar el cabezal</i>		<input checked="" type="checkbox"/>
Soporte		▼
Generar soporte		<input type="checkbox"/>
<i>Colocación del soporte</i>		Tocando la pla... ▼
<i>Ángulo de voladizo del soporte</i>		60 °
Adherencia de la placa de impresión		▼
<i>Tipo adherenci...a de impresión</i>		Borde ▼

 Experimental		
Soporte en árbol	 	<input checked="" type="checkbox"/>
Ángulo de las rama...l soporte en árbol		<input type="text" value="40"/> °
Distancia de las ra...el soporte en árbol		<input type="text" value="1"/> mm
Diámetro de las ra...l soporte en árbol		<input type="text" value="2"/> mm
Ángulo de diámetro...l soporte en árbol		<input type="text" value="5"/> °
Resolución de colis...el soporte en árbol		<input type="text" value="0.2"/> mm
Grosor de las pare...l soporte en árbol		<input type="text" value="0.4"/> mm

3. Parámetros Impresión 3D: Extrusión Dual

 Extrusión doble		
Activar la torre auxiliar		<input checked="" type="checkbox"/>
Posición de la torre...iliar sobre el eje X		<input type="text" value="175.67"/> mm
Posición de la torre...iliar sobre el eje Y		<input type="text" value="184.524"/> mm



