

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de prótesis mediante tecnologías de prototipado rápido

Design and manufacturing of
prosthesis through rapid prototyping
technologies

- MEMORIA -

Autor

SEDANO SÁNCHEZ, ALBERTO

Directores de proyecto

JUAN JOSÉ AGUILAR MARTÍN
JOSÉ ANTONIO DIESTE MARCIAL

Grado - EINA 2018/2019

INGENIERÍA DE DISEÑO Y DESARROLLO DEL PRODUCTO

0. ÍNDICE

FASE 0.....	3
1. Propuesta de TFG.....	3
2. Descripción de proyecto	4
FASE 1.....	5
3. Listado de problemas.....	5
4. Análisis estructural.....	6
5. Análisis de usuario.....	7
FASE 2.....	9
6. Prótesis modular.....	9
7. Conceptualización de módulos.....	12
8. Elementos no modulares.....	13
9. Elección de módulos.....	14
10. Obtención del liner.....	15
FASE 3.....	17
11. Diseño de la pieza de muñeca.....	17
12. Diseño de módulos a imprimir.....	18
13. Impresión de prótesis.....	19
14. Consideraciones finales.....	21
FASE 4.....	22
15. Actividades fuera de alcance.....	22
16. Bibliografía.....	23

1. PROPUESTA DE TFG



PROPUESTA TFG

GRADO EN: Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto
Especialidad (en su caso): _____

DATOS PERSONALES

D^a/D. Alberto Sedano Sánchez con DNI 25209800Y
y domicilio en C/ Viridiana 15, Bajo Izquierda
CP 50019 Localidad Zaragoza, Provincia Zaragoza
Teléfono 609241496 Correo electrónico (NIP) 719912 @unizar.es

DATOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO (Español): DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PRÓTESIS MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO.

TÍTULO (Inglés)¹: DESIGN AND MANUFACTURING OF PROSTHESIS THROUGH RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGIES.

TIPOLOGÍA: Tipo A Tipo B

Trabajo realizado dentro de un PROGRAMA DE
DE MOVILIDAD (Erasmus, ...): Sí NO

COAUTORÍA² CON:

Apellidos, nombre _____ NIP _____

DIRECTOR:³

APELLIDOS: AGUILAR MARTÍN NOMBRE: JUAN JOSÉ

DNI.: 25.143.814F ÁREA: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Diseño y Fabricación

En caso de no pertenecer a la UZ:

- INSTITUCIÓN/EMPRESA: _____

- CARGO: _____

- TÍTULO UNIVERSITARIO: _____

(La firma debe validarse mediante el sello del departamento/institución/empresa) Fdo: _____

CODIRECTOR: (Rellenar en caso de Codirección)⁴

APELLIDOS: DIESTE MARCIAL NOMBRE: JOSE ANTONIO

DNI.: 25161388D ÁREA: Ingeniería de los Procesos de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Diseño y Fabricación

En caso de no pertenecer a la UZ:

- INSTITUCIÓN/EMPRESA: _____

- CARGO: _____

- TÍTULO UNIVERSITARIO: _____

(La firma debe validarse mediante el sello del departamento/institución/empresa) Fdo: _____

PONENTE:⁵

APELLIDOS: _____ NOMBRE: _____

DNI.: _____ ÁREA: _____

DEPARTAMENTO: _____

(La firma debe validarse mediante el sello del departamento) Fdo: _____

¹ A efectos del SET, el título deberá indicarse, obligatoriamente, en Español e Inglés, previa conformidad del Director/Ponente.

² La coautoría debe justificarse mediante escrito anexo, diferenciando la contribución de cada autor de cara a su evaluación individual. IMPORTANTE: No es posible la coautoría en titulaciones con atribuciones profesionales.

³ En caso de que el Director/Codirector no sea profesor universitario:

- Requiere informe favorable de la Comisión Académica de la titulación (ver apartado INFORME).
- A efectos de la posible confidencialidad del Trabajo:
 - El tribunal evaluador tendrá acceso a toda la documentación depositada por el estudiante.
 - El acto de defensa tiene carácter público.

⁴ Mediante escrito aparte debe justificarse la necesidad de codirección, que requiere igualmente informe de la Comisión.

⁵ Cuando el Director o el Codirector no pertenezcan a la UZ o a una de las áreas de conocimiento vinculadas con la titulación, será necesario que un profesor de la misma asuma las labores de Ponente.

2. DESCRIPCIÓN DE PROYECTO

OBJETIVOS

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el diseño y desarrollo para su fabricación mediante técnicas de prototipado rápido de prótesis transradiales para invidentes, centrado en el caso de un paciente concreto. Las medidas para diseñar dicha prótesis estarán basadas en su fisionomía dada la exclusividad del caso. La prótesis tendrá la capacidad de ser modular para adaptarse a las actividades más relevantes realizadas por el paciente, siendo puramente mecánica; complementará y/o sustituirá las prótesis electrónicas que ya posee el paciente. Para ello se utilizarán métodos de ingeniería inversa e impresión 3D para su máxima adaptación al miembro superior de dicho paciente.

GOALS

The main goal of this Final Degree Project is to design and development for its manufacture of a transradial prosthesis by rapid prototyping techniques for the blind, focused on the case of a particular patient's case. This prosthesis' measurements shall be based on him due to the exclusiveness of the case. This device will have the capability for being modular in order to adapt to the most relevant activities performed by the patient. It will be completely mechanical, and will complement and/or replace his current electronic prosthesis. To do this, reverse engineer and 3D printing methods will be used, for its superior adaptation to the patient's upper limb.

METODOLOGÍA

FASE 1	Esta fase se caracteriza por ser menos activa en cuanto a diseño, es decir, se hacen estudios de diverso tipo para garantizar que las siguientes fases tienen una base consistente sin investigación previa. Se fundamenta en entrevistas al usuario, búsqueda de información referente al proyecto y estudio de mercado de las prótesis actuales.
FASE 2	En la segunda fase del proyecto, fase en la que ya se ha realizado el estudio de mercado y se ha investigado debidamente todo lo referente a tipos de prótesis, se comienza con la parte activa del proyecto, en cuanto a diseño y evolución de ideas. Se tratan la descripción de los componentes a diseñar mediante conceptualización y bocetado , así como la elección de los más convenientes.
FASE 3	En la tercera fase se procede al desarrollo de los componentes elegidos anteriormente, hasta llegar al punto de finalización del proyecto. Engloba el desarrollo del concepto de la pieza de muñeca definida en la anterior fase, el desarrollo de los conceptos de módulo elegidos en la anterior fase, la evolución del módulo de bastón, la fabricación del módulo y el planteamiento y desarrollo hasta la impresión de la prótesis, en fase prototipo.
FASE 4	Se recogen todas las acciones que se llevarán a cabo fuera del alcance del proyecto . Por las características del proyecto, afrontar todas las actividades que se citan en esta fase es una tarea que sobrepasa con creces los límites de peso del proyecto. Se describen las actividades de diseño y fabricación de nuevos módulos, mejora del encaje de antebrazo, utilización de nuevos elementos comerciales, etc.

3. LISTADO DE PROBLEMAS

DIFICULTADES A LA HORA DE UTILIZACIÓN

Al requerir cada vez más del sentido del tacto, una prótesis como la que posee sólo genera más problemas porque reduce sus zonas más sensitivas, que se encuentran en la zona final de los muñones, a un mero punto de anclaje para las prótesis, muy lejos de la zona donde podría tener mayor sensibilidad.

Otro problema con el que no se contaba en un principio es el de permitir asir correctamente un bastón para invidentes. La mano no puede agarrar con firmeza el bastón de forma natural, por lo que se tuvo que modificar el agarre del bastón para que la prótesis hiciera su función correctamente. Tampoco se puede realizar correctamente la función de asir correas de perros guía, muy necesaria para desplazamientos por la ciudad. Por esto este proyecto busca añadir versatilidad, pudiendo adaptarse mediante diferentes prótesis a cada situación cotidiana. Según sus propias palabras, muchas veces las manos biónicas entorpecen más que ayudan.

Con los cambios de peso que Alberto experimentó durante el proceso después del accidente, y su posterior vuelta a hacer **ejercicio** y vida cotidiana, muchas medidas tuvieron que ser reajustadas para que las prótesis no fueran incómodas, otra prueba más de la baja versatilidad de estos aparatos.

Por último y algo muy importante en este aspecto es que muchas veces las prótesis no reaccionan como deberían ante los impulsos enviados por el usuario; se **abren y cierran cuando no deben** e incluso vienen con funciones que parecen haber sido programadas para la mano de otro usuario, error posiblemente de la empresa que se encarga del mantenimiento de los dispositivos ortopédicos.

MANTENIMIENTO

Las prótesis transradiales presentan también otro problema crucial: la imposibilidad de realizar ejercicio con ellas. Alberto es aficionado al senderismo y las carreras de montaña, y pese a que los fabricantes afirman que resisten a agentes agresivos como el sudor o la humedad, resulta no ser tan cierto como en un principio se creía, lo que es razón de que haya habido problemas de averías inesperadas realizando ejercicios en gimnasio.

