



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE UNA MANO Y GENERACIÓN DEL PROTOTIPO FÍSICO

AUTOR: JOSÉ ROYO BONO

TUTORA: NURIA ALEIXOS BORRÁS

COTUTOR: FRANCISCO ALBERT GIL

Curso Académico: 2019-20

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por el apoyo incondicional todos estos años.

A mis amigos, por pesados.

A mi tutora Nuria, por estar allí siempre que lo he necesitado.

En especial, a mi novia, sin ella esto no habría sido posible.

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado el diseño de una prótesis mecánica que cierra los dedos aprovechando los movimientos de flexión y extensión de la muñeca, la cual será económicamente accesible para todo tipo de públicos.

Primeramente, se procede a la creación física de un prototipo para poner en práctica algunos movimientos inicialmente meditados. De esta forma, no se desperdician materiales más costosos.

Tras tener una idea genérica de lo que se pretende diseñar, se efectúa una búsqueda de información necesaria sobre cómo es la mano y los movimientos que tiene, se realiza un estudio de mercado de prótesis de manos y se averigua qué es lo que exigen los usuarios dispuestos a comprarlas.

Después, se continúa con los bocetos y diseños posibles para la prótesis y los sistemas de movimiento de cada componente (dedo, palma, antebrazo...). De entre las alternativas disponibles, se escoge la que mejor funcione y más se adapte estéticamente a la idea original.

Una vez conseguido el diseño definitivo, se desarrolla el modelo en 3D con el programa Autodesk Inventor, con el cual se dibuja y se generan los ficheros compatibles que se trasladarán a una impresora 3D para imprimir las piezas necesarias.

Finalmente, se realiza el montaje de todos los componentes para obtener la prótesis final. Se ejecutan las pruebas necesarias para ver que cumple con las funciones básicas y funciona correctamente, como se podía esperar. Es un modelo básico de prótesis pendiente de mejoras, pero muy útil y funcional, traduciéndose en un resultado satisfactorio a pesar del tiempo limitado.

PALABRAS CLAVE: prótesis, mano, impresión 3D, Autodesk Inventor, diseño, prototipo.

RESUM

En el present treball s'ha realitzat el disseny d'una pròtesi mecànica que tanca els dits aprofitant els moviments de flexió i extensió del canell, la qual serà econòmicament accessible per a tot tipus de públics.

Primerament, es procedeix a la creació física d'un prototip per posar en pràctica alguns moviments inicialment meditats. D'aquesta manera, no es malgasten materials més costosos.

Quan ja es té una idea genèrica del que es pretén dissenyar, s'efectua una recerca d'informació necessària en relació a com és la mà i els moviments que té, es realitza un estudi de mercat de pròtesis de mans i es descobreix què és el que exigeixen els usuaris disposats a comprar-les.

Després, es continua amb els esbossos i dissenys possibles per a la pròtesi i els sistemes de moviment de cada component (dit, palma, avantbraç...). De totes les alternatives disponibles, s'escull la que millor funcione i més s'adapte estèticament a la idea original.

Una vegada s'ha aconseguit el disseny definitiu, es desenvolupa el model en 3D amb el programa Autodesk Inventor, amb el qual es dibuixa i es generen els fitxers compatibles que es traslladaran a una impressora 3D per imprimir les peces necessàries.

Finalment, es realitza el muntatge de tots els components per obtenir la pròtesi final. Es fan les proves necessàries per veure que compleix amb les funcions bàsiques i que funciona correctament, com es podia esperar. És un model bàsic de pròtesi pendent de millores, però molt útil i funcional, amb un resultat satisfactori tot i que el temps ha sigut limitat.

PARAULES CLAU: pròtesi, mà, impressió 3D, Autodesk Inventor, disseny, prototip.

ABSTRACT

In this project, it has been made a design of a mechanical prosthesis that closes the fingers taking advantage of the flexion and extension movements of the wrist, which will be economically affordable to every people.

First, it is proceed to a physical creation of a prototype to put into practice some initially meditated movements. Thus, no more expensive materials are wasted.

After having a generic idea of what is going to be designed, it is carried out a research of needed information about how a hand looks like and the movements it has, it is made a market study of hand prostheses and it is found out which are the demands of the users who are willing to buy them.

The next step is to do the sketches and some possible designs for the prosthesis and the movement systems of each component (finger, palm, forearm...). Among the available alternatives, it must be chosen the one that works and fits aesthetically the best to the original idea.

Once the final design is achieved, the 3D model is developed with the Autodesk Inventor program, in which the compatible files are drawn and generated, then they will be transferred to a 3D printer to print the necessary parts.

Finally, all the components are assembled to obtain the final prosthesis. The necessary tests are run to see that it complies with the basic functions and works correctly, as it is expected. It is a basic model of prosthesis pending improvements, but very useful and functional, making a satisfactory result despite the limited time.

KEYWORDS: prosthesis, hand, 3D print, Autodesk Inventor, design, prototype.

Este escrito consta de los siguientes documentos:

DOCUMENTO I: MEMORIA

DOCUMENTO II: PRESUPUESTO

DOCUMENTO III: PLANOS

DOCUMENTO IV: ANEXOS



DOCUMENTO I: MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Objetivo y Justificación	1
2. Alcance	1
3. Diseño y Fabricación	2
3.1. Autodesk Inventor	2
3.2. Programas de preparación 3D.....	2
3.3. Impresión 3D	3
3.3.1. Problemas técnicos de la impresión 3D	4
3.3.2. Materiales	5
4. Estudio Preliminar.....	6
4.1. Brazo.....	6
4.1.1. Movimiento y articulaciones	7
4.1.2. Agarre	9
4.1.3. Huellas dactilares.....	9
4.1.4. Sentido del tacto y su efecto en el agarre	9
4.1.5. Uñas	10
4.1.6. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis.....	10
4.2. Productos de la competencia	10
4.2.1. Tipos de prótesis de mano según la discapacidad	11
4.2.2. Tipos de prótesis según el método de accionamiento.....	13
4.2.3. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis.....	19
4.3. Demandas de usuario	20
4.3.1. Rutina de una persona con solo una mano sana	20
4.3.2. Psicología del usuario.....	21
4.3.3. Uso de prótesis	21
4.3.4. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis.....	21
5. Especificaciones del diseño	22
6. Diseño Del Producto.....	23
6.1. Medidas de la mano.....	23
6.2. Agarre (versión 1)	24
6.3. Sistema de movimiento (versión 1).....	25

6.4.	Dedo (versión 1).....	27
6.5.	Sistema de movimiento (versión 2).....	34
6.6.	Pulgar (versión 1).....	34
6.7.	Sistema de movimiento (versión 3).....	35
6.8.	Palma (versión 1).....	36
6.9.	Pulgar (versión 2).....	38
6.10.	Palma (versión 2).....	40
6.11.	Antebrazo (versión 1).....	42
6.12.	Agarre (versión 2).....	44
7.	<i>Sistema de agarre usuario-prótesis</i>	46
8.	<i>Diseño impreso en 3D</i>	47
9.	<i>Conclusiones</i>	49
10.	<i>Bibliografía</i>	50

ÍNDICE DE LAS ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Laminado y preparado impresión	3
Fuente: https://all3dp.com/es/1/slicer-3d-programa-corte-impresora-3d/	
Ilustración 2. Impresora de extrusión	3
Fuente:	
https://manualsupervivenciamaker.com/manual/workflow_impresion_3d_ejemplo_completo.html	
Ilustración 3. Ejemplos errores gravedad y soluciones	4
Fuente: https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-559827155-impresora-3d-para-cera-perdida-joyeria-o-dental- JM	
Ilustración 4. Resolución en Z y fallo a tracción por anisotropía	5
Fuente: https://3dlink.me/blog/?paged=8	
Ilustración 5. Partes extremidad superior	7
Fuente: https://es.slideshare.net/Pradigun/anatomia-de-la-manohuesosligamentosarticulaciones-y-musculos	
Ilustración 6. Campo de movimiento hombro	7
Fuente: https://movementbenefits.com/aclarate-de-una-vez-movilidad-y-flexibilidad-que-es-que/	
Ilustración 7. Campo de movimiento codo	8
Fuente: https://quizlet.com/287607710/table-34-major-joint-motions-and-planes-of-motion-diagram/	
Ilustración 8. Movimiento antebrazo: supinación y pronación	8
Fuente: http://personaltrainers-es.blogspot.com/2009/07/ejercicios-de-musculacion-pronacion-vs.html	
Ilustración 9. Campo de movimiento muñeca	8
Fuente: http://pausasactivas092016.blogspot.com/2016/08/ejercicios-para-el-tunel-carpiano-la.html	
Ilustración 10. Campo de movimiento mano	9
Fuente: https://amarantoterapiaocupacional.com/2015/07/22/movimientos-de-la-mano/	
Ilustración 11. Prótesis de dedo	11
Fuente: https://www.thelondonprosthetics.com/our-clinic/insights-and-case-studies/naked-prosthetics-body-driven-devices-innovative-t/	
Ilustración 12. Prótesis de mano movimiento muñeca	12
Fuente: http://imprimalia3d.com/tags/pr-tesis	
Ilustración 13. Prototipo de prótesis mano movimiento antebrazo	12
Ilustración 14. Prótesis mano movimiento codo	13
Fuente: https://diegoluisimpresoras3dparaprotesis.blogspot.com/2019_10_24_archive.html	