Universidad
Zaragoza

ANEXO B

Diseño de una Prótesis de Mano Impresa en 3D Accionada Corporalmente

Design of a Prosthetic 3D- Printed Body-Powered Hand

Autor

Eduardo Larriba Llamas

Director

Francisco Javier Medel Rezusta

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020

ÍNDICE

1. Diseño para Extrusión Dual	1
2. Tabla de Propiedades: Parámetros PLA	5
3. Tabla de Propiedades: Parámetros TPU	5

1. Diseño para Extrusión Dual

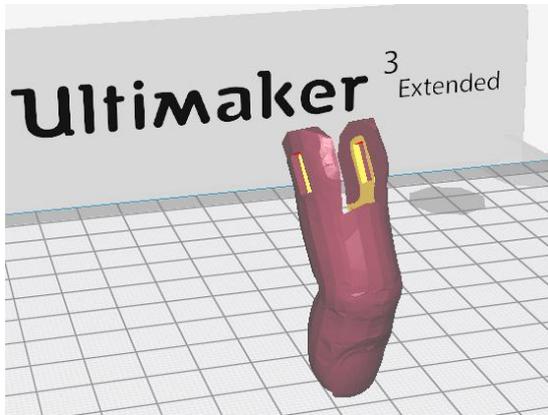


Ilustración 1. Meñique Parte Superior

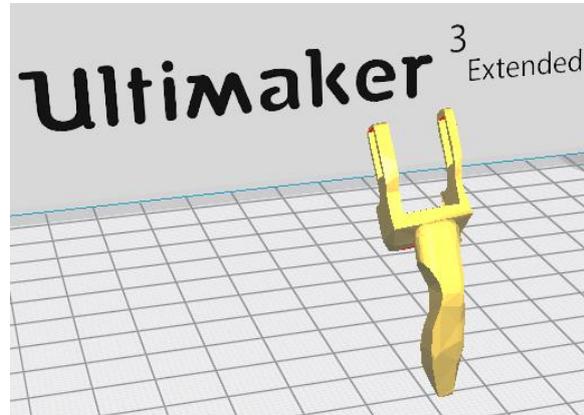


Ilustración 2. Meñique PLA Parte Superior

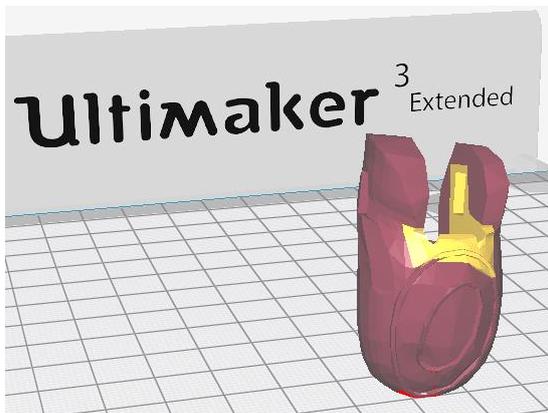


Ilustración 3. Pulgar Parte Superior

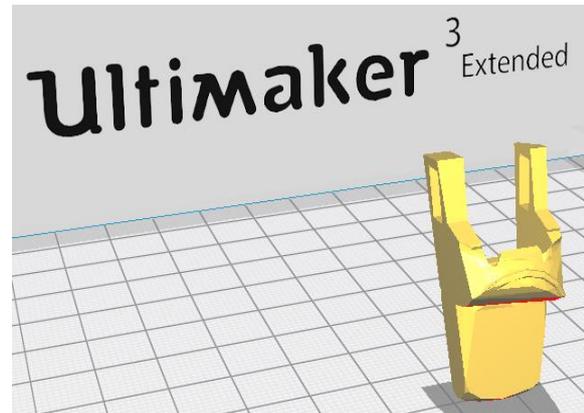


Ilustración 4. Pulgar PLA Parte Superior

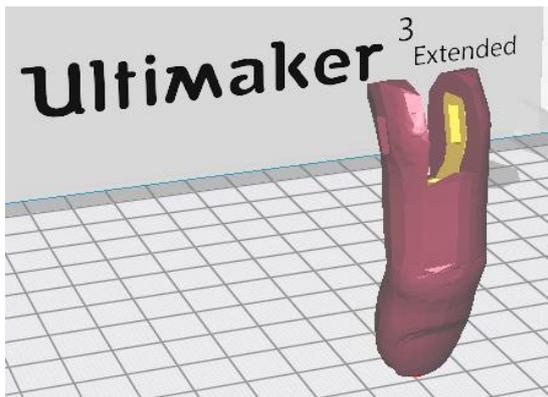


Ilustración 5. Índice Parte Superior

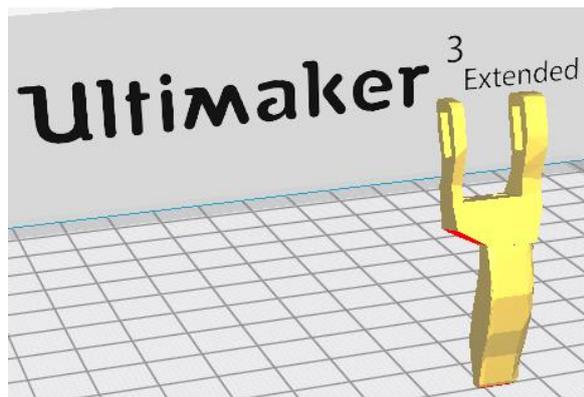