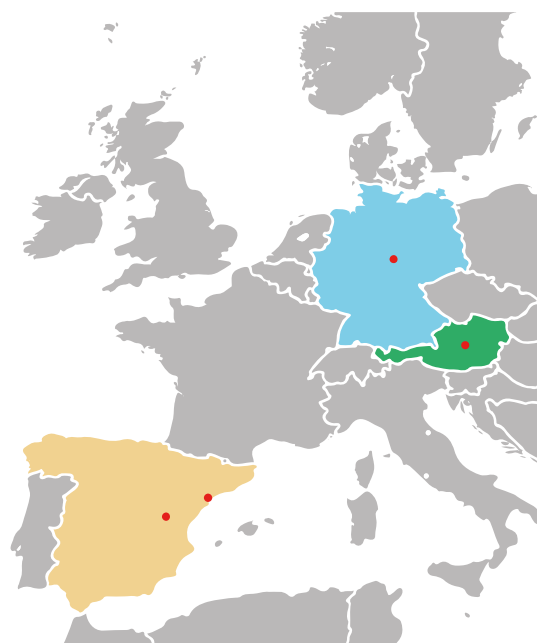
Estos dispositivos presentan una garantía de uso de 3-4 años, por lo que cada vez que se superan estos plazos, han de ser cambiadas parcial o totalmente.

COMUNICACIÓN CON LA EMPRESA

La empresa fabricante es alemana, por lo que la comunicación muchas veces se complicada. Un caso excepcional, relatado por el mismo Alberto, es que a la hora de volver la mano biónica de Austria donde iba a ser reparada, ésta vuelve con configuraciones de otros usuarios (las prótesis de este tipo permiten diferentes modos con diferentes acciones del brazo, lo que genera múltiples configuraciones).

Esto se traduce en que, aparte de volver a tener que configurarlo, supone perder confianza en el proveedor Ottobock, lo que hizo a Alberto plantearse una alternativa, lo que dio origen al planteamiento de este trabajo.

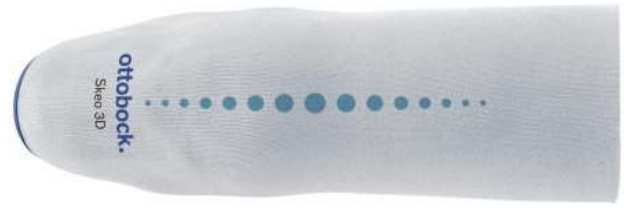
Se realizaron las medidas de los brazos en el centro tecnológico de Barcelona y la mayoría de interacciones directas para las sesiones de mantenimiento también se realizaron en este emplazamiento, a cientos de kilómetros del lugar de residencia de Alberto.



4. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

ELEMENTOS DE UNA PRÓTESIS TRANSRADIAL

- **Liner.** Se fabrica en materiales biocompatibles, y desde el momento de la medición de los brazos del paciente, ésta debe asegurarse que encaja de forma cómoda y se adapta de manera correcta a él, sin fugas de aire para tener una fijación máxima con lo que será el resto de la prótesis. Son comercialmente conocidos como *liners*. La gran mayoría de la información se extrae de la página web del fabricante Ottobock.(1)



- **Encaje de antebrazo:** En esta pieza se esconden tanto los circuitos encargados de que respondan las diversas funciones de la mano que se vaya a encajar en él, como los electrodos encargados de recibir la señal eléctrica proveniente de los músculos.

La unión con la mano se sitúa en una pieza contigua en la "muñeca" de ésta. A su vez, puede tener diversos adaptadores para encajar con la gran cantidad de manos, garfios y demás piezas y aportar versatilidad a la prótesis.

- **Pieza de muñeca:** Puede variar de una prótesis a otra en cuanto a la forma del encaje, su complejidad o sus funciones, como poder realizar movimientos en varios ejes para que la mano mantenga esa postura una vez anclada la pieza muñeca en esa posición).

Normalmente se encuentra ensamblada al encaje, dado que necesita estar localizada junto a los motores y baterías del sistema.



- **Prótesis transcarpiana:** Ésta es pieza que hará las veces de mano en el ensamblaje. Puede ser de muchos tipos, según el modelo, y tendrá más posiciones o "agarres" para coger objetos o hacer señalizaciones, posiciones individuales de dedos, agarres más sutiles y precisos como pinzas de pulgar e índice, etc.

En el dossier de diseño se especifican varios tipos de prótesis transcarpianas, como la mano I-Limb ultra, Bionic, Vincent, y por supuesto, la prótesis Michelangelo, que es la que Alberto utiliza actualmente en su día a día pese a los fallos que ocasiona.

5. ANÁLISIS DE USUARIO

SECUENCIA DE USO - COLOCACIÓN ■

Actualmente, el ciclo de utilización, es decir, la secuencia de uso de los brazo biónicos en el caso específico de Alberto (tratándose de él solo y sin ayuda externa) consta de los siguientes pasos:

- 1** Antes de usar los dispositivos, debe asegurarse que el brazo reúne las condiciones idóneas para introducirse en la prótesis; debe estar higiénicamente limpio además de lubricado adecuadamente. Es necesario que el **brazo resbale** para que se acomode perfectamente en su zona de reposo.
- 2** **Acomodación de la prótesis:** Alberto cómoda como bien puede la prótesis en su regazo (por lo que se debe colocar estando sentado). La posición que debe adoptar la prótesis es boca abajo, es decir, con la extremidad de la mano sujeta por las piernas de Alberto. Esto deja el hueco por el que entrará el brazo por la parte de arriba.
- 3** **Introducción del brazo:** En la posición anterior, el brazo derecho deberá adentrarse en la prótesis lo suficiente, es decir, hasta que se genere el vacío. Una vez sobrepasada la zona de presión, de la que se habla en esta misma fase, la prótesis queda afianzada.
- 4** Una vez afianzada, para accionar los motores que abren y cierran la mano, Alberto deberá **accionar determinados músculos** del antebrazo, y los sensores mioeléctricos de ambos lados de la prótesis recibirán las órdenes que actuarán para generar el movimiento.

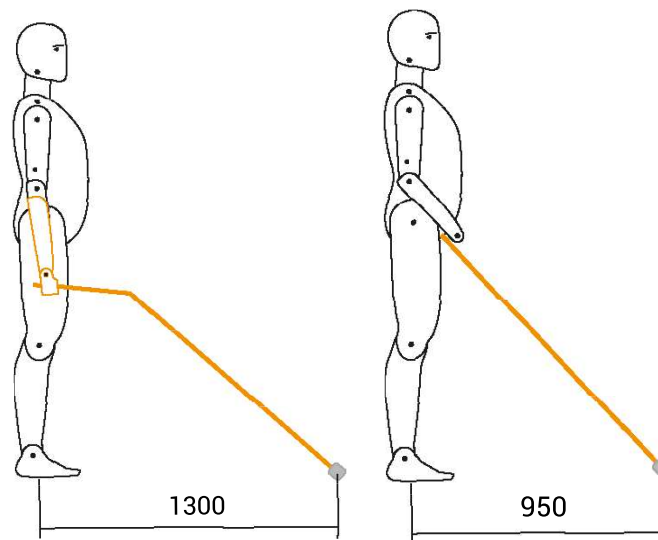
SECUENCIA DE USO - RETIRADA ■

- 1** Para retirarse las prótesis, el primer paso será **colocar el brazo en la misma posición** en la que estaba cuando pretendía colocárselas, con el fin de volver a contar con las piernas como punto de apoyo para la acción.
- 2** Debe introducir por el resquicio que deja la carne del brazo entre la prótesis y la zona de vacío, una varilla lo suficientemente larga. Al hacer esto, la varilla **rompe el vacío** generado dentro y como si se tratara de una ventosa y al ejercer fuerza con el antebrazo con la finalidad de retirar el brazo, se consigue desanclar la prótesis.

5. ANÁLISIS DE USUARIO

MEDIDAS GENERALES

Parte del cuerpo	Medida
Altura del codo	1140
Distancia hombro-muñón	540
Distancia hombro-dedo índice de prótesis	810
Tamaño bastón modificado	1330
Tamaño bastón estándar	1270



La zona de engrosamiento del muñón permite encajar la prótesis. Está colocada a unos 70 mm del final del muñón, y supone un engrosamiento de varios centímetros hacia el final del brazo. Esta zona es la que se denominará "zona de presión", lugar donde la prótesis hará el apriete necesario para generar el vacío.

LISTADO DE NECESIDADES

Estas necesidades fueron expresadas por Alberto en una de las primeras reuniones, y se añaden algunas más enumeradas posteriormente.

- **Utilizar bastón para invidentes:** Imprescindible en el día a día de cualquier invidente que quiera desplazarse.
- **Escritura:** Mediante un bolígrafo adaptado para escribir electrónicamente, se puede utilizar el teléfono de forma más sencilla.
- **Asir el arnés de perro guía:** Complementaría la función del módulo de bastón para invidentes.
- **Asir objetos cilíndricos/cónicos:** El agarre de pinza de la mano en forma de garra es útil, tanto para coger vasos, asirse a barras, etc.
- **Utilización de herramientas:** Aunque no sea una tarea primaria también es necesario cada día. La idea inicial parte de poder hacer un agarre ajustable para diferentes usos.
- **Apertura de puertas:** Las prótesis mioeléctricas de las que dispone Alberto actualmente pueden suplir esta necesidad, pero dado que no funcionan correctamente y no siempre puede llevarlas por esta razón, no dispone más que de sus antebrazos para realizar esta maniobra.