Ilustración 15. Tipos de manos estéticas	14
Fuente: https://www.amazon.es/ZRB-Artificial-Simulaci%C3%B3n-Encubrimiento-Postoperatorio/dp/B083KF8ZGZ	
Ilustración 16. Mano comercial Bebionic	14
Fuente: https://www.reliance.co.uk/project/miniature-actuation-solutions-for-steepers-bebionic-hand/	
Ilustración 17. Prótesis comercial	16
Fuente: https://www.medicalexpo.es/prod/fillauer/product-74954-466570.html	
Ilustración 18. Modelo 1: e-Nable Phoenix Hand v2.....	17
Fuente: https://www.thingiverse.com/thing:1453190/makes	
Ilustración 19. Modelo 2: Flexihand	17
Fuente: https://www.thingiverse.com/thing:380665	
Ilustración 20. Modelo 3: 3D Systems Teams	18
Fuente: https://www.thingiverse.com/thing:1294517	
Ilustración 21. Modelo 4	18
Fuente: https://www.24horas.cl/tendencias/ciencia-tecnologia/carpintero-inicia-empresa-que-fabrica-protesis-con-impresoras-3d-1541806	
Ilustración 22. Modelo 5: Hand bq3D	19
Fuente: https://www.3dnatives.com/es/universo-articulado-la-impresion-3d-sonia-verdu-17032016/	
Ilustración 23. Medidas mano y parte antebrazo	24
Ilustración 24. Superficie entre objetos ampliada	25
Ilustración 25. Rango movimientos dedo y muñeca	26
Ilustración 26. Recorrido cable tensor	26
Ilustración 27. Canto conductos hilo tensor	27
Ilustración 28. Sistema agarre adaptativo.....	28
Ilustración 29. Estudio articulación dedo	29
Ilustración 30. Esfuerzos conducto cable tensor.....	30
Ilustración 31. Tipos de eje articulación dedo.....	31
Ilustración 32. Evolución articulación dedo	32
Ilustración 33. Falange modelo 3D.....	32
Ilustración 34. Sujeción cables distal concepto y modelo 3D finalizado.....	33



Ilustración 35. Tres ejemplos de ampliación rango movimientos	34
Ilustración 36. Reajustes sistema de movimiento.....	35
Ilustración 37. Articulación muñeca extensión y flexión.....	36
Ilustración 38. Bocetos prótesis videojuegos	37
Fuente: https://metalgear.fandom.com/wiki/Venom_Snake%27s_bionic_arm	
Ilustración 39. Modelo 3D palma y unión dedos palma.....	37
Ilustración 40. Protecciones para evitar el desgaste.....	38
Ilustración 41. Tipos de giro pulgar	38
Ilustración 42. Despiece sistema de giro pulgar.....	39
Ilustración 43. Vistas y corte sistema de giro pulgar.....	40
Ilustración 44. Soporte cables modelado y real	41
Ilustración 45. Sistema de bloqueo dedos	41
Ilustración 46. Palma modelada completa.....	42
Ilustración 47. Agujeros guía antebrazo.....	43
Ilustración 48. Sistemas de enganche cable tensor antebrazo	43
Ilustración 49. Antebrazo modelado completo.....	44
Ilustración 50. Ensayos de materiales de fricción	45
Ilustración 51. Zonas con necesidad de agarre	46
Ilustración 52. Opciones enganche prótesis	46
Ilustración 53. Prótesis mano montada: vista 1	47
Ilustración 54. Prótesis mano montada: vista 2	48
Ilustración 55. Prótesis mano montada: vista 3.....	48



1. Objetivo y Justificación

En la actualidad encontramos prótesis de mano de película que pueden ser controladas mentalmente por el propio usuario. Esto se consigue leyendo mediante sensores la actividad eléctrica de músculos sanos y traduciéndola en la activación de servomotores para producir los movimientos. Sin embargo, las más competentes tienen precios altos y un costoso mantenimiento que hace que no estén al alcance de todos, sobretodo para gente con pocos recursos o jóvenes que al crecer se le quedan pequeñas. También tenemos las puramente estéticas que además de no producir movimiento alguno, suelen ser caras si se quiere un acabado realista.

La alternativa, las mecánicas, que aprovechan el movimiento de algún miembro sano como muñeca o codo para producir el cierre de los dedos. El problema de estos se encuentra en lo reducido que es el repertorio de movimientos, reducido casi a abrir o cerrar el conjunto de dedos a la vez, limitando mucho su uso.

De aquí surge la idea crear una prótesis mecánica con impresora 3D, con las ventajas de esta, como reducido coste, fácil mantenimiento o resistente al agua, sin embargo, estudiar nuevas formas de ampliar el rango de movimientos, intentando imitar a las mejores manos mioeléctricas. También subir los archivos a la red junto con hojas de cálculo, para que cualquier persona pueda modificar o ajustar parámetros para ajustarlo al usuario y una vez tenga el fichero con los diseños 3D puedan acudir a algún sitio de impresión 3D, actualmente presentes en la mayoría de las ciudades o dentro de las mismas universidades como la Universidad Politécnica de Valencia.

En resumen, el diseño de una prótesis de una mano mecánica que pueda estar al alcance de todos, tanto en precio como en sistema de producción, libre en internet para que pueda ser reajustada por el usuario y que, además, supere el problema de limitado movimiento.

2. Alcance

Debido a la COVID 19 los laboratorios e instalaciones de la Universidad Politécnica de Valencia han sido cerrados a los alumnos, por lo que se ha tenido que acudir a un sistema de impresión 3D externo. Esto ha reducido el número de impresiones para hacer pruebas a solo las justamente necesarias, así pues, las impresiones hechas son piezas definitivas a las que les faltarán ensayos fiables de laboratorio. En casa se han hecho pruebas de sí o no, o de este es mejor que este. Debido a estos problemas y a la complejidad se ha decidido dividir el trabajo; una parte de estudio en profundidad y búsqueda de soluciones, además de creación de un prototipo físico para el TFG y todo lo que no se pueda tratar como ensayos (ya que no están disponibles los laboratorios), mejoras y solución de errores del primer prototipo, creación de prótesis definitiva y subida de archivos libres y modificables en red, dejarlo para acabarlo en el TFM.

Con todo esto, el TFG consistirá en hacer un estudio para recopilar información que ayude a la comprensión y el desarrollo de la prótesis mecánica de la mano, de tal manera que sea útil para poder enumerar los problemas a solucionar y las especificaciones del producto. Se clasificarán los problemas de forma escalonada en básicos, que deberán solucionarse obligatoriamente, y en extras, que aportan un valor añadido al diseño. Aunque se buscarán soluciones prácticas de cada una de ellas, debido a



limitaciones de tiempo y pruebas de impresión, la generación del diseño 3D de una mano izquierda y una derecha tendrá como función principal solucionar los problemas básicos y según el tiempo se irán añadiendo las soluciones extras. Los diseños en 3D serán modelados gracias a la herramienta *Autodesk Inventor*. Para culminar se fabricará la mano mecánica con estos diseños mediante una impresora 3D y otros materiales de fácil acceso.

3. Diseño y Fabricación

Como se ha comentado anteriormente, se pretende hacer un producto asequible y accesible para todo tipo de personas, por ello se seguirá un modelo de fabricación con materiales y herramientas que estén disponibles a todos y de la manera más económica.

3.1. Autodesk Inventor

Se utilizará esta herramienta de diseño por familiaridad y disposición, ya que fue utilizada en la asignatura de Ingeniería Gráfica, donde se explicó básicamente todo lo necesario para el desarrollo de este nuevo diseño, a excepción de vincularlo con el programa *Excell*. Con este nuevo método se guardan todos los parámetros de las piezas en una hoja de cálculo haciendo que sea más asequible el uso de valores para otras piezas que dependan entre sí y que al cambiarlos se ajusten automáticamente para todos. Esto permitirá que con solo una serie de mediciones en la mano sana conseguir fácilmente prótesis ajustables para cada usuario.

En programa de diseño 3D se basa en un espacio tridimensional donde gracias a la unión y resta de figuras simples en 3D, creadas a partir de bocetos 2D mediante extrusiones o revoluciones, se logran crear piezas complejas. Además de otras opciones de construcción simple, con un buen diseño visual haciéndolo una herramienta intuitiva y simple. Asimismo, contiene una librería con piezas normalizadas (tornillos, tuercas, arandelas...) para ahorrar tiempo en el diseño de piezas ya existentes.

Una vez diseñadas las piezas (.ipt) el programa ofrece ensamblaje (.iam) de las piezas y simulación de movimiento, mediante restricciones entre objetos, para ver como quedaría la unión de las piezas y así corregir o comprobar el resultado final; un sistema de despiece para presentaciones (.ipn) de montaje del objeto acabado; realización de los planos (.dgn) a partir de la figura tridimensional y, por último, aunque no se tocará, también es una herramienta potente de cálculo con el hacer simulaciones de esfuerzos y movimiento.

3.2. Programas de preparación 3D

Antes de crear el diseño físico necesitamos prepararlo para la impresión. Primero se ha de pasar a un formato de fichero que pueda leer el programa, normalmente se utiliza el STL que retiene únicamente la información que define la geometría del objeto diseñado. Este se encarga de laminar la pieza según la altura de pasada de cada impresión y simular el recorrido del extrusor mostrando la figura en filamento. Según las características requeridas como resistencia mecánica o acabado superficial, se configuran las variables de impresión explicadas bajo: altura de capa, tamaño de boquilla de impresión, carcasa, relleno, tipo de material, temperatura de extrusión, velocidades de pasada, velocidades de salida de material del extrusor, etc.