Ilustración 6. Índice PLA Parte Superior

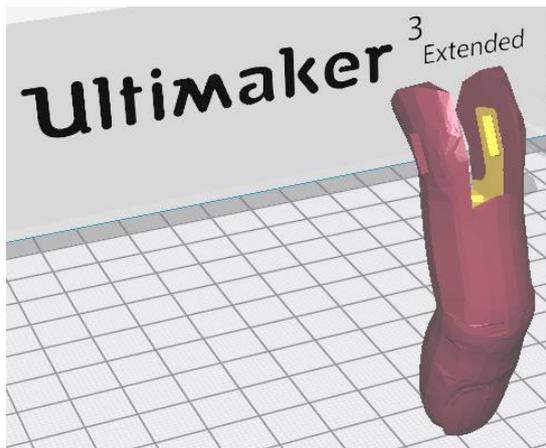


Ilustración 7. Corazón Parte Superior

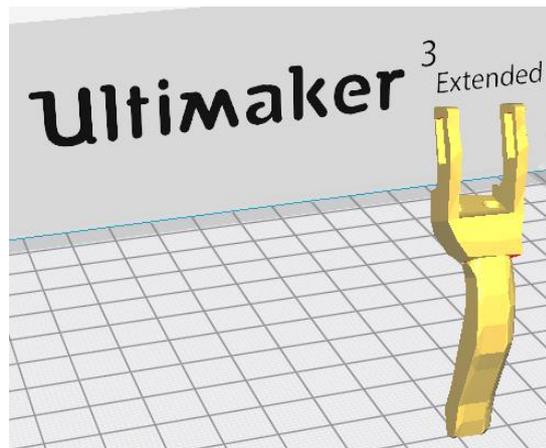


Ilustración 8. Corazón PLA Parte Superior

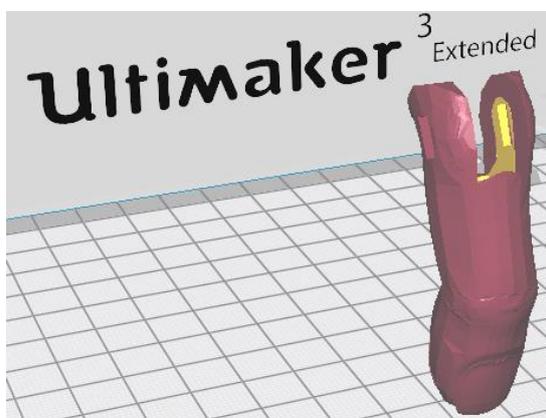


Ilustración 9. Anular Parte Superior

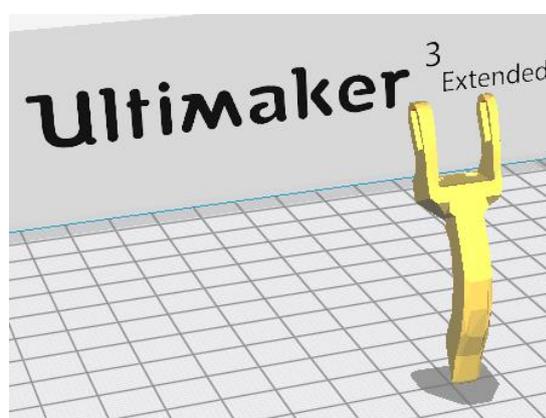


Ilustración 10. Anular PLA Parte Superior

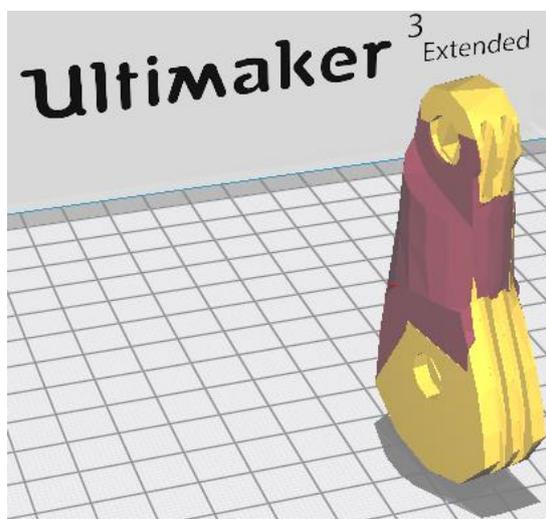


Ilustración 11. Anular Parte Inferior

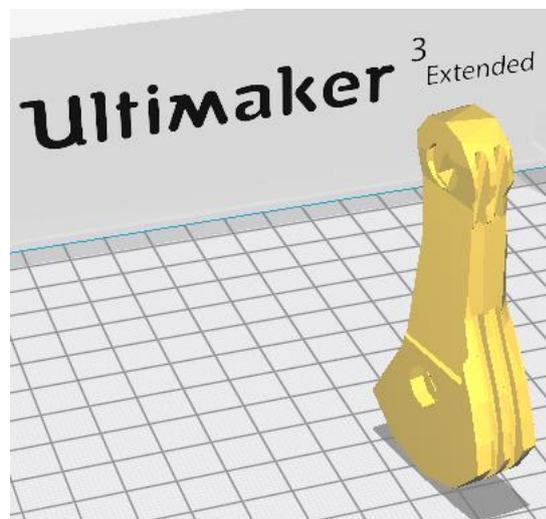


Ilustración 12. Anular PLA Parte Inferior

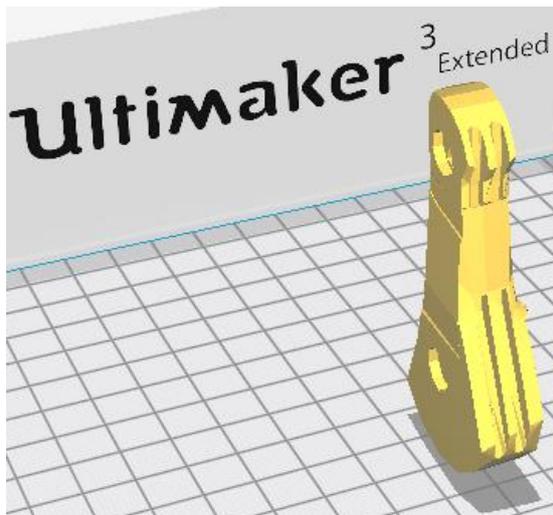


Ilustración 13. Corazón Parte Inferior

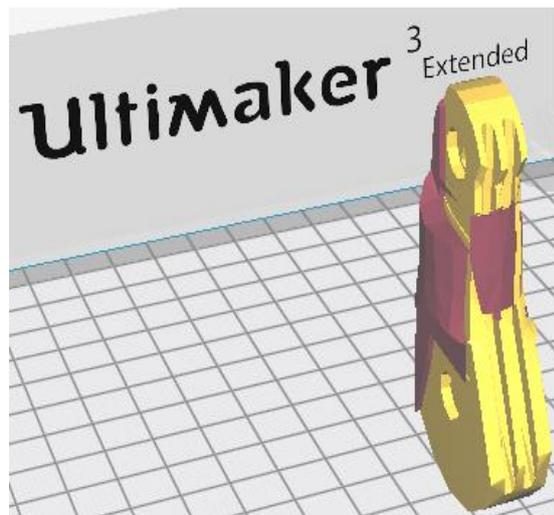


Ilustración 14. Corazón PLA Parte Inferior

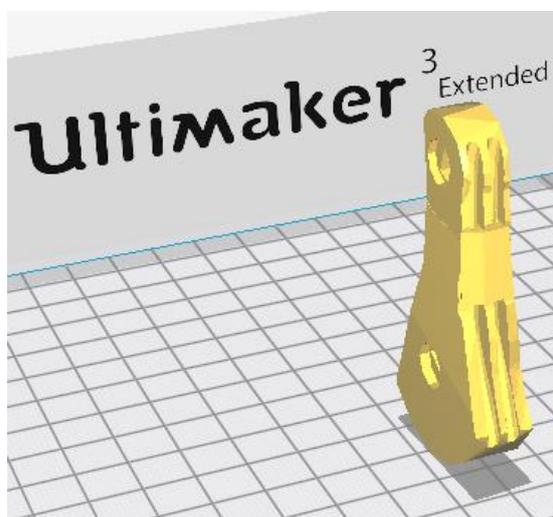


Ilustración 15. Índice Parte Inferior

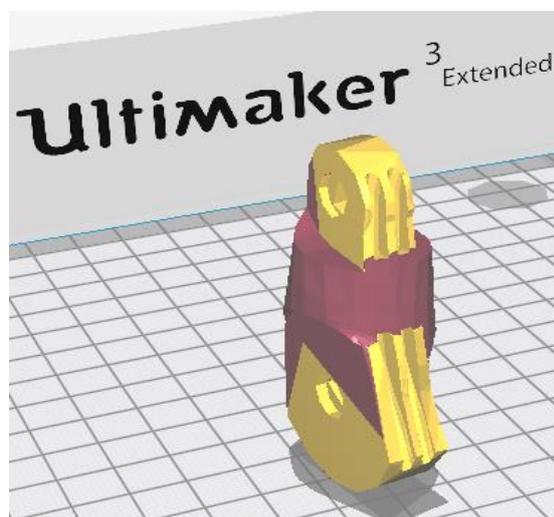


Ilustración 16. Índice PLA Parte Inferior