6. PRÓTESIS MODULAR

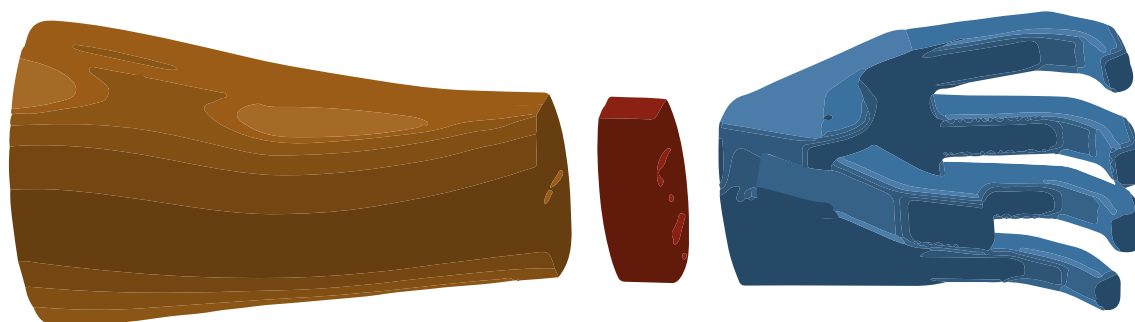
DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS

Desde un primer momento, el proyecto parte como una alternativa más útil frente a la idea de una prótesis mecánica/mioeléctrica, proponiendo la división en módulos de la parte correspondiente a la mano. Esto quiere decir que la prótesis a diseñar deberá poder dividirse en "dos" partes:

Una parte fija o encaje, que estará en constante contacto con el brazo. Es la que alberga el liner y hace el efecto de vacío permitiendo una unión solidaria con el miembro.

Una parte modular, intercambiable. El objetivo es tener a disposición de Alberto una serie de cabezales intercambiables, para cada acción básica que se necesite.

Para simplificar el proceso de diseño, la pieza de la muñeca encargada de ensamblar el módulo de la mano, será otra pieza independiente.



Además de esto, se plantea la fabricación del liner, generado a partir de silicona, que se localizaría dentro del encaje (naranja). Esta manera de satisfacer las necesidades básicas presenta una serie de mejoras con respecto a las prótesis comerciales actuales, entre ellas:

- **Adaptación a necesidades concretas** que no se contemplan en el listado de funciones de los dispositivos ortopédicos del mercado, como por ejemplo, salir a correr, actividades con perro guía, etc.
- **Mayor sencillez de manejo** al tratarse funciones estáticas. No se generan los problema de accionamiento involuntario de funciones , apertura y cierre no correspondido con impulsos,... que actualmente se le presentan.
- **El peso se ve reducido.** Actualmente cada dispositivo (antebrazo + mano biónica) pesan 1.200 gramos, una cantidad considerable teniéndose en cuenta que muchas veces se portan durante todo el día.
- **Necesitarán escaso nivel de reparación** con respecto al modelo actual, y de necesitarla sería de un coste mucho menor al que ofrecen empresas dedicadas al sector.

6. PRÓTESIS MODULAR

UNIONES DESMONTABLES ■

Para unir varias piezas de forma no fija (como lo son la soldadura, las uniones remachadas y las clavadas) existen varios procedimientos de unión, que necesitan tanto de elementos externos (unión atornillada, clipajes y pasadores) como de la misma forma de las piezas a ensamblar (raíles).

Unión atornillada: Necesitan de elementos roscados externos a las dos piezas a unir, o bien al menos uno de ellos si una de las piezas está pensada para funcionar a rosca-chapa. Proporcionaría una ventaja ante la dificultad de desensamblado involuntario porque normalmente estas uniones no se ven afectadas por las acciones a las que se sometan las piezas.



Clipajes: Son elementos que aprovechan las propiedades elásticas del material en el que están fabricados para poder unir dos piezas. Pueden ser piezas propias de la geometría de una de las dos partes o elementos externos, como clips comerciales para paneles eléctricos o tubos. Se fabrican tanto en metal como en plástico.



Guías: Su objetivo es permitir el desplazamiento en una dirección de una pieza respecto a otra fija. Así, no son elementos que permitan un movimiento relativo completamente cancelado, sino que anulan los grados de libertad de movimiento en varios ejes tanto de rotación como de desplazamiento.



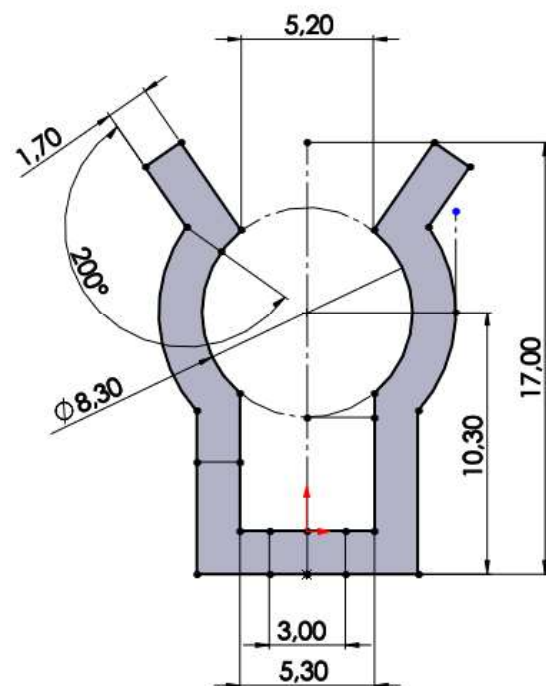
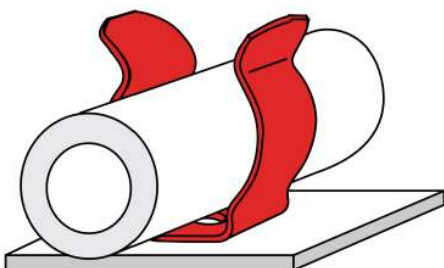
ELECCIÓN DE UNIÓN DESMONTABLE ■

El modelo de clip escogido para el proyecto es el clip de tubo, con las dimensiones especificadas en el croquis de la imagen.

Los modelos de clip que ofrece la empresa Araymond Industrial se encuentran descritos en su catálogo de clipajes (5). Este catálogo se encuentra en la sección de anexos de este dossier de proyecto.

El modelo en concreto tiene el número de referencia 053133010. Este modelo tiene como cotas de gálibo las siguientes medidas.

Diámetro	Longitud	Altura
7,5-8,5	9,3	11.5



El clip de la imagen está adaptado para ser impreso en 3D, dado que las características del plástico no son las mismas que las del metal.

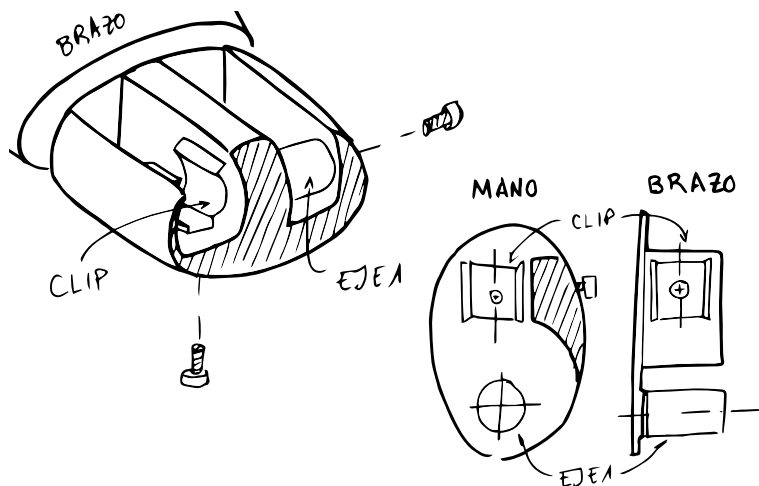
6. PRÓTESIS MODULAR

CONCEPTUALIZACIÓN DE SISTEMAS DE UNIÓN

Una vez evolucionado el concepto de unión desmontable mediante clips y tras haber estado experimentando tanto en el entorno de ensamblaje digital como haciendo pruebas impresas en 3D (consultar la parte de anexos correspondiente) se llegó a tres formas finales de unión, cada una con diferentes características, ventajas e inconvenientes.

La primera forma se basa en un sistema de dos pasos: movimiento de desplazamiento hacia delante para ensamblar clips en un sentido, y de desplazamiento hacia abajo para unir un último clip en este sentido de movimiento.

La principal desventaja es que es un movimiento con una **relativa facilidad de desanclaje involuntario**, al ser movimientos que pueden realizarse de forma natural en el día a día de uso de las prótesis.

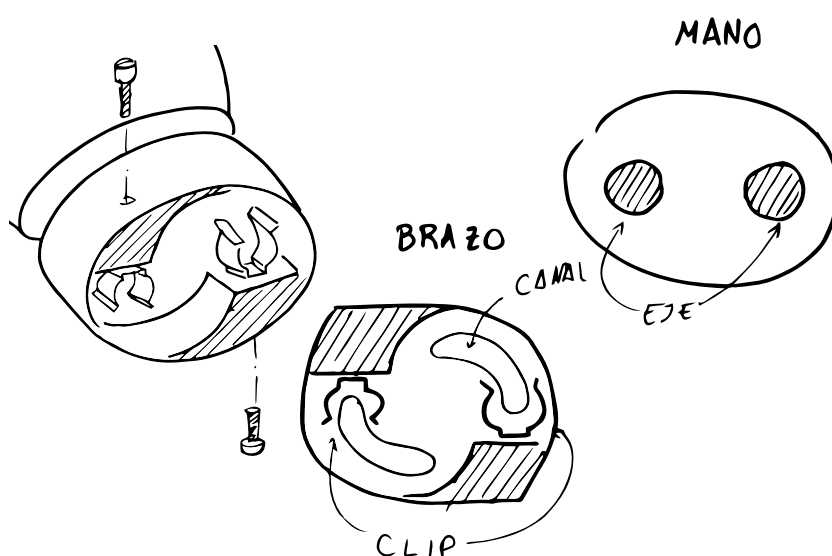


El segundo modo de anclaje cuenta con un primer movimiento de desplazamiento en sentido vertical hacia abajo, y un segundo desplazamiento en rotación a favor de las agujas del reloj.