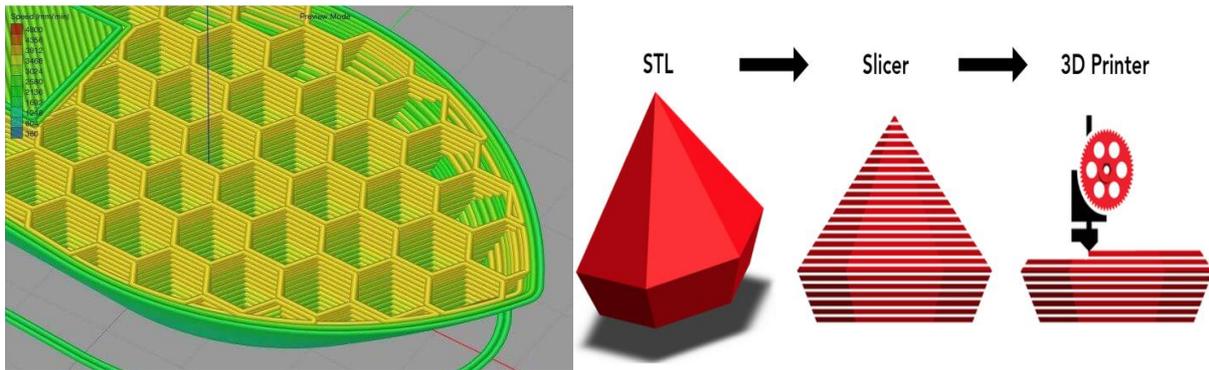


Ilustración 1. Laminado y preparado impresión

3.3. Impresión 3D

Es necesario conocer bien el sistema de fabricación para tenerlo en cuenta a la hora de diseñar piezas, de lo contrario se podrían hacer piezas imposibles o con grandes errores al llevarlos a imprimir. Hay muchos tipos de máquinas de impresión 3D, aunque únicamente se comentará el modelo usado para la producción del prototipo, ya que es la que interesa.

El tipo de impresión por extrusión es una de las tecnologías 3D más extendidas entre el público en general, debido a los precios asequibles, relativa facilidad de montaje y el uso sencillo. Se basa en un proceso conocido como FFF (Fabricación por Filamento Fundido), como el nombre indica se trata de unas bobinas de filamentos termoplásticos que impulsados por un motor se van fundiendo, a temperaturas regulables según el tipo de material, para pasar en estado semilíquido por una boquilla; esta va depositándose por capas hasta conseguir el objeto deseado. Al depositarse encima de la capa anterior y entrar en contacto con el ambiente el material se enfría volviéndose a solidificar y soldándose con la capa anterior. El posicionamiento del extrusor se controla con los motores de paso que controlan el eje X y la capa de altura, el Z. La posición Y se controla con el desplazamiento de la cama junto con el objeto a diseñar. En rango de desplazamiento de estos ejes es el que limitará el volumen de las piezas a imprimir.

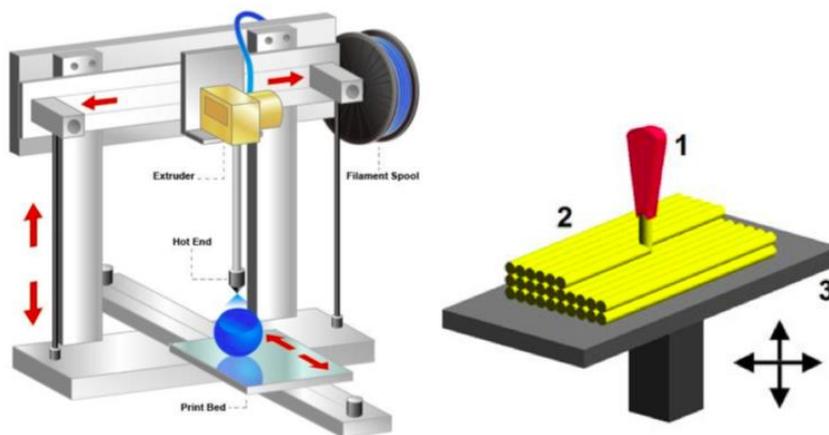


Ilustración 2. Impresora de extrusión

3.3.1. Problemas técnicos de la impresión 3D

El principal problema de este tipo de impresoras es que funcionan con **gravedad**, el material al salir de la boquilla cae sobre la capa anterior o sobre la plataforma de la impresora. Teniendo en cuenta esto voladizos que superen los 45° al no tener donde apoyar caerán. Lo mismo pasa con los puentes largos.

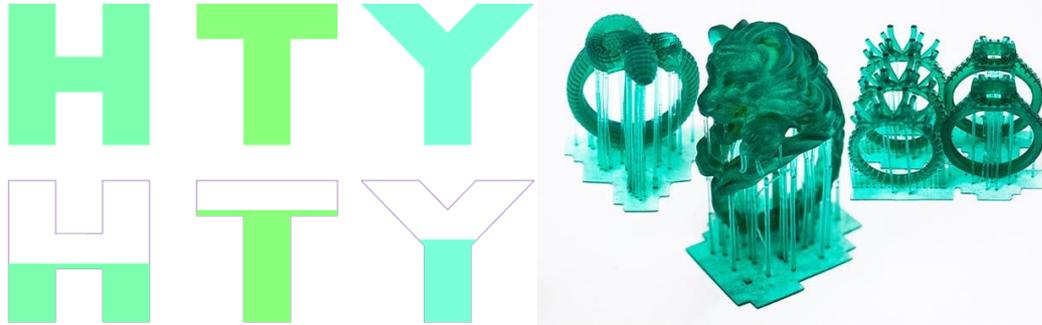


Ilustración 3. Ejemplos errores gravedad y soluciones

Este problema se puede solucionar mediante material de **soporte**, que se trata de estructuras constructivas sacrificables hechas con el mismo material de impresión en el que la única función es hacer de base donde apoyar. El problema de estos es que dejan rugosidades al retirarlas que estropean el acabado superficial, más tarde se comentarán soluciones.

El acabado superficial o **resolución**, hay que tener en cuenta tanto la resolución en Z como en XY. La primera determina el espesor de cada capa, se regula mediante la distancia entre la boquilla y la capa anterior. Con alturas bajas se consigue un acabado casi liso, pero aumenta el tiempo de impresión. La resolución en XY depende principalmente del tamaño de la boquilla. Existen tratamientos para mejorar acabados superficiales como utilizar disolventes químicos que deshacen de manera superficial el material y dejan un aspecto pulido, materiales plásticos fluidos para pintar, pulir las piezas con materiales abrasivos pinturas o mezcla de algunas. También es importante para partes móviles en contacto darles el juego pertinente, evitando rozamientos o que puedan estropear materiales al roce.

El problema de la resolución en Z no es puramente estético o funcional, presenta **anisotropía**, las propiedades no serán las mismas según la dirección de los esfuerzos. Como se puede observar en la imagen de arriba, la separación entre capas crea concentradores de tensiones por donde puede fallar la pieza. Por eso se ha de estudiar bien los esfuerzos a los que estará sometida y tenerlo presente a la hora de imprimir la pieza.



Ilustración 4. Resolución en Z y fallo a tracción por anisotropía

Al tratarse de un proceso donde interviene cambios de estados y temperaturas pueden producirse **contracciones** en la pieza que deformen las capas inferiores y deforme la nueva base para apoyar el material nuevo extruido. Con piezas con grandes o con muchas horas de impresión puede ser un gran problema. Normalmente se soluciona controlando la temperatura de la base, redondeando esquinas en contacto con la base de impresión o imprimiendo con impresoras cerradas para asegurar temperaturas más estables dentro del proceso de fabricación.

Por último, la densidad de la pieza, que determinara la resistencia de la pieza y sus características mecánicas. Se controla con las **cáscaras**, que es el nombre que recibe la parte externa de la pieza, pudiendo elegir el número de capas que son aproximadamente del grosor de la boquilla de extrusión. Después se encuentra el **relleno (infill)**, se controla la densidad y la forma. Cuanto más denso más resistente, pero se gasta más material, más tiempo... por lo que se eleva el precio. Hay que llegar a un compromiso entre resistencia y precio. Además, el patrón de relleno puede ayudar a conseguir unas características determinadas, los más típicos:

- **Rectangular:** relleno más típico, ofrece resistencia en todas las direcciones y de rápida impresión.
- **Triangular:** ofrece una buena resistencia en las paredes, aunque requiere un poco más de tiempo, se utiliza para piezas esbeltas.
- **Ondulada:** utilizado principalmente para imprimir materiales flexibles. Esta forma da más libertad a la pieza para producir movimiento, doblarla, comprimirla, etc.
- **Hexagonal (panal de abeja):** una de las estructuras naturales que dota de gran resistencia a la pieza con baja densidad.

3.3.2. Materiales

En la actualidad, el mercado de los materiales de impresión 3D está discutido entre el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (**ABS**) y el Ácido Poliláctico (**PLA**), representando el 95% de los utilizados. Aunque a nivel de precio son prácticamente iguales, presentan unas cuantas diferencias.

El ABS es un termoplástico que procede del petróleo, lo bueno es que se recicla reutilizando material sobrante en la impresión o piezas fallidas y con esto volver a hacer filamento bobinado. Por otra parte,



el PLA tiene fama de natural por ser orgánico, se extrae del almidón de maíz o de la caña de azúcar. Aunque es biodegradable, aun no hay sistemas de reciclado eficaces, además, si se quisiera sustituir la producción de ABS, se necesitarían campos de cultivo inviables para satisfacer la demanda.

El PLA tiene un uso más para modelos caseros y el ABS a campos más industriales. El principal motivo es la facilidad de uso en impresión del primero, al trabajar con temperaturas de fusión más bajas hacen que sea más fácil de manejar condiciones externas menos controladas. Otro motivo es a nivel estético, el PLA tiene una gama de colores mucho más amplia. A nivel nocivo, se tiene en cuenta que en la impresión de ABS se emiten gases tóxicos por lo que es necesario buenos sistemas de ventilación. Por otro lado, el motivo de que el ABS se encuentre en sectores más industriales es por unas mejores características mecánicas: buena resistencia, flexibilidad para absorber golpes, resistencia ante más altas temperaturas... en general, son ligeramente más duraderos. Otro factor importante es el post-procesamiento, el PLA al fundirse a bajas temperaturas hace que se casi imposible taladrar o mecanizar la pieza, ya que el calor desprendido por la fricción puede dejar malos acabados.