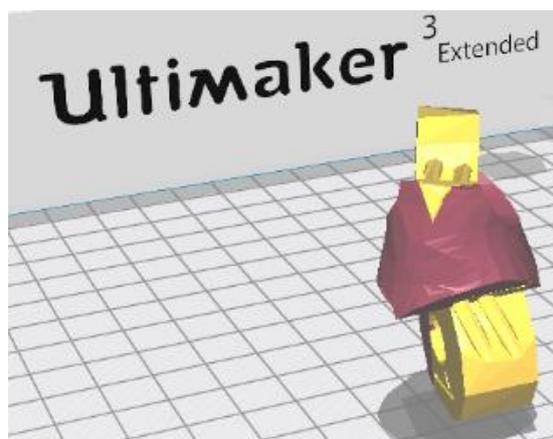


Ilustración 17. Pulgar Parte Inferior

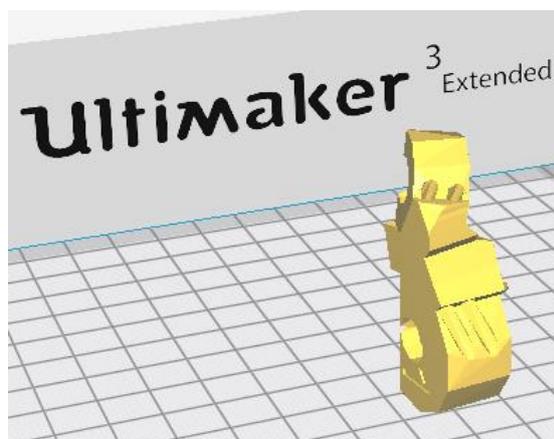


Ilustración 18. Pulgar PLA Parte Inferior

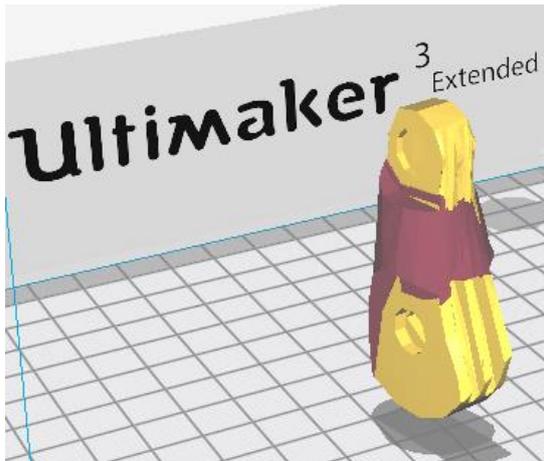


Ilustración 19. Meñique Parte Inferior

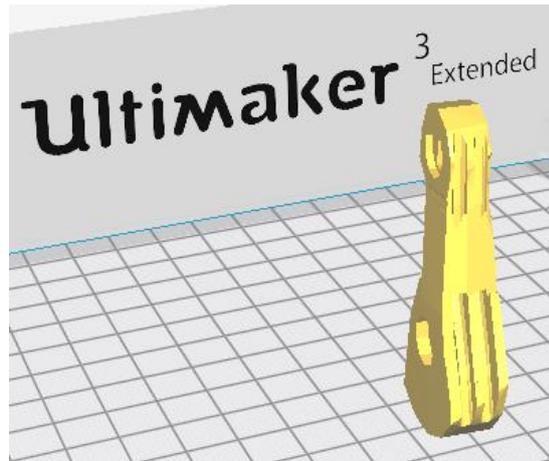


Ilustración 20. Meñique PLA Parte Inferior

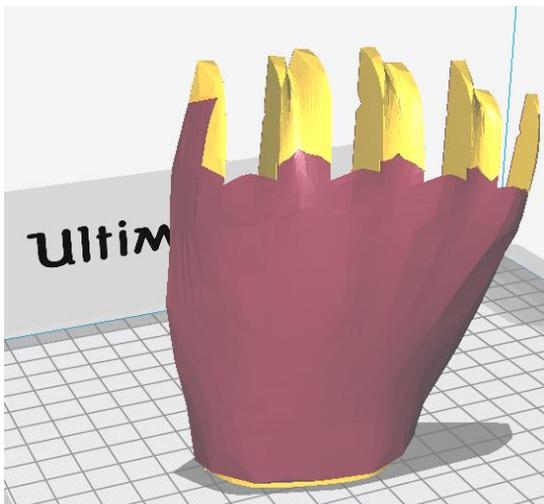


Ilustración 21. Mano Parte Superior

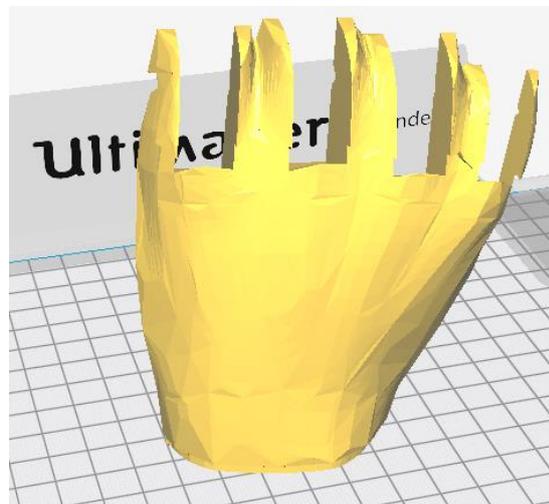


Ilustración 22. Mano PLA Parte Superior

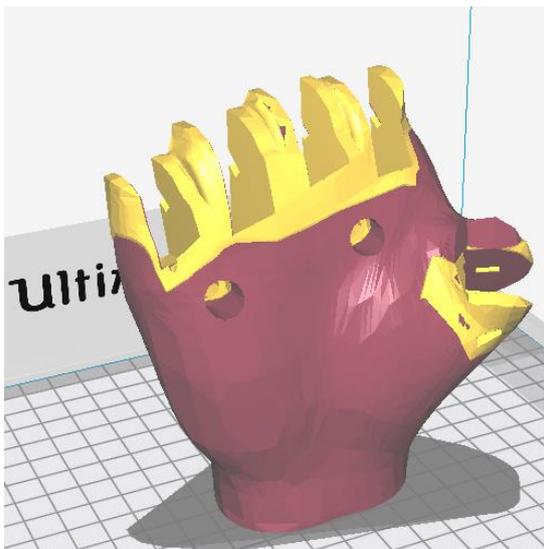


Ilustración 23. Mano Parte Inferior

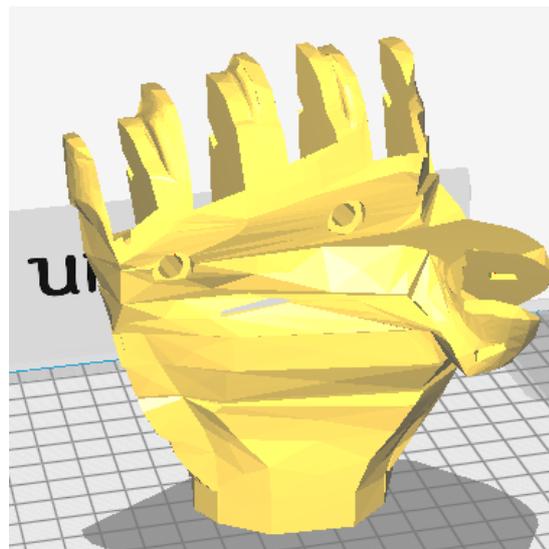


Ilustración 24. Mano PLA Parte Inferior

2. Tabla de Propiedades: Parámetros PLA

Las propiedades indicadas corresponden a los valores promedio de un lote típico. Las muestras de prueba impresas en 3D se imprimieron en el plano XY, utilizando el perfil de calidad normal en Cura 