Esta pieza en rotación choca con un clip que permite la fijación de los dos elementos de forma solidaria.

Aunque los movimientos **dejan de ser tan naturales** como el del primer tipo de anclaje, la desventaja en este caso de este sistema es que **no es simétrico** en sus ejes de fijación.

El tercer y último tipo conjuga dos movimientos: uno, de desplazamiento en el eje horizontal hacia delante y otro, de rotación horaria. Tiene como objetivo anclar dos varillas en dos clips de forma simultánea. Una pieza fija en el brazo con ranuras impide el desensamblaje sin haber girado en el sentido contrario previamente, lo que permite al usuario cambiar de cabezal.



El movimiento es simétrico. Se guía el movimiento centrado en los ejes de simetría de la pieza.

Es un movimiento basado en la rotación. Esto quiere decir que será más difícil de desacoplar. **El diseño resulta reconocible por su simplicidad**, es más intuitivo que los otros diseños.

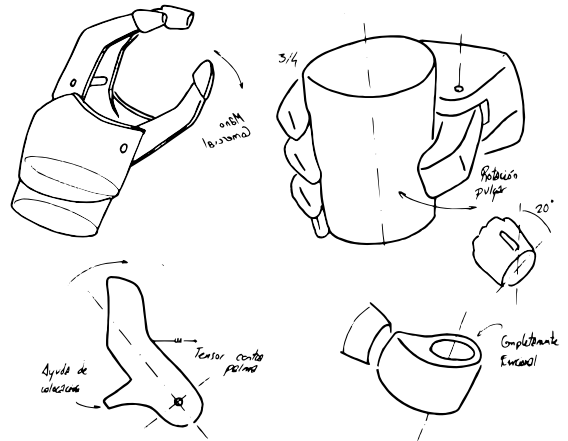
Es el modelo elegido como sistema de unión.

7. CONCEPTUALIZACIÓN DE MÓDULOS

CONCEPTO I

El primer módulo que se presenta es útil no solo para la sujeción de objetos sino que también se piensa como medio para coger latas, asirse a barras de transporte público, etc.

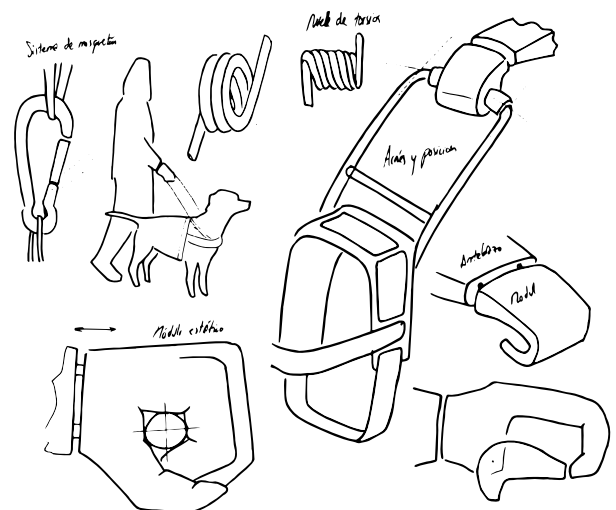
Para suplir todas esas carencias, el módulo debe poder permitir la sujeción de un elemento de estas características, y además adaptarse a los diferentes tamaños de los innumerables objetos que una persona puede sujetar a lo largo del día.



CONCEPTO II

Es indiscutible que un perro guía es un recurso extraordinariamente útil en el día a día de una persona invidente. Como se puede ver en los bocetos, se plantea un sistema de **mosquetón** acoplado al módulo. Teniendo en cuenta las consideraciones descritas en la fase 1, el diseño de este módulo debe cumplir dos condiciones básicas:

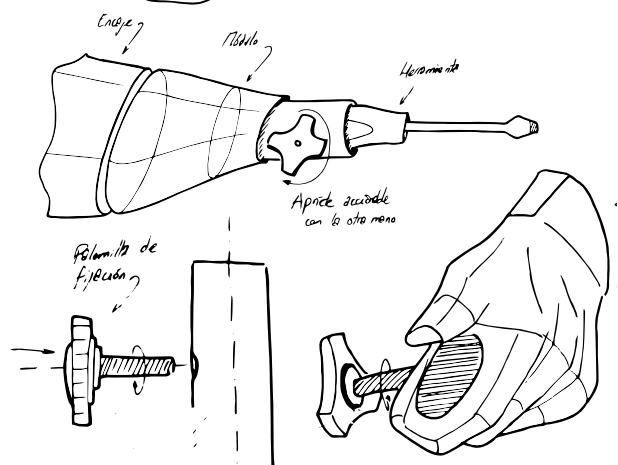
- Afianzamiento de la correa en una posición fija.
- Desanclaje del arnés de la forma más simple posible. (2)



CONCEPTO III

Como existen infinidad de utensilios de mango que se pueden usar en el día a día, la solución que se busca es un elemento que, mediante un sistema de ajuste, pueda afianzar diferentes herramientas, como un cepillo de pelo de perro, un destornillador o cualquier herramienta pequeña de mango.

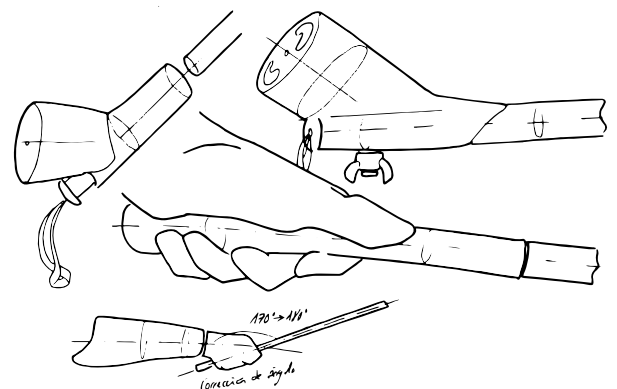
Esto se debe a la gran cantidad de objetos y herramientas con mango que existen, con diversas medidas que de otra forma no tendrían forma de ser ancladas al módulo de herramientas de forma segura.



CONCEPTO IV

El sistema actual que utiliza Alberto en su día a día es un bastón modificado, dada la incapacidad de las prótesis para poder realizar correctamente esta tarea de forma independiente.

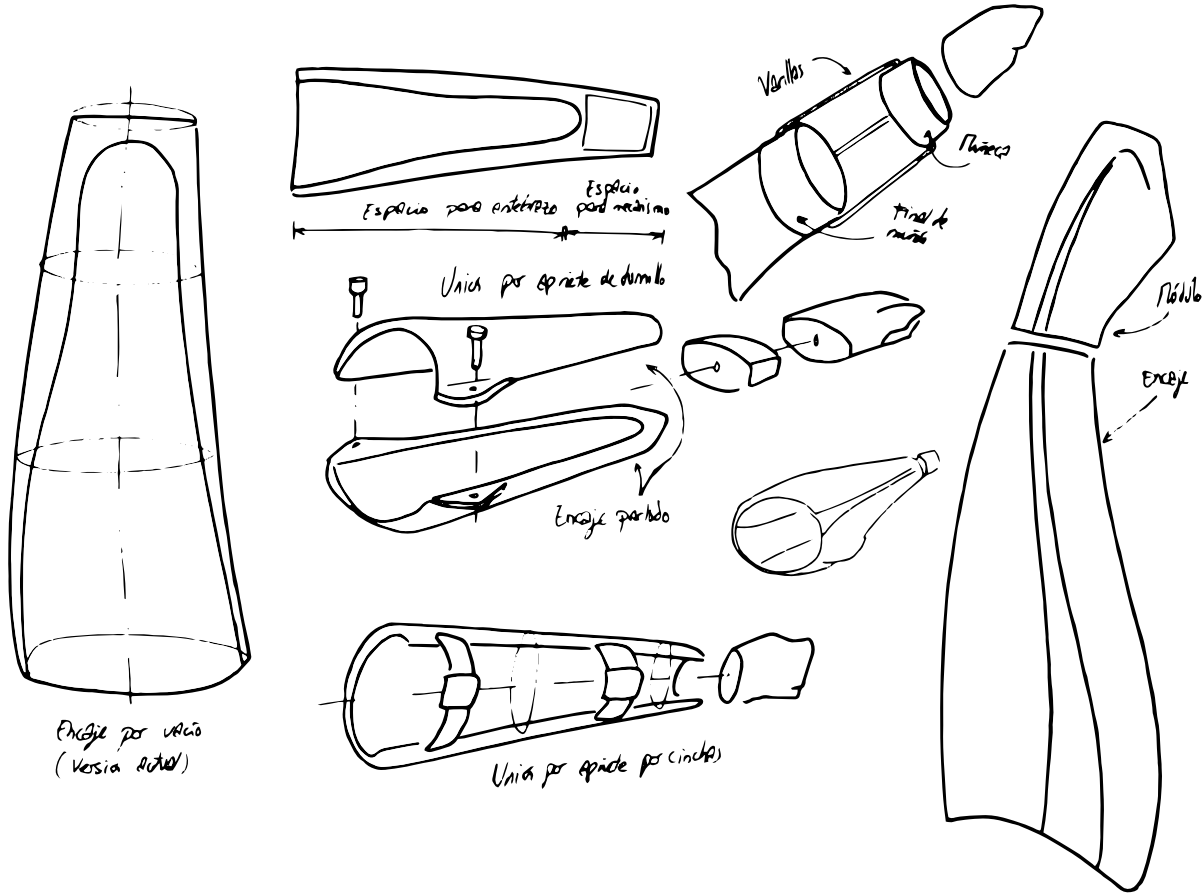
El nuevo sistema pretende eliminar la carga innecesaria de la pesa en la contera, lo que hará más fácil el manejo diario. Para hacerlo, se debe orientar el bastón con un vector de dirección cercano al vector del brazo del usuario. La información acerca de uso de bastón se reúne en un documento oficial de la ONCE. (3)



8. ELEMENTOS NO MODULARES

DISEÑO DE ENCAJE TRANSRADIAL

El encaje de la prótesis es la **parte que va directamente unida al antebrazo en una prótesis transradial**. Es decir, es la base donde se ancla todo el sistema de manos, garfios y demás útiles para que el usuario que sufra de amputación pueda utilizar dichos mecanismos y terminaciones. Entre los objetivos del proyecto, se encuentra el diseño y desarrollo con posterior fabricación mediante técnicas de prototipado rápido de un encaje funcional para el usuario objetivo del proyecto.