Dentro de los materiales a comentar, se encuentra uno que ofrece propiedades curiosas a la pieza, los **materiales flexibles**. A nivel de propiedades de impresión es muy similar al PLA. Estos materiales permiten la creación de piezas muy resistentes y con un alto coeficiente de rozamiento, haciéndolas ideales para sistemas adaptativos donde se necesite un buen agarre. Sin embargo, tienen poca resistencia a los químicos y a las altas temperaturas, además que con el tiempo y el uso van perdiendo sus propiedades elásticas. También comentar que suelen ser compatibles para la mayor parte de impresoras y que al ser impreso no desprende gases nocivos.

Estos son los más comunes y los disponibles en la mayor parte de sitios de impresión, no obstante, también cabe comentar: tereftalato de polietileno (**PET**) por su uso en el sector alimenticio, **Nylon** que gracias a su buen acabado y a un bajo coeficiente de rozamiento es ideal para sistemas engranados o ejes y, por último, destacar la **Fibra de Carbono** como un material ultrarresistente y ultraligero.

4. Estudio Preliminar

Antes de empezar a diseñar se ha de conocer bien el objeto a imitar, en este caso la mano junto con un estudio del brazo en general; analizar los productos de la competencia para descubrir puntos fuertes y débiles que sirvan para agilizar el diseño y, por último, estudiar al usuario, quien tiene el problema y al que se debe satisfacer.

4.1. Brazo

El ser humano, al contrario que otros animales que usan las extremidades solo de desplazamiento, ha evolucionado hasta ser bípedo de tal forma que las extremidades superiores se han ido desarrollando más en el ámbito de la interacción con el exterior y con el ser mismo, no solo físicamente, sino, de forma sensorial, sensibilizándose el sentido del tacto, del dolor o de la temperatura. Funciones como coger y manejar objetos, defenderse, nadar, leer (ciegos) o hasta formar parte indispensable para la comunicación. La principal diferencia con otros animales se encuentra en la mano, la libertad de

movimiento de cada dedo para adaptarlo a cualquier agarre, la precisión de cada dedo y lo más importante, un dedo que puede oponerse a los otros cuatro, el pulgar, la clave de esta evolución.

4.1.1. Movimiento y articulaciones

El cierre de los dedos en las prótesis mecánicas se consigue al aprovechar los movimientos que quedan en las partes sanas del brazo en el cual se pondrá esta, por lo tanto, es muy importante estudiar y entender los movimientos para aprovecharlos y descubrir nuevas posibilidades. Primero se ha de nombrar cada parte del cuerpo para poder hacer referencias, se hará con la imagen a continuación:

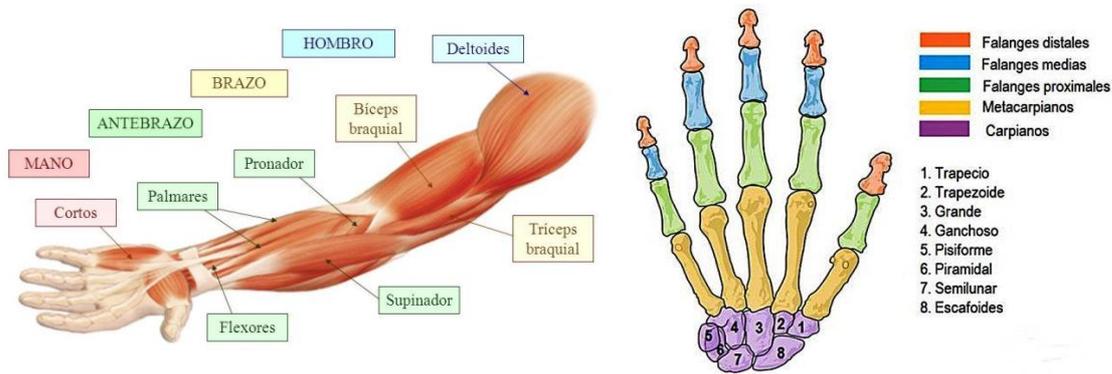


Ilustración 5. Partes extremidad superior

Para la forma de entender el campo de movimiento de las articulaciones de forma sencilla es de forma visual, se mostrará las imágenes que luego se comentarán.

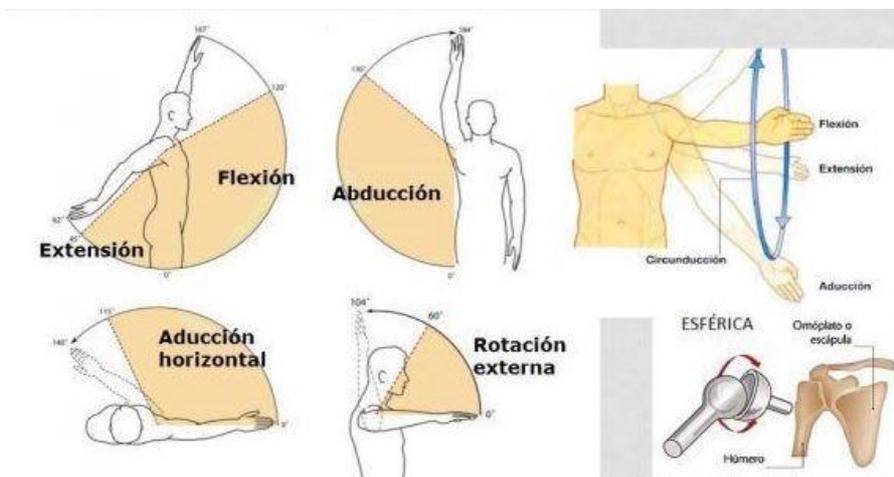


Ilustración 6. Campo de movimiento hombro

El hombro es la articulación con más rango de movimiento, estando al inicio de la extremidad permite a las demás partes desplazarse por un amplio abanico de posiciones.

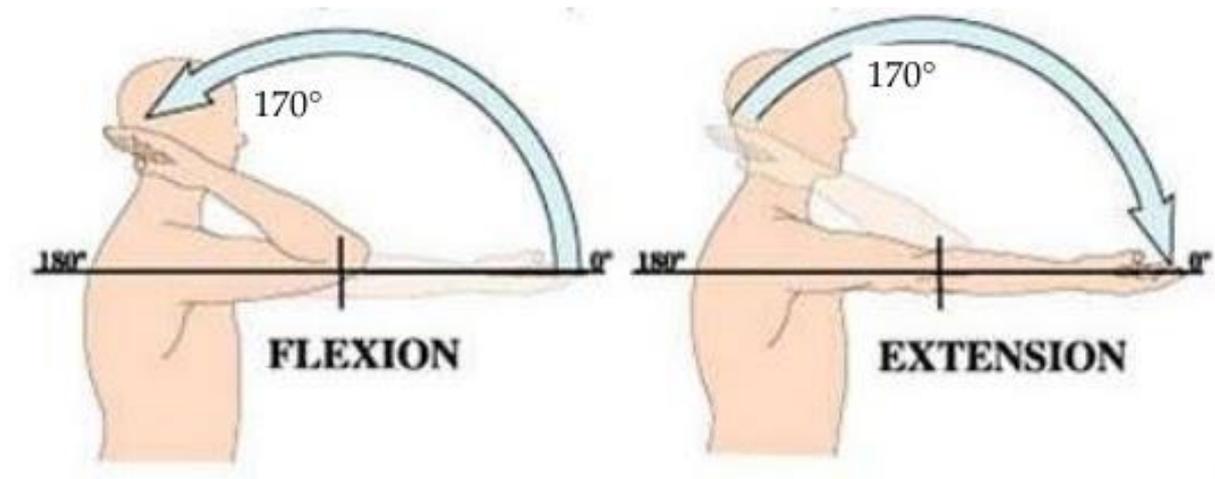


Ilustración 7. Campo de movimiento codo

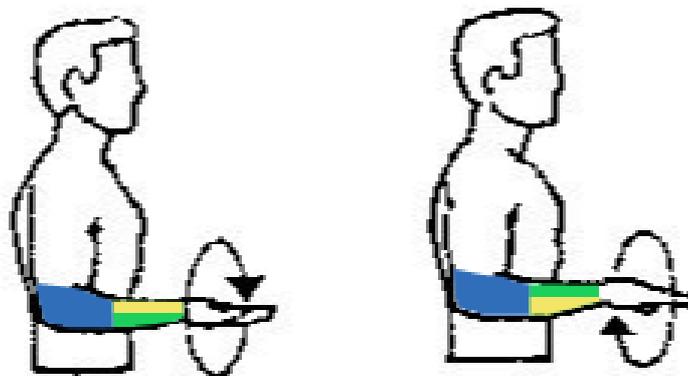


Ilustración 8. Movimiento antebrazo: supinación y pronación

En el movimiento de supinación, palma hacia arriba, y en el movimiento de pronación, palma hacia abajo, pasa una cosa curiosa. Durante el giro la zona del antebrazo marcada de azul no presenta ningún cambio de posición, sin embargo, la otra zona se muestra como intercambian papeles la parte amarilla y la verde.