2.1, una Ultimaker 2+, una tobera de 0,4 mm, relleno del 90 %, una temperatura de tobera de 210 °C y una temperatura de la placa de impresión de 60 °C. Los valores son la media de 5 muestras blancas y 5 negras para los ensayos de tracción, flexión e impacto. La dureza Shore D se midió en un recuadro de 7 mm de grosor impreso en el plano XY, utilizando el perfil de calidad normal en Cura 2.5, una Ultimaker 3, un núcleo de impresión de 0,4 mm y relleno del 100 %. Ultimaker trabaja constantemente para ampliar la información de las fichas de datos técnicos. (<https://ultimaker.com/download/67583/TDS%20PLA%20v3.011-spa-ES.pdf>)

3. Tabla de Propiedades: Parámetros TPU

Las propiedades indicadas corresponden a los valores promedio de un lote típico. Las barras para los ensayos de tracción se imprimieron con 2 armazones, flujo de material del 107 %, temperatura de tobera de 260 °C, temperatura del lecho de 45 °C, diámetro de tobera de 0,8 mm, velocidad de relleno de 40 mm/s, velocidad de impresión de 30 mm/s y altura de capa de 0,3 mm. Las barras para los ensayos de flexión e impacto se imprimieron en el plano XY, utilizando el perfil de calidad normal en Cura 2.1, una Ultimaker 2+, una tobera de 0,4 mm, relleno del 90 %, una temperatura de tobera de 235 °C y una temperatura de la placa de impresión de 70 °C. Los valores son la media de 5 muestras blancas y 5 negras para los ensayos de flexión e impacto. La dureza Shore D se midió en un recuadro de 7 mm de grosor impreso en el plano XY, utilizando el perfil de calidad normal en Cura 2.5, una Ultimaker 3, un núcleo de impresión de 0,4 mm y relleno del 100 %. Ultimaker trabaja constantemente para ampliar la información de las fichas de datos técnicos. (<https://ultimaker.com/download/73768/TDS%20TPU%2095A%20v3.010%20ES.pdf>)