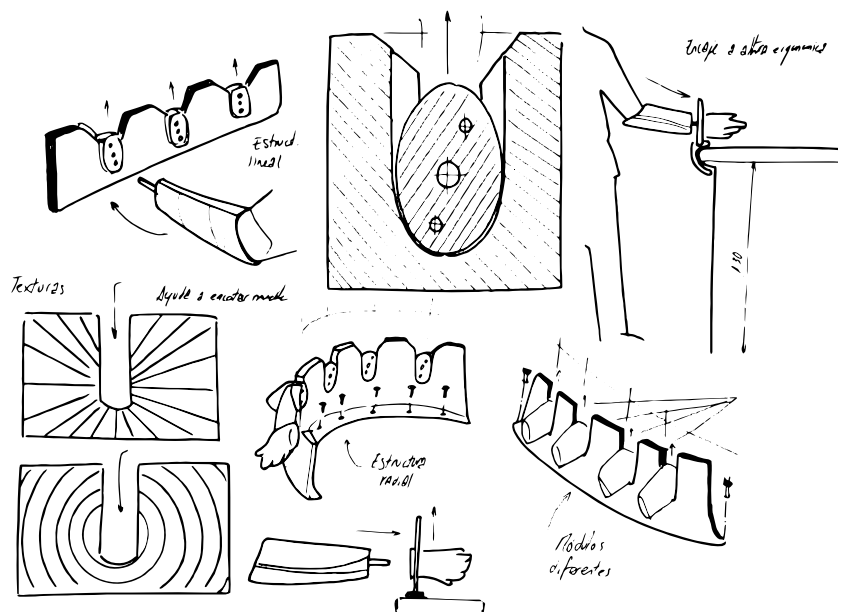


DISEÑO DE MUEBLE SOPORTE

El mueble soporte de los módulos es el elemento del proyecto que almacena de forma igual de accesible todos los módulos que se disponen para ser usados.

No se define por completo dado que queda fuera del alcance del proyecto (No tiene sentido seguir evolucionando el mueble si el encaje o algún módulo sufre evoluciones que hagan inservibles los elementos ya diseñados).

La forma básica del mueble se basa en una serie de ranurados practicados en el tablero, donde se asentarán los diferentes módulos.



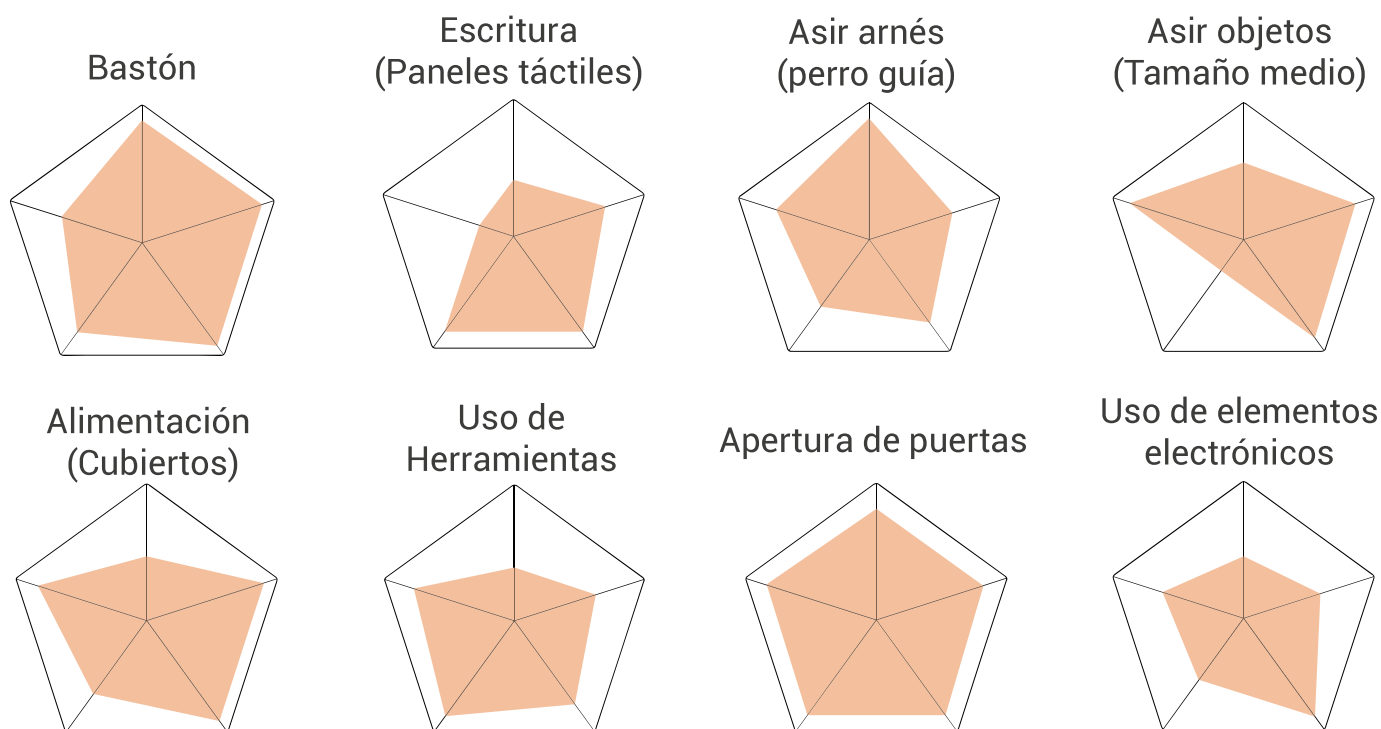
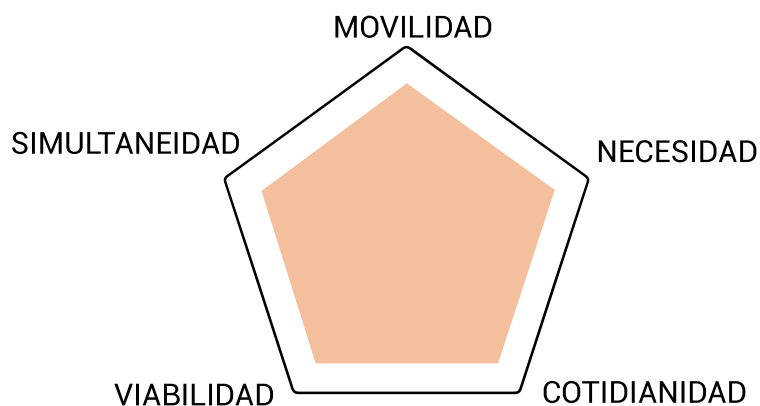
9. ELECCIÓN DE MÓDULOS

DISCRIMINACIÓN POR FACTORES DE DISEÑO

Es inviable tener un módulo diferente para cada una de las acciones, por lo que en esta página se procede a realizar una técnica creativa de discriminación de acciones basada en la fragmentación de dicha acción en cinco puntos, y comprobar como los satisface.

En función de cómo rellene el siguiente diagrama, se podrá ver cuales son los puntos fuertes y débiles de cada posible módulo con respecto a cada uno de estos punto básicos.

La acción que rellene el pentágono de ponderación de forma más satisfactoria será la elegida, así hasta llegar a la elección de tres módulos diferentes que suplan la mayor necesidad.



Los cabezales escogidos para ser desarrollados en fases posteriores del proyecto son:

- **El módulo de bastón**, un imprescindible en la vida cotidiana, dadas las mejoras que aporta en relación a la movilidad y eficiencia respecto al sistema actual.
- **El módulo de perro guía** principalmente para complementar la función del bastón, en trayectos donde el bastón quizá no sea suficiente.
- **Capacidad de asir herramientas de mango**. Para ello, se planteará un módulo con receptáculo para poder afianzar las diferentes herramientas.
- El último módulo elegido es el **agarre de vasos y objetos cilíndricos**, dada su versatilidad para poder adaptarse no solo a objetos como tal sino, por ejemplo, asirse a barras de autobús, pomos de puerta, etc.

10. OBTENCIÓN DEL LINER

PROCESO DE MEDICIÓN

Para construir la prótesis, se debe **obtener el liner o guante de silicona**, por lo que se necesitaba crear un molde donde colar dicha silicona. Para obtenerlo, se debe hacer a medida del paciente, por lo que una medición mediante sistemas de ingeniería inversa es necesaria.