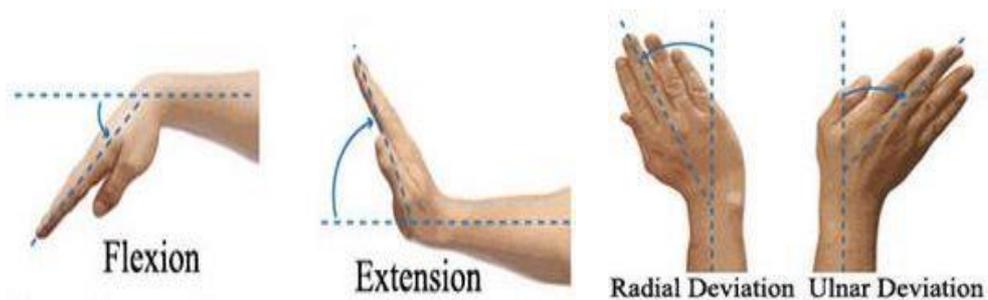


Ilustración 9. Campo de movimiento muñeca

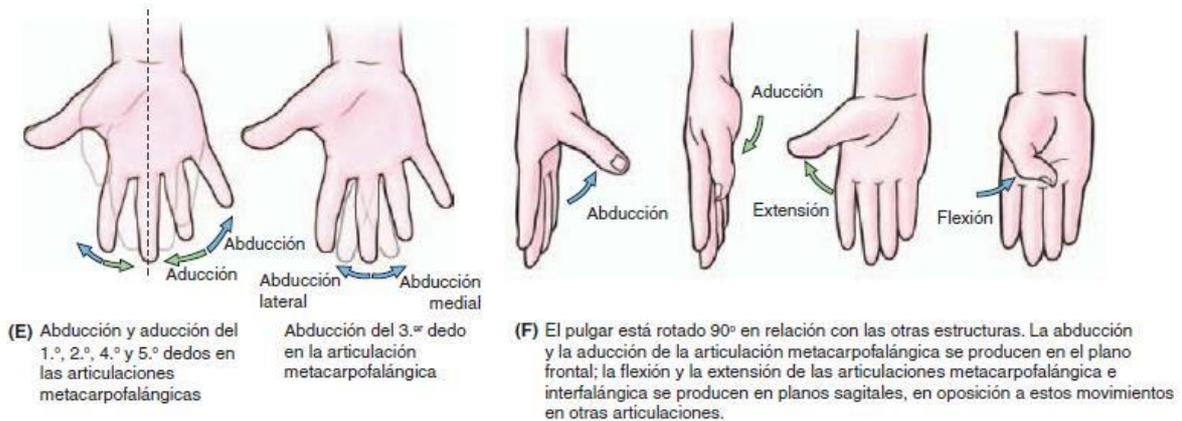


Ilustración 10. Campo de movimiento mano

Las uniones articuladas entre distales con mediales y de mediales con proximales son del mismo tipo que la del codo, estilo bisagra. Como se observa, el pulgar es el dedo con más libertad de movimiento, esto se debe a la unión de los metacarpianos con los carpianos, sin embargo, en esta zona en el resto de los dedos se encuentra prácticamente soldada.

Por lo tanto, la mano es una herramienta muy precisa que goza de innumerables posibilidades de movimiento, además tiene un rango de actuación muy amplio gracias al conjunto de articulaciones del brazo.

4.1.2. Agarre

Las bases de una buena sujeción se basan en: la cantidad de presión y direcciones de esta, cosa que se consigue fácilmente por la libertad de movimiento de la mano, gracias al hecho de tener dedos en direcciones opuestas y musculatura suficientemente fuerte; en la cantidad de superficie con el objeto a sujetar, esto se consigue gracias a la carne blanda que envuelve los huesos de los dedos y al número de articulaciones independientes, que permiten que se adapte y cubra más superficie del objeto; para acabar, depende de los coeficientes de rozamiento entre la piel y el objeto, más los posibles elementos que se encuentren entre ambos, como sudor, polvo, etc.

4.1.3. Huellas dactilares

Al principio se creía que servían para aumentar el agarre, pero tras ensayos de fricción se demostró que estas pequeñas rugosidades disminuyen la superficie en contacto por lo que con la piel lisa se consiguen mejores resultados. Entonces se teoriza, ya que es dificultoso de probar, que la función de estas es como los surcos en los neumáticos, ayudar a mejorar el agarre cuando la superficie en contacto está bañada, también pasa cuando se arrugan las palmas en contacto con el agua. Otra función interesante es que se encargan de amplificar el rango de frecuencias espaciales de los detalles de la superficie, por lo que aumenta notablemente la sensibilidad del tacto.

4.1.4. Sentido del tacto y su efecto en el agarre

El cerebro del cuerpo humano funciona como un controlador PID, gracias a los sentidos recibe información constantemente en tiempo real que procesa y ayuda para reaccionar ante nuevos cambios. En el ámbito del agarre se puede entender bien con dos ejemplos. El primero, al agarrar un



objeto frágil, gracias a esta información sensorial se puede regular la fuerza, haciendo la necesaria para no romper el objeto y además sostenerlo. El segundo, detectar la sensación de que se resbala el objeto y corregirlo haciendo más fuerza o moviendo los dedos para modificar la dirección de la fuerza. Sin el sentido del tacto el control de agarre se volverá más difícil teniendo que ser controlada de manera visual.

4.1.5. Uñas

En el mundo animal las uñas, más bien garras, son usadas principalmente para la defensa, para matar o agarrar a las presas, para la sujeción en superficies blandas, para escalar, para cavar...por todo esto se trata de una parte del cuerpo en constante contacto con rozamientos por eso es fundamental que esté en constante crecimiento.

En el mundo humano, por la falta de peligros y uso de herramientas, ha quedado en un segundo plano como usarla para rascar ante picores, tocar algunos instrumentos o puramente decorativas, como el uso de esmaltes de uñas. Sin embargo, aun se pueden encontrar funciones útiles, como usarlos como concentrador de tensiones para separar objetos unidos, por ejemplo, separar una etiqueta de un tarro o unos bloques de lego, o de palanca al coger objetos con poca superficie libre, por ejemplo, al recoger una carta apoyada en una superficie lisa.

4.1.6. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis

Ante la inviabilidad de imitar todos los movimientos posibles en una mano real, la solución más práctica sería **limitarlos**, es decir, reproducir los justamente necesarios. Para ello se centraría en las funciones principales de la mano. Un tema importante sería buscar nuevas formas de **aprovechar movimientos de la parte sana** (flexión, extensión, pronación, desviación radial...) para traducirlos en movimientos de la prótesis.

Una limitación muy importante que afecta al agarre y que no se podrá reproducir en una mano puramente mecánica, será la falta de sentidos. Sin embargo, tiene su parte positiva, el usuario no sufrirá ningún daño ante golpes, maltrato o rotura producidos en la prótesis, lo único necesario será volver a imprimir las partes afectadas (regeneración).

Uso en la parte interna mano y dedos, de materiales de alta fricción y blandos para que se puedan adaptar mejor al contorno del objeto a coger. Con esto se consigue un **mejor agarre**, imitando a las propiedades de la piel. También añadir rugosidades emulando las huellas dactilares, para lograr un mejor agarre en superficies mojadas.

Por último, no descartar el diseño de uñas en las prótesis. Aunque sería una parte sometida a mucho esfuerzo y no tendríamos la regeneración natural de esta, no obstante, se podría estudiar hacerlas independientes siendo fácilmente sustituibles.

4.2. Productos de la competencia

En el mercado se encuentra la información necesaria para el desarrollo de productos y no hacer un estudio o hacerlo indebidamente puede crear el fracaso del nuevo producto. Para ello se deberá analizar las debilidades y fortalezas de cada uno y entre ellos hacerlo de manera comparativa. Esto no solamente servirá para descubrir nichos de mercado que te diferencie de la competencia, también

ahorrarte muchos de los problemas por los que los primeros diseñadores pasaron hasta llegar al producto final. Para ello nos centraremos en las prótesis estrictamente mecánicas, sin embargo, también se comentarán otros tipos para sacar mejores conclusiones.

4.2.1. Tipos de prótesis de mano según la discapacidad

La mejor forma de mostrarlo es visualmente. Se mostrarán dos imágenes, el brazo normal marcando la parte del cuerpo que falta y los tipos de mano mecánicas que cubren la discapacidad. Al no haber componentes eléctricos, todos ellos necesitan aprovechar un movimiento de la parte sana para su funcionamiento.



Ilustración 11. Prótesis de dedo

En el caso de los dedos se encuentran dos tipos dependiendo del número de articulaciones restantes en él, que son las que utilizan para obtener el giro del dedo mecánico. Si solo conserva la articulación del proximal con el metacarpo está el modelo que necesita apoyo en la zona de la muñeca. Si además conserva la del medial con el proximal, solo con apoyo en el dedo consigue producir el movimiento.

Este tipo de prótesis, debido a la sencillez del movimiento de los dedos (estilo bisagra), logra un diseño lo más aproximado con la realidad. Cosa que no se obtendrá en los siguientes casos, a más partes faltantes en el brazo más movimientos a reproducir y menos cantidad de movimientos sanos para poder aprovechar.



Ilustración 12. Prótesis de mano movimiento muñeca

Este modelo será el usado en este TFG, ya que nos permitirá el diseño de una mano completa y probar su funcionamiento. Se basa en el movimiento de flexión y extensión de la muñeca para producir el cierre de la mano. Al conservar la articulación del hombro, codo y movimientos del antebrazo consigue tener un gran rango de actuación, haciéndola una mano fácil de usar.

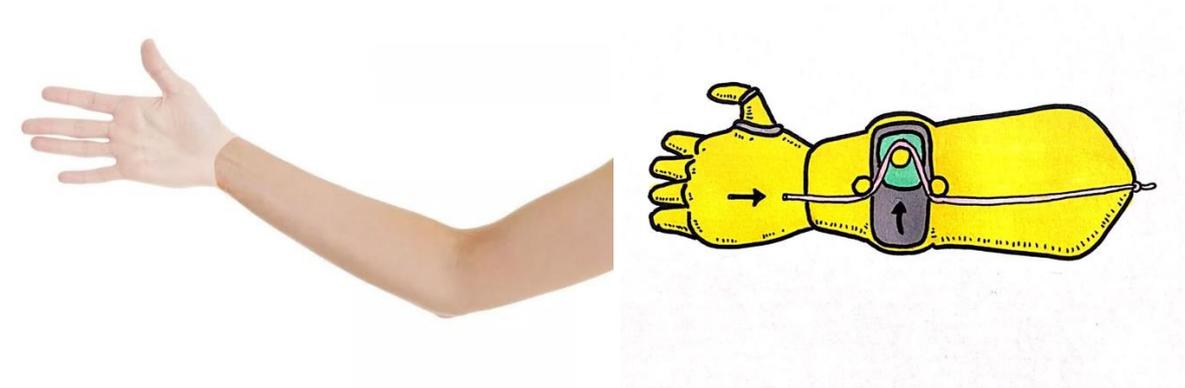


Ilustración 13. Prototipo de prótesis mano movimiento antebrazo

No se encuentra ninguna prótesis en el mercado que aproveche el movimiento de pronación y supinación comentado en el estudio de la mano. La idea inicial del TFG era buscar alguna forma de valerse de esto para para producir el cierre de la mano en los casos que la muñeca no estuviera presente o tuviera muy poca parte de mano para producir momento. Esto implicaría una mejora para los casos en que fuera necesaria la utilización del codo para el cierre, ya que es una prótesis muy limitante como se comentará a continuación. Debido a la dificultad de la creación de solo la mano, el estudio de esto será material para el TFM.



Ilustración 14. Prótesis mano movimiento codo

Este tipo aprovecha el movimiento de flexión y extensión del codo para cerrar los dedos. A diferencia del modelo que aprovecha la muñeca, este solo dispone del movimiento del hombro y limitado el del codo, ya que parte del movimiento se gasta para coger el objeto y al tener que mantenerlo en esa posición para sostenerlo invalida el uso de esta articulación para ampliar el rango de movimiento. Si le sumas que han desaparecido los movimientos del antebrazo y de la muñeca se obtiene una mano fija de uso complejo y muy limitado.

4.2.2. Tipos de prótesis según el método de accionamiento

4.2.2.1. Neumática

Las prótesis neumáticas aprovechan un fluido a presión producido por un compresor para crear el movimiento de la prótesis. Aunque consiguen reproducir mucha fuerza y un buen control, se trata de sistemas aparatosos y complejos. Una persona tendría dificultades para poder soportarlas, Por esto suelen verse más en centros de salud enfocados a aparatos para la rehabilitación de pacientes.

4.2.2.2. No accionamiento

Aquí se encuentran las puramente estéticas. Aunque no tienen ninguna capacidad de movimiento, el hecho de llevarla puede mejorar el estado anímico del paciente, sentirse uno más. Hay una gran variedad de precios que van encareciéndose según el nivel de realismo que suelen usar como modelo el otro brazo sano: tono de piel, arrugas, uñas independientes... con acabados realistas encontramos los precios: mano 6.000\$, mano y antebrazo 9.750\$ y brazo completo 11.000\$.



Ilustración 15. Tipos de manos estéticas

4.2.2.3. Mioeléctricas

Se trata del modelo más complejo y con más posibilidades. Permite al usuario controlar la prótesis con solo el pensamiento. Básicamente se trata de un sistema de sensores que leen los pulsos eléctricos de contracción y relajación de los músculos sanos y los traducen en movimientos en la mano. Necesitan una fuente de energía que suele ser con baterías eléctricas para accionar los servomotores que mediante el modelo de tendones o sistemas de engranajes producen el cierre o apertura de los dedos. Se han hecho estudios que han conseguido no solo leer el cuerpo, sino, darle información, replicar el sentido del tacto. Aunque suena muy bien es una tecnología en desarrollo con un largo camino por delante, así pues, se comentará uno de los mejores modelos comerciales para conocer el alcance actual.



Ilustración 16. Mano comercial Bebionic



Es una mano estilo robótico con unos acabados muy estéticos. La ligereza, 539g de peso, y el agarre al cuerpo la hacen muy cómoda de llevar (opinión de usuarios). Para la elección de mano dispone de tallas S, M y L por lo que no se trata de un modelo personalizado a nivel de dimensiones, aunque es una manera de poder hacer cadenas de producción para reducir costes y hacerlo más asequible. Para el agarre tiene en las puntas de los dedos material blando de alto rozamiento para conseguir aumentar la superficie de contacto. A nivel de movimiento: tiene el movimiento del antebrazo de pronación y supinación, no posee la articulación de la muñeca y los dedos tiene un sistema de agarre adaptativo, que permite que, aunque un dedo ya esté en contacto con el objeto a coger, los otros siguen avanzando hasta tocarlo, consiguiendo así más superficie de contacto. Sin embargo, no dispone de control independiente, la forma de obtener diferentes movimientos es activando el tipo de movimiento a hacer antes de hacerlo, por ejemplo, modo pinza, modo agarre con todos los dedos, modo aerosol... También comentar que el dedo pulgar tiene dos posiciones diferenciadas que se controlan manualmente cambiándolo con la otra mano. Este modelo tiene un precio de mercado entre 25.000\$ y 35.000\$, dependiendo de los extras, por lo que no está al alcance de todos además de un costoso mantenimiento. Algunas veces se producen fallos en la lectura de los sensores por culpa de sudor o suciedad, aunque esto se puede mejorar con osteointegración.

Existen algunos modelos más económicos aprovechando la impresión 3D, sin embargo, para ello necesitan sacrificar el acabado estético, peor calidad de los materiales y un control sobre la mano menos precisa.

4.2.2.4. Mecánica

Las prótesis mecánicas son aquellas que aprovechan el movimiento de alguna parte del cuerpo sano para producir el cierre o apertura de la nueva mano. Normalmente se basan en sistemas de cuerdas (tendones) o arrastre para transmitirlo. Por lo general están bastante limitadas, de mala estética y solo producen agarres de objetos simples y poco pesados. Sin embargo, el mundo de las impresoras 3D e internet abrieron un mundo de posibilidades consiguiendo que sea accesible para todo el mundo, personalizable, creación diseños de todo tipo, de fácil mantenimiento o reparación, etc. Sabiendo esto es curioso que no se encuentren modelos comerciales, más que el estilo garfio. Esto se debe a que muchos de los proyectos que gastan 3D están más enfocados a llegar a todo el mundo teniendo un fin benéfico, muchos suben los archivos a webs de impresión 3D libres (donde se ha encontrado la mayoría de los modelos a exponer). Otro motivo es la complicación y coste de conseguir los certificados de la FDA, que se encarga de comprobar si los productos son aptos para el ser humano, confirmar la seguridad y efectividad del diseño.

La prótesis comercial mecánica se basa en la antigua forma prótesis de garfio a la vez que hace la función de pinza. También tiene la zona interior de la pinza con materiales blandos y de alto coeficiente de rozamiento para conseguir un mejor agarre, algo parecido a la silicona. Aguantan bastante bien todo tipo de golpes, son muy resistentes, por que podrían ser útiles para trabajos duros donde estén muy castigadas. El principal problema de este, además del limitado rango de movimiento, es que son bastante aparatosas, no son nada estéticas y llamativas para mal.



Ilustración 17. Prótesis comercial

Ha continuación se comentarán las de impresión 3D. Al no ser productos comerciales es difícil obtener datos sobre ellas, por eso se basará en la observación y análisis de manera visual. La mayoría de los diseños se han encontrado en una página libre de ficheros de impresión 3D (*thinkiverse*) donde los usuarios los comparten y permiten que sigan mejorando el producto. Primero se tratará las observaciones generales y luego después de cada foto del modelo se tendrá en cuenta los detalles que los diferencian del resto.

Se basan en un sistema de tendones, aprovechan la diferencia de posicionamiento en la flexión y extensión de la muñeca para tensar un sistema de cables en uno de los movimientos de la muñeca y así cerrar los dedos y recuperan la posición inicial en el otro movimiento gracias a algún sistema en desequilibrio elástico. La mayoría tensan en flexión y relajan en extensión, pasando los cables por el dorso de la mano, sin embargo, se encuentran algunos casos con el proceso invertido. El circuito de cables suele distribuirse por conductos dentro de la misma prótesis y se sujetan en el antebrazo con un sistema de tornillos que puede ajustar mejor la distancia.

Para fijar la prótesis al cuerpo humano se suele añadir materiales blandos y que no rocen con la piel para que sea cómodo el contacto entre ambas partes, esto combinado con velcros consigue un buen modo de agarre al cuerpo.

A nivel de movimiento, el dedo pulgar se encuentra fijo en la articulación del proximal con el metacarpo (la que da más rango de acción sobre las posibilidades de agarre) y al no tener diferenciación (todos los dedos se cierran y abren a la vez) solo permiten realizar el agarre simple con poca precisión y de objetos no pequeños y no muy pesados.

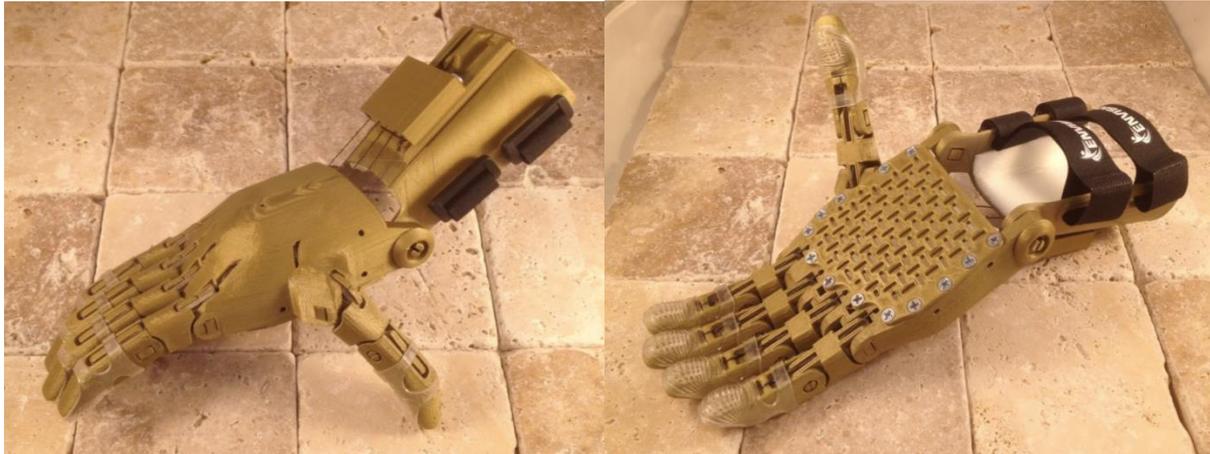


Ilustración 18. Modelo 1: e-Nable Phoenix Hand v2

Los materiales típicos de impresión como PLA o ABS son materiales plásticos con un bajo coeficiente de fricción haciendo que los objetos a coger se resbalen. Este modelo soluciona este problema añadiendo fundas de silicona en las puntas de los dedos para conseguir un mejor agarre. En la parte de la palma hace lo mismo con un material flexible impreso que además sirve para sujetar la prótesis al usuario, de ahí que sea con muchos agujeros para ventilación y para permitir mejor la función elástica del material.