Para esto, se dispuso de un **brazo escáner** de la empresa FARO, propiedad de la EINA. Los resultados son visualizados con el software **geomagic Qualify 13**. Los pasos a seguir siempre son más o menos los mismos, cuyo objetivo es obtener el modelo de polígonos, o Wrap. (4)

OBTENCIÓN DEL MODELO

Las herramientas más usadas en esta fase son las siguientes, todas orientadas a la **eliminación de información no relevante** del modelo de la nube de puntos.

Eliminación de puntos ajenos al modelo a escanear: Siempre que se escanea un objeto mediante este tipo de técnicas láser para generación de nubes de puntos, se cometen errores de recogida de datos en forma de elementos no pertenecientes al objeto que interesa extraer un modelo digital, este es el caso de elementos de apoyo del objetivo, como por ejemplo, la mesa donde descansaba el brazo a medir. El paso inicial es eliminar de la nube todos los puntos pertenecientes a este tipo.

Eliminación de ruido: Cuando se termina esta primera parte, queda el modelo que interesa convertir, pero tiene una superficie difusa, debido a los errores de medición, en este caso mayores por la falta de medios de inmovilización del sujeto. Los errores por ruido se pueden apreciar por la alta dispersión de puntos.

Conversión a malla: Una vez terminado con el procesado de puntos, se puede realizar un mallado con dichos puntos, convirtiendo así esta nube en un facetado de triángulos. La cifra de triángulos debe ir por debajo de los **150.000** para que no sea un archivo muy pesado, por lo que se redujo a este número en un principio.

Eliminación de islas y facetas conflictivas: Debido a los fallos intensificados por la falta de inmovilización, se dieron más problemas como cadenas de triángulos superpuestos a la superficie real, o triángulos volteados que impedían la correcta formación de una malla. Con herramientas de limpieza de malla y de forma manual, se pueden reducir y eliminar todos estos errores hasta dejar una superficie única.

Suavizado de superficie: Aún sin ruido de puntos, la superficie resultante de malla no siempre es lisa, hay muchas zonas donde se mantiene "rugosa" por diferentes direcciones de normal de los triángulos.

Mediante la herramienta **Defeature** y el borrado y reconexión de zonas conflictivas demasiado complicadas de arreglar para el programa de forma automática, se consigue una superficie lo más lisa posible.

A la derecha se puede ver la evolución del archivo desde que se tomó la medida con la nube de puntos al resultado poligonal, lo único que resta es eliminar las irregularidades de la base para completar el modelo poligonal con la superficie lo más lisa posible.



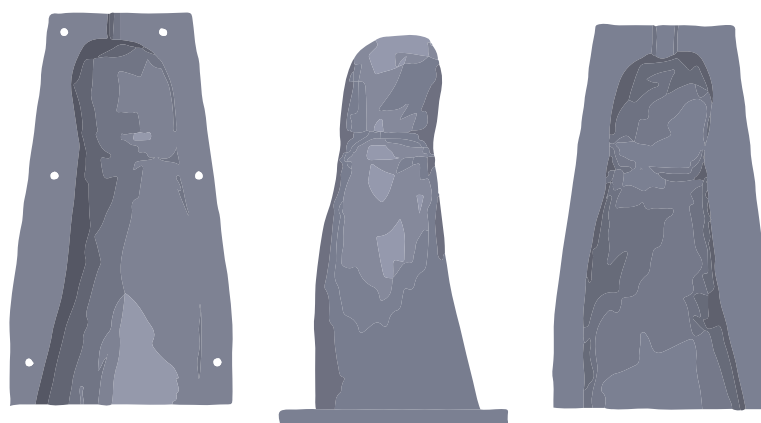
10. OBTENCIÓN DEL LINER

OBTENCIÓN DEL MOLDE

Cuando se obtiene el archivo STL del brazo, este debe ser modificado en programas paramétricos de CAD. En este caso se usó el programa Solidworks de Dassault Systems. Para poder ser útil en la creación del liner, el modelo debe ser alterado para obtener las piezas del molde final. El molde consiste en tres piezas:

- **Dos piezas hembra**, es decir, retienen el líquido de la silicona hasta la solidificación por la parte exterior. Se separa en dos mitades debido a que por la propia geometría del brazo derecho, sería imposible de sacar una vez solidificado. Estas piezas se generan restando a un cubo el modelo del brazo.

- **Una pieza basada en el brazo** escaneado, con una modificación en la base para poder ser anclada al molde hembra.



El objetivo es dejar una **separación de 2 mm** entre el molde macho y la hembra, que será el espesor final del liner de silicona. Se unirá por medio de tornillos e insertos en la pieza, que se fabricará mediante técnicas aditivas de impresión 3D.

COLADO DE SILICONA

Se realizaron tres liners de silicona, por lo que fueron necesarios tres moldes diferentes para el colado. Las diferencias clave de los moldes son las siguientes:

- El **primer liner** sobrepasa por mucho la cota mínima para realizar un apriete que se pueda palpar, por lo que es inservible para ser utilizado. Otra característica es que la silicona usada en este primer colado es diferente en cuanto a propiedades mecánicas, más robusta que las siguientes, pero no se trata de un material biocompatible.

- El **segundo liner** se adapta mejor a las formas del antebrazo, pero presenta problemas por acumulación de burbujas en determinadas zonas que propician un punto de rotura en esa posición. La silicona es biocompatible pero de una menor resistencia a rasgarse. Aún no consigue un apriete óptimo

- El **último liner** es el más fiable en cuanto a geometría, pese a que hay zonas de la base del antebrazo que siguen sin conseguir un apriete cercano al óptimo. En la zona de presión se consigue un apriete mucho mejor que las versiones anteriores, pero persiste el problema del material a usar, que sigue siendo demasiado endeble como para ser utilizado. Se solventa el problema de las burbujas acumuladas pero aún no se ha llegado a la versión definitiva.

11. DISEÑO DE LA PIEZA DE MUÑECA

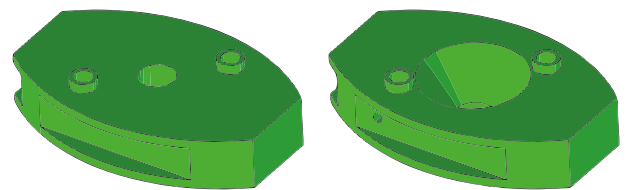
EVOLUCIÓN DE DISEÑO ■

Gracias a las iteraciones de diseño, el concepto puede optimizarse en otros aspectos como la intuitividad y la sencillez de ejecución de la acción. Después de sesiones de evolución del concepto, se logró mejorar el diseño mediante los siguientes cambios en la geometría:

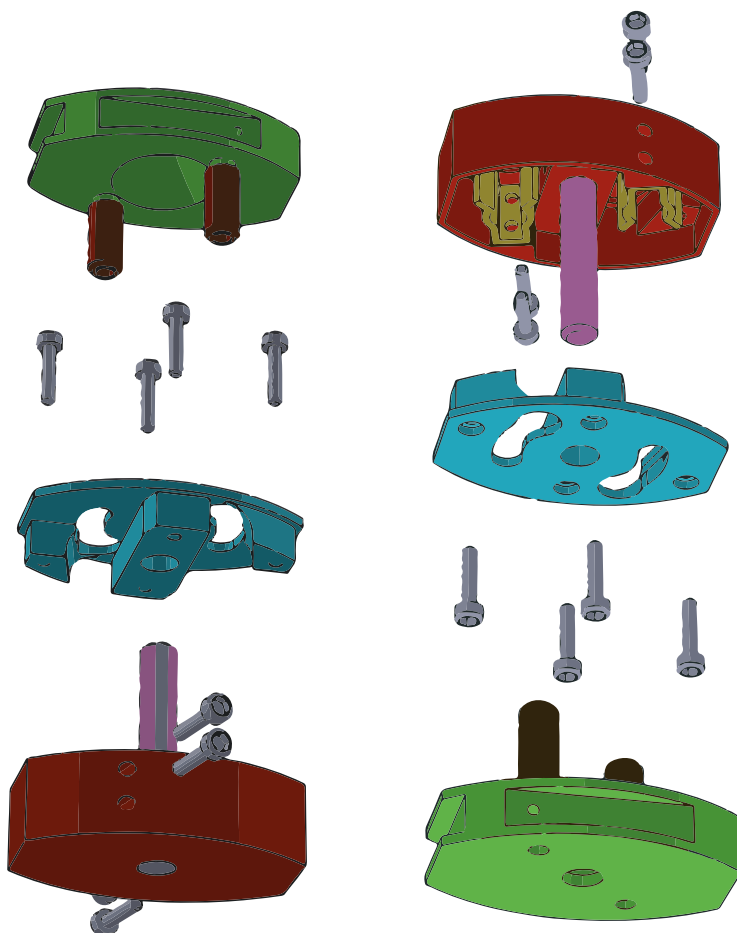
Implementación de un eje central, incluido en la parte perteneciente al encaje, que actúa como pieza céntrica sobre la cual los pines del mecanismo acaban ensamblando con los clips de la pieza perteneciente al módulo.

También se refina la forma, de una elipse a la forma de la imagen inferior, con el fin de hacer el modelado posterior de los módulos.

Achaflanado de determinadas zonas para favorecer la inserción de los diferentes cuerpos, como los pines que rotan como el eje central, para alojarse en las piezas donde encajarán.