La articulación del distal con el medial está bloqueada, la han fijado con un poco de inclinación para un mejor agarre. Esto se debe a que algunas veces se cierra mucho e impide el coger objetos mas medianos. También se ha de comentar la individualización del sistema de recuperación de dedos a la posición de origen por cada articulación consiguiendo un mejor control de giro de cada parte.



Ilustración 19. Modelo 2: Flexihand

El segundo modelo destaca principalmente por ser impreso en su totalidad, excepto la zona del antebrazo, por material flexible. Así se consigue una mano más adaptativa, tanto para el objeto a sujetar como al propio usuario, haciéndola una mano cómoda de usar. Al ser un material blando absorbe muy bien los golpes, no obstante, tiene grandes problemas con el desgaste (con agentes externos o con el propio sistema de cables) y pérdida de propiedades elásticas con el uso.

En este caso las articulaciones están todas libres y el propio eje que hace de unión de las falanges hace de sistema de recuperación de dedos.

Destaca también por su diseño colorido sin querer ocultar la prótesis, como cuando intenta imitar a los tonos de la piel, que pueda verse como un complemento atractivo y que llame la atención de la gente para bien.



Ilustración 20. Modelo 3: 3D Systems Teams

El tercer modelo es con diferencia el diseño más atractivo y con mejores acabados, sin embargo, a nivel de funcionalidad sigue estando bastante limitado como fijación de la articulación del dedo pulgar o el uso de solo una cuerda elástica para cada dedo haciendo así que no haya control sobre cada articulación, dejando libre el giro según las condiciones externas.



Ilustración 21. Modelo 4

El modelo 4 nivel estético es uno de los más flojos. El uso de tornillos para la sujeción de las diferentes partes es una opción pesada y puede ser peligrosa, además de sumarle complejidad al montaje de esta.



Ilustración 22. Modelo 5: Hand bq3D

El último modelo, al igual que la *Flexihand*, utiliza colores llamativos en su diseño. Al ser una impresión personalizada existen infinitas opciones. Esta mano destaca por su sistema de giro en la muñeca, de tal forma que ya no es solo flexión y extensión, añade el movimiento de abducción y aducción. Con esto se consigue que al unir movimientos se cierren más los dedos de izquierda a derecha o de forma inversa. También dispone de un sistema en el antebrazo que permite regular el cierre individual de los dedos de forma manual sin necesidad de herramientas. Por último, comentar los agujeros en el diseño para permitir mejor ventilación en la mano y ahorrar uso de material.

4.2.3. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis

De las manos mioeléctricas se puede destacar varias cosas que se pueden aplicar a las manos mecánicas. El sistema de agarre adaptativo, aunque un dedo haya llegado al objeto el resto siga para aumenta la superficie de contacto. Uso de materiales blandos de alta fricción en la parte interior de la mano para mejor agarre, cosa que estaban de acurdo con todos los tipos de prótesis. La idea de crear modos de movimiento y que se puedan regular o controlar gracias a la ayuda de la mano sana. El sistema de doble posición de la base del pulgar.

Centrarse en una estética llamativa y de estilo robótico, ya que imitar la mano de forma realista puede crear comparaciones negativas, que el usuario esté orgulloso de llevarla y que a la gente le llame la atención de forma positiva. Sin embargo, respetar las características de número de dedos y una estructura aproximada de la forma del conjunto.

El uso de sistemas regulables al acto mediante el uso de la otra mano, así ampliar las funciones de movimientos disponibles.

Todos usan el sistema de tendones, una cuerda cierra los dedos en el movimiento de flexión de la muñeca y un material elástico los devuelve a su posición de origen en la extensión.

La fijación del pulgar es un gran problema que se ha de tener en cuenta.

Muchos eliminan la articulación del distal con el medial y lo fijan con cierta inclinación, esto ayuda a que los 5 dedos tengan el mismo número de articulaciones (por las dos del pulgar) y que el recorrido a hacer para el cierre completo sea igual para todos, de esta forma no hay un dedo limitante. Esto



también mejora el agarre de objetos medianos y pequeños ya que esta articulación se cerraba tanto que lo impedía.

En vez de usar una misma cuerda elástica para cada dedo, que esto deja libertad a que se acomode según las condiciones externas, dividirlo en segmentos por cada articulación para darle la tensión necesaria de manera individual y controlar mejor el movimiento de cierre de cada dedo.

4.3. Demandas de usuario

El concepto de este proyecto es crear una mano mecánica teniendo en cuenta que la otra está sana, por ello nos centraremos en como afecta al ser humano el hecho de disponer de dos miembros superiores. Ante la dificultad de hacer encuestas a gente con deformaciones en las extremidades superiores o falta de partes en estas, se decidió imitar el estudio poniéndose en la piel de los afectados. Para ello se estuvo un día utilizando solo una mano completa y la otra con el puño, de esta forma simular un muñón y descubrir en que modo hace falta el segundo brazo. La experiencia se completó con videos y blogs de gente en esta situación.

4.3.1. Rutina de una persona con solo una mano sana

Como dice el título, se estudiará el día a día, esas situaciones que pasan desapercibidas pero que más se repiten a lo largo de la vida, haciéndolas fundamentales. Cada actividad se intentará hacer con solo una mano y se creará una lista únicamente con las que se presenten dificultades y haya sido necesario el uso de ambas manos:

- Hacer la cama: sobretodo para el cambio de funda en el cojín o para fijar las sábanas debajo del colchón.
- A la hora de ir al lavabo por el tema de arrancar papel cuando no hay portarrollos, hombres al orinar de pie o temas relacionados con la menstruación.
- Poner pasta de dientes en el cepillo.
- Temas relacionados con el aseo de la otra mano: depilación, cortar o pintar las uñas, enjabonado, curas, uso de cremas...
- Vestirse y desvestirse: atar los cordones, manejar la ropa, abrochar botones o similares, enganchar cremallera...
- Curarse heridas: para abrir el bote y poner el líquido en el algodón.
- Uso del móvil: poner a cargar o hacer fotos, pero para usar la pantalla o escribir con una mano basta.
- A la hora de la comida: fijar alimentos para cortar, pelar fruta, sujetar el vaso si es poco estable...
- Cocinar: sujetar sartén para remover, sujetar plato para batir huevos, abrir tarros o botellas...
- Cosas de casa: barrer o fregar, usar el recogedor, vaciar el cubo con agua, tender, fregar la vajilla, coser, planchar...
- Transportes: en el coche coger el volante y cambiar de marchas, en bicicletas más estabilidad cogiendo el manillar, motocicletas por más estabilidad y por usar los dos frenos o embrague y freno...
- Lavarse las manos y su secado.
- Sujetar la hoja para que no deslice al escribir o pintar.



- La práctica de ciertos deportes ya sea para equilibrar el cuerpo o porque se necesiten las dos manos en la práctica.

Obviamente no están todas las situaciones posibles, sin embargo, son unas de las más habituales y suficientes para analizar y sacar conclusiones.

4.3.2. Psicología del usuario

Generalizando el comportamiento humano, se trata de un ser social que necesita encajar. La idea de sentirse diferente, que se queden mirando la prótesis, que perciban que hablan de ellos por tu discapacidad o simplemente que crean que está pasando, puede crear problemas intrapersonales que afecten a su día a día. No solamente problema como grupo, individualmente pueden no aceptarlo y tratarse peor que la misma sociedad. Otros, en el caso de amputación, pueden reflejar simplemente lo que pensaban acerca de otra gente invalida antes de que él mismo lo fuera.

Otro factor importante es la dependencia, sentir que son una carga para las personas de su alrededor o que no pueden valerse por ellos mismos produciendo fuertes sentimientos de frustración u odio a ellos mismos.

El proceso de aprendizaje en el uso de la nueva mano puede ser arduo y largo hasta que la persona la haga suya, sobretodo para amputados que pierden la mano dominante. En este periodo puede tener sensaciones de fracaso y producir un rechazo constante. Como acostumbrarse a la sensación de tener algo extraño en contacto con tu cuerpo.

4.3.3. Uso de prótesis

Tras llevar un tiempo usando prótesis los usuarios pueden experimentar ciertos problemas o carencias que se comentarán a continuación:

- Algunas prótesis emiten ruidos molestos al producirse el movimiento, sobretodo las que utilizan servomotores o sistemas engranados.
- Quien tiene la discapacidad desde pequeño sufre el paso del tiempo, cuando se va haciendo mayor va dejando atrás las prótesis haciendo necesaria la sustitución por una más grande. La compra de una mano ya supone suficiente inversión para que a los meses haya que cambiarla.
- Los sistemas de agarre a la parte sana pueden producir irritación y molestias, algunos hasta dolor, lo suficiente para que prefieran no llevarlas.
- Problemas de calor y sudoración por el contacto directo de la prótesis y la piel.
- La estética es importante, algunos dejan de usarlas por vergüenza.
- Falta de agarre o dificultad al sujetar algunos objetos.