Este es el ensamblaje resultante. A continuación, se explica con detalle la función de cada una de las piezas modeladas:



La pieza base, que se encuentra anclada al encaje del antebrazo, sirve para ensamblar los clips y de cubo donde albergar el eje central.

El eje central permite la rotación relativa de los componentes módulo y pines.

Los clips, que se encargan de abrazar los pines.

Los pines, colocados en el módulo, rotan concéntricamente con el eje central, acaban siendo prensados por los clips

La placa de separación impide que los pines se salgan de su posición una vez hayan rotado.

El módulo tiene formas diferentes, en este caso se simplifica con la forma de la imagen. Tiene las acanaladuras que le permiten acoplarse con el mueble que almacenará los diferentes módulos.

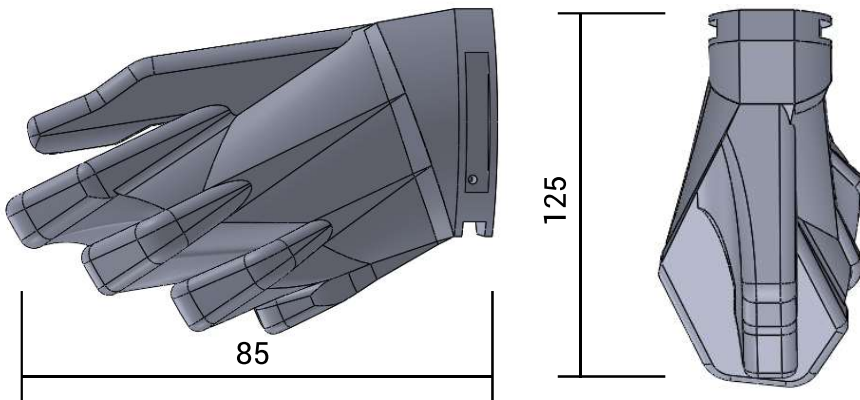
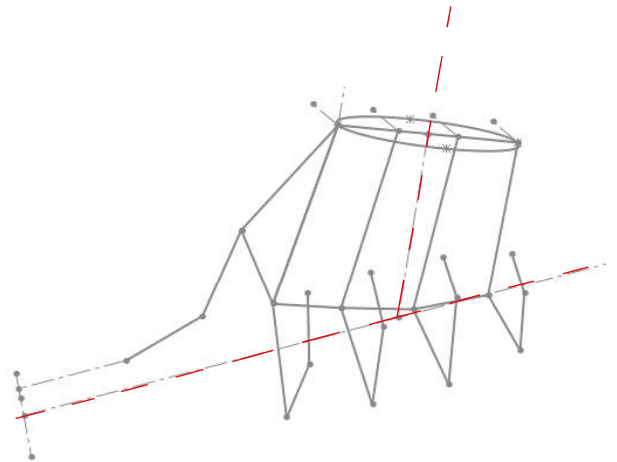
12. DISEÑO DE MODELOS A IMPRIMIR

DESARROLLO DEL MÓDULO IV

El primer diseño tiene la forma de agarre de tipo recto, es decir, la **brazo viene dado por la posición del brazo**. Por esto, el ángulo que se genera con la dirección del vector del bastón con respecto al vector del brazo.

Para poder modificar la posición relativa de los dedos, palma o dirección del bastón, **el modelo se basa en una estructura "ósea"** formada por croquis simples, 5 croquis de dedos, uno de palma y un croquis que marca el vector de dirección de bastón.

Mediante soleavados y revoluciones se forman los dedos y la palma y se consigue una semejanza con una mano real manteniendo la funcionalidad inicial.



Este modelado es el segundo que se ha realizado para el trabajo, con una **mejor orientación del vector** del bastón con respecto al del antebrazo.

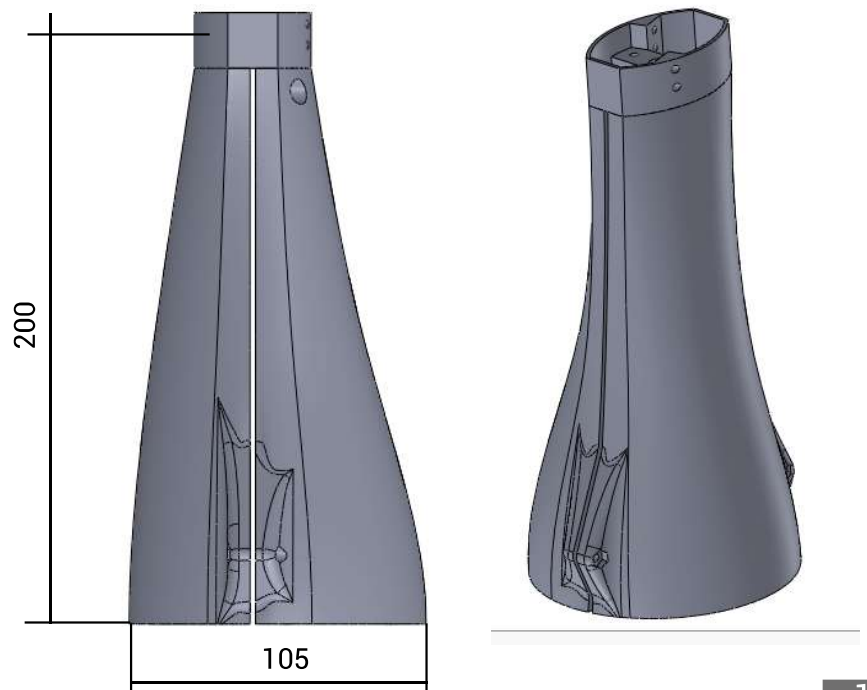
En el dossier se enseña la evolución y cómo era el diseño inicial, el cual sufrió las siguientes alteraciones en su diseño.

DESARROLLO DEL ENCAJE

Debe quedar claro que este diseño de encaje transradial solo es un acercamiento **puramente funcional**, un **prototipo** para que Alberto compruebe los resultados del trabajo y dé constancia de la mejoría que supone la alternativa planteada en el proyecto ante sus necesidades más básicas.

Por esto, el diseño final se corresponde al del final del proyecto y su alcance, no al diseño final que acabará por tener. Dicho esto, el encaje a diseñar debe tener en cuenta una serie de consideraciones iniciales:

- Debe poder **albergar el liner de silicóna**.
- Debe seguir la **dirección natural del brazo** de Alberto.
- Debe almacenar dentro una de las partes del **sistema de unión**.

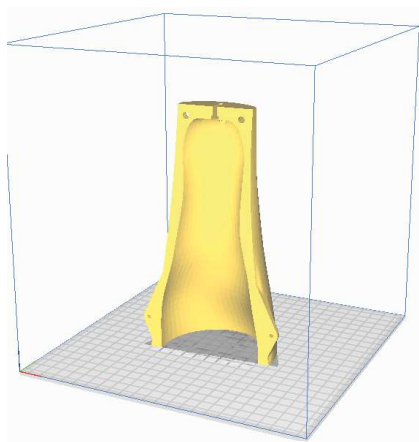


13. IMPRESIÓN DE PRÓTESIS

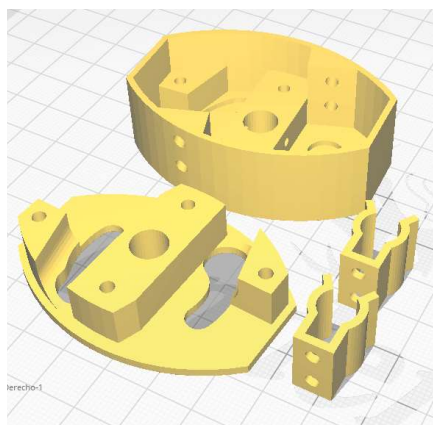
IMPRESIÓN DEL ENCAJE ■

La impresión del encaje se realiza en 4 fases. Cada fase se corresponde a las tandas que hacen falta para imprimir todas las piezas. Por tiempos de impresión, la división se realiza como aparece en las imágenes inferiores. La razón principal por la que dividir las impresiones en fases es que si surgiera un fallo con alguna, habría que repetir toda la impresión, malgastando tiempo y material.

Se debe encontrar el punto de equilibrio de optimización entre un tiempo razonable de impresión total y asegurarse que no hay fallos importantes de impresión debido a exponer la máquina a volúmenes elevados. Se ha añadido la mano para contextualizar los tiempos de impresión.

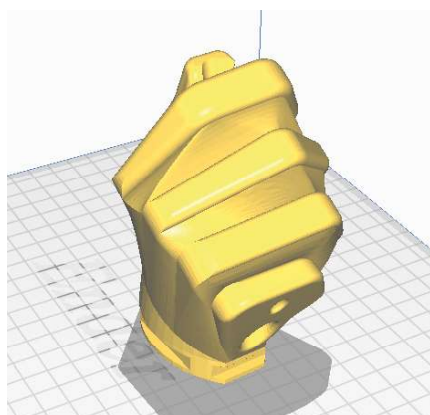


Tamaño de extrusor: 0.6 mm
 Altura de capa: 0.3 mm
 Infill: 5%
 Paredes por capa: 3
 Temperatura de extrusión: 215° C
 Tiempo de impresión: 5 h:45 min x2 (Dos carcasas casi idénticas)
 Filamento: Negro / 1,75 mm



Tamaño de extrusor: 0.4 mm
 Altura de capa: 0.2 mm
 Infill: 10%
 Paredes por capa: 2
 Temperatura de extrusión: 215° C
 Tiempo de impresión: 45 min
 Filamento: Negro / 1,75 mm

IMPRESIÓN DEL MÓDULO ■



Tamaño de extrusor: 0.6 mm
 Altura de capa: 0.25 mm
 Infill: 15%
 Paredes por capa: 2
 Temperatura de extrusión: 215° C
 Tiempo de impresión: 3 h:15 min
 Filamento: Negro / 1,75 mm

13. IMPRESIÓN DE PRÓTESIS

RESULTADOS



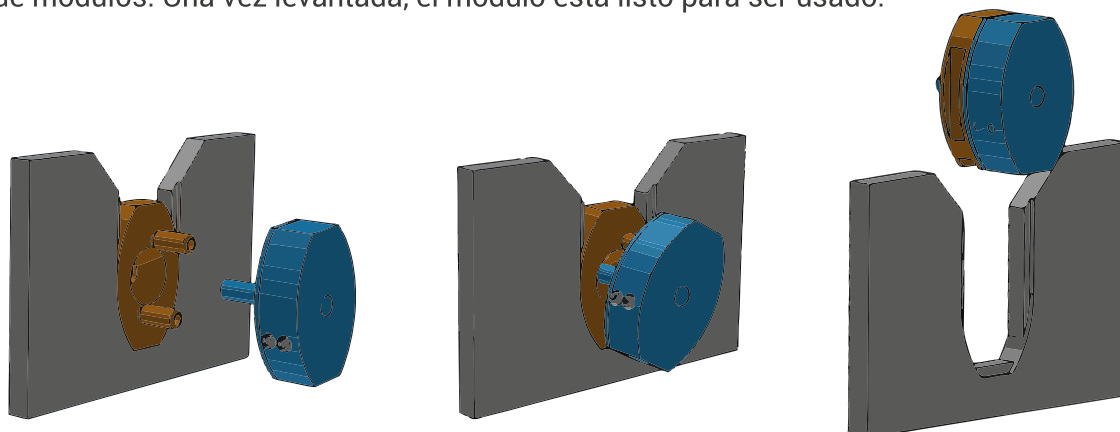
Impresión de los componentes de la prótesis en filamento plástico PLA. La imagen superior muestra la **prueba de prótesis**, donde se pudo comprobar el ensamblaje completo con el bastón blanco integrado.



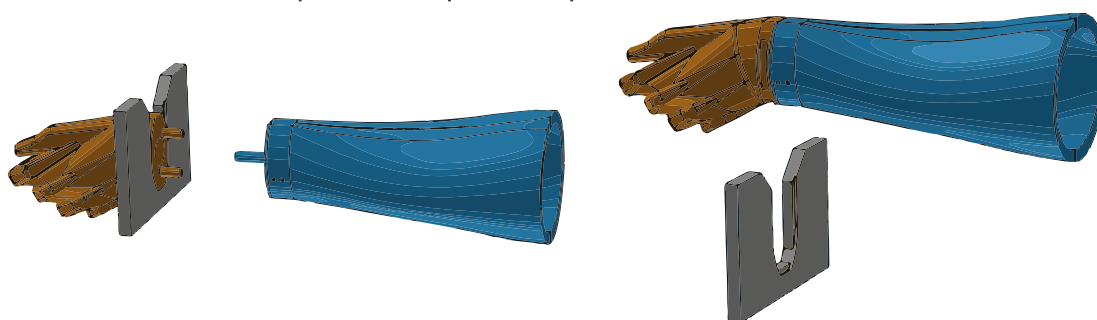
14. CONSIDERACIONES FINALES

ENSAMBLAJE CON EL CONJUNTO ■

Una vez afianzada la pieza, se debe **eleva el conjunto**, siguiendo las vías marcadas por la ranura del mueble de módulos. Una vez levantada, el módulo está listo para ser usado.



El proceso de retirada e intercambio de módulo es exactamente el **mismo**, pero en el orden **invertido**. Se debe colocar el módulo en una de las ranuras del mueble, girar en sentido horario y buscar el punto de engrosamiento en la ranura de la placa de separación para retirar el módulo.



El resultado de los dos pasos correspondientes al inicio y el final de la secuencia de colocación de los módulos. **El encaje y la muñeca (azul) forman una sola pieza al estar unidas por tornillería.**

CONCLUSIONES DE PROYECTO ■

El proyecto ha tomado **muchas más horas de lo que inicialmente se planteó**, dado que muchos de los procesos (como la obtención de moldes de colado) tomaron mucho tiempo del proyecto haciendo disminuir el rendimiento horas de trabajo/resultados finales.

También es destacable, y en parte justificable, la gran **diferencia de tiempos estimados** de finalización del proyecto. Esto se debe a que gran parte de las actividades requerían de la presencia de Alberto, el usuario objetivo del proyecto, que reside en Teruel.

Los resultados de la prueba final (página anterior) fueron **positivos**, el mismo usuario pudo comprobar la **mejora ergonómica** que supone el módulo de bastón con respecto a la prótesis actual. También se pudo corroborar la **eficiencia del sistema de unión de módulos**, tanto al ser colocado como su fiabilidad en el uso normal.

Por otra parte, en momentos de reunión se ha comentado que algunos miembros de la familia de Alberto estaban iniciándose en el aprendizaje del mundo de la impresión 3D. Esto podría ser interesante y dado el caso, sería un punto innovador el que la familia de Alberto se capaz de **autoabastecerse en el diseño de sus propios módulos** en caso de la urgente necesidad de adquirir uno que no estuviera planteado en el proyecto. Este nuevo enfoque autosuficiente podría ser una nueva forma de concebir el final del proyecto, siendo una base para poder crear más módulos, aunque es solo un posible planteamiento.

15. ACTIVIDADES FUERA DE ALCANCE

<p>Diseño de nuevos módulos</p>	<p>En la última fase se describía la evolución de solo uno de los módulos, el módulo de bastón, por ser el elegido como solución más directa y con mayor facilidad de obtener resultados palpables, además de porque la fabricación de todos los módulos planteados supone una parte de peso que el proyecto no tiene por qué conllevar, dada la extensión de este.</p> <p>Los siguientes módulos a fabricar siguen la lista de necesidad planteada en un primer momento es ampliable .</p>
<p>Mejora de encaje de antebrazo</p>	<p>Mejora de liner: Pese a que se realizaron tres pruebas de colado de la silicona, ninguna fue lo suficientemente satisfactoria como para ser elegida para la fabricación del liner definitivo del proyecto. Los problemas actuales de la silicona son los siguientes.</p> <p>Mejora de liner: Pese a que se realizaron tres pruebas de colado de la silicona, ninguna fue lo suficientemente satisfactoria como para ser elegida para la fabricación del liner definitivo del proyecto. Los problemas actuales de la silicona son los siguientes.</p>
<p>Uso de elementos comerciales</p>	<p>Muchos elementos que se utilizan para la fabricación de la prótesis son piezas que no disponen actualmente de mercado comercial debido a ser soluciones rápidas para problemas que pueden resolver elementos comerciales aún no planteados.</p> <p>Algunos de estos elementos usados en el prototipo actual son tornillos de métrica M3 de cabeza hexagonal, tornillos e insertos de métrica M6, clips cilíndricos de tubo, ejes de madera de diferentes diámetros.</p>
<p>Mejora del proceso de fabricación</p>	<p>Los métodos de fabricación utilizados en este proyecto han sido el colado de silicona y la fabricación aditiva FDM mediante impresoras 3D. Los modelos de impresora utilizados durante el proyecto se especifican anteriormente, aquí se analizan los porqués de suponer un método de mejora de la fabricación dadas las características (y limitaciones) de ambas.</p> <p>Para el futuro, los procesos de fabricación pueden ser el prototipado mediante técnicas más potentes como con herramientas de sinterizado láser (SLS). La universidad es poseedora de una de estas máquinas. También se pueden desarrollar piezas de inyección, aunque tendría un costo mucho superior dado que sólo se fabricarían muy pocas unidades.</p>
<p>Evolución del mueble soporte</p>	<p>Como es evidente, no tiene mucho sentido el desarrollo exhaustivo del diseño del mueble soporte de módulos dado que en el proyecto hay un tiempo limitado en el que no se puede dedicar el mismo empeño para las tareas importantes como decisiones de diseño de carácter más irrelevante.</p> <p>Fuera del alcance del proyecto, este mueble ha de ser definido no solo en la forma y material de este, sino de cómo ha de estar colocado y en qué localización dentro de la casa, para ser lo más ergonómico posible en el uso cotidiano.</p>

16. BIBLIOGRAFÍA

Mano Michelangelo y otros elementos de la prótesis (1)

Consultado a 5/9/2019.

[<https://www.ottobock.com/es>]

Uso de perro guía (2)

Consultado el 28/9/2019.

Servicio de perro guía - Fundación ONCE del Perro-Guía.

[<https://perrosguia.once.es/es/que-hacemos/servicio-de-perro-guia>]

Uso de bastón blanco (3)

Purificación Ortiz Ortiz. Discapacidad visual y autonomía personal (2011). Madrid.

[https://sid.usal.es/idocs/F8/FD026230/discap_visual.pdf]

Manual de usuario - Geomagic Design (4)

Consultado a 8/10/2019, Edición de 2013.

[https://www.engineering.pitt.edu/uploadedFiles/_Content/Sub_Sites/Business/MRW/SCPI/_Library/specs/geomagicdesignx2014userguide.pdf]

Araymond - Catálogo de productos industriales (5)

Consultado el 15/10/2019.

[http://fijaciones.araymond-industrial.es/media/1059/emea_industrial_catalog_2016-spanish.pdf]