4.3.4. Conclusiones aplicadas a la creación de una prótesis

Tras analizar las actividades diarias que presentan dificultades al hacerlas con una sola mano se puede observar que no hace falta dos manos dominantes. Con solo una mano se pueden realizar la mayoría de las actividades diarias, el problema es que más costosamente. Usando solamente **la segunda mano, cuando es necesaria, pasa a tener un papel de apoyo** a la mano diestra. Así se considerará que existe la mano de actuación, zurdo o diestro, y la mano de apoyo, la mano restante. La mano de actuación



tendría que cubrir las actividades más precisas, delicadas y de movimientos complicados, que en el usuario sería la mano sana. En amputados se podría dar el caso que pierden la mano diestra, sin embargo, por la limitación de la mano mecánica, lo más fácil sería aprender a dominarla y convertirla en su mano actuante. La mano de apoyo se encargaría de sujeción de objetos de forma más basta para ayudar a la de actuación, que en el usuario sería la mano mecánica. Para entenderlo mejor se utilizará un ejemplo, la mano de actuación se encargaría de actividades individuales complicadas como sería la escritura y la mano de apoyo solamente cuando sea necesaria, como sujetar la botella para que la mano de actuación desenrosque el tapón. Esta observación reduce el número de movimientos necesarios en la mano protésica haciendo que su diseño gane **simplicidad**.

Las manos son una parte del cuerpo que por su función de interacción con el entorno se ensucian muy fácilmente, es sorprendente la cantidad de veces al día que las lavamos. A todo esto, se le suma el tiempo del coronavirus donde la limpieza constante de manos es fundamental y exigida al entrar en sitios públicos. Por tanto, sería necesario diseñar la mano con posibilidad de **lavado** o desinfección.

La creación de manos adaptables o muy **económicas** para tener en cuenta el crecimiento de gente joven.

La prótesis está presente durante todo el día, tiene que ser un mecanismo con el **que el usuario esté a gusto**: comodidad, no calores, no ruidos, atractivo, que cumpla su función de agarre... no darle más motivos para que deje de usarla.

No todos los problemas son físicos, al tratarse de una minusvalía externa es algo que está a la vista todo el día. Estas personas pueden sentir rechazo por parte de la sociedad, afectando negativamente a su autoestima. Muchas veces el uso de manos artificiales ayuda, sin embargo, hay algunos tipos de prótesis que producen el efecto contrario, como garfios o estilo pinza. Por lo que la mano protésica deberá cumplir con una **estética agradable** que hasta llegue a producir admiración por la sociedad.

Otro problema para tener en cuenta es la falta de independencia que sientan que son una carga para el resto y a eso se le suma la frustración en el aprendizaje del uso de la nueva mano. Un conjunto de motivos que podrían afectar a la salud mental del usuario. En tal caso se tendría que diseñar una mano mecánica **funcional**, no puramente estética, que sea fácil de usar.

5. Especificaciones del diseño

Gracias al estudio preliminar (mano, mercado y usuario) se puede saber especificaciones que se requieren al producto final (al menos intentarlas tener en cuenta a la hora de diseñarlo) además se han remarcado los problemas a solucionar. En los puntos de arriba se ha desarrollado cada idea y comentado el porqué, en este apartado se listará de forma concreta cada idea.

- No buscar mano realista, estética atractiva estilo robótico



- Capacidad de lavado o desinfectado
- Ligera
- Resistente al agua
- Hecha con materiales y herramientas de fácil acceso
- Conseguir un buen agarre
- Económica
- Permitir varios tipos de agarre (movilidad del pulgar)
- Facilitar la sustitución de piezas y montaje
- Facilitar mantenimiento
- Funcionamiento puramente mecánico
- Reducir el esfuerzo necesario para hacerla funcionar al máximo
- Uso sencillo
- Resistente
- Cómoda
- Segura para el usuario y para quien lo rodea
- Utilizar materiales reciclables o que no sean perjudiciales con el medio ambiente

6. Diseño Del Producto

En este apartado se tratará de resolver tecnológicamente el problema, elaborando un conjunto de posibles soluciones. La forma más sencilla es dividirlo en subproblemas teniendo en cuenta que la solución de uno puede afectar a las otras, por lo que se irán diseñando conjuntamente e irán surgiendo nuevos problemas. Siempre se buscará cumplir las especificaciones del producto, considerando las limitaciones de la impresión 3D y respaldándose con las conclusiones obtenidas en el apartado de estudio preliminar.

Se tiene que evitar las ideas preconcebidas, esto limita la posibilidad de innovación, para ello se van planteando las soluciones, rechazando y poco a poco, ellas mismas, van dando forma al producto.

Como se ha comentado anteriormente, cada solución de un subproblema puede afectar a las otras, yendo de un diseño a otro, por lo que se ha decidido dividir las partes en diferentes versiones (1,2,3...) para que la lectura del trabajo se pueda hacer de forma lineal.

Cuando se refiera a *El dedo* incluirá Meñique, Anular, Corazón e Índice. El dedo Pulgar se considerará a parte debido a su complejo sistema de movimiento y su diferenciación dimensional.

6.1. Medidas de la mano

Se cogerá como referencia la mano del propietario del TFG, así se podrá hacer tener medidas realistas, proporcionales y de fácil acceso. Las medidas se tomarán en milímetros.

Distal			Medial			Proximal		
Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto

Meñique	27	17	13	23	17	15	37	18	17
Anular	28	18	14	31	18,5	16	48	20	19
Corazón	30	18	14,5	31	19	17	53	19,5	20
Índice	28	18	15	27	19	17	46	21	20
Pulgar	38	22	17				39	23	21

Tabla 1. Medida dedos mano

Por la dificultad de explicarlo con tabla, la parte de la mano y parte de antebrazo se mostrará con una imagen. Ya que se utilizará para hacer la carcasa de la mitad superior de la mano se ha contado que tiene una profundidad de 20 milímetros, para representar la distancia entre el eje de giro de la muñeca y la parte del dorso.

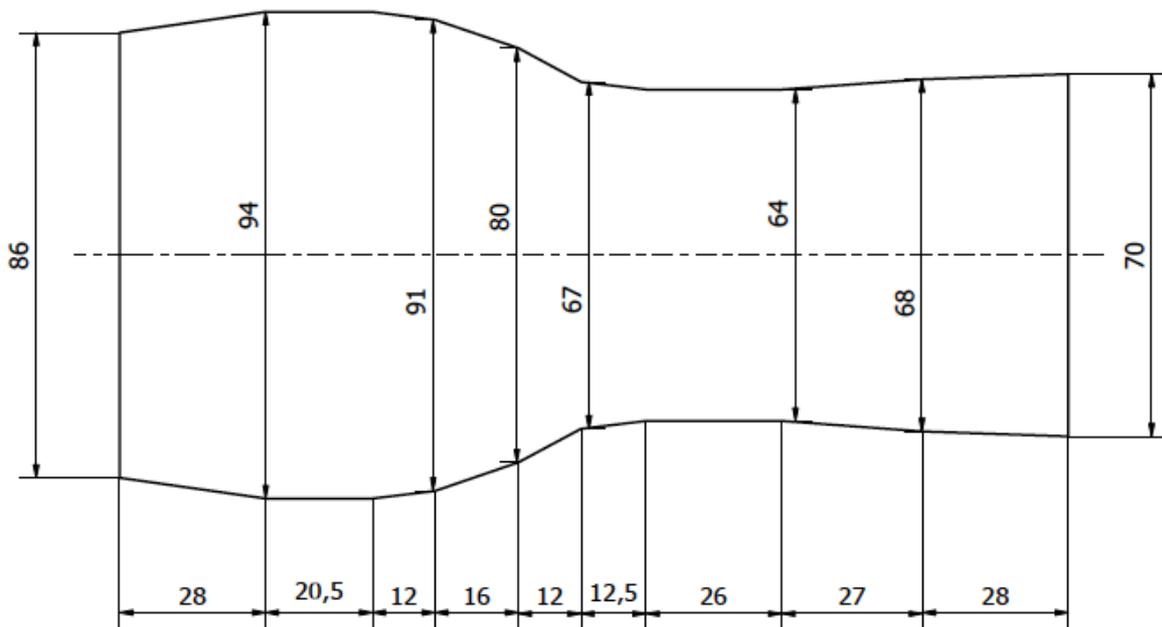


Ilustración 23. Medidas mano y parte antebrazo

De esta forma se tiene conocimiento de todas las medidas para saber las limitaciones dimensionales del diseño.

6.2. Agarre (versión 1)

Primero se ha de conocer bien los factores que influyen en el rozamiento que no es un concepto sencillo. Este es la resistencia a deslizamiento que ofrecen los cuerpos en contacto. Los objetos que a simple vista parecen lisos al ir ampliándolos tienen cierta rugosidad que es la que permite que exista estas fuerzas de fricción. Parte de la fuerza que se gastaría en el deslizamiento se va repartiendo en los micro apoyos creados gracias a la rugosidad.



Ilustración 24. Superficie entre objetos ampliada

De este modo, lo que interesa es aumentar el número de micro apoyos, eso dependerá principalmente del tipo de materiales (tanto del objeto a coger como de la prótesis), la fuerza perpendicular (esfuerzo del usuario) y de la superficie en contacto real.

El principal motivo de mejorar el agarre es para que el usuario no tenga que hacer mucha fuerza para sujetar los objetos, ya que muchas veces no tiene la musculatura sana del todo. Por lo tanto, el diseño se centrará en mejorar la variable material, conseguir mejores sistemas adaptativos y de alto rozamiento.

6.3. Sistema de movimiento (versión 1)

En la creación de manos mecánicas con 3D el tipo de sistema de movimiento que más ventajas tiene es el de tendones, fácil mantenimiento, ocupa poco espacio, no es ruidoso y tiene capacidad de transmitir bien el esfuerzo. Primero se explicará un poco el sistema. Se basa en aprovechamiento de movimientos sanos del usuario, en este caso los de la muñeca, para el movimiento de los dedos. Para el cierre gasta una cuerda que pasa por diferentes conductos para tensar los dedos. No debe ser elástica para que pueda transmitir bien el esfuerzo de primeras, debe ser resistente para no tener que cambiarla seguido y que se adapte fácil a los cambios de giro en los conductos, por ejemplo, se podría usar hilos de poliéster o de Nylon. Para la relajación de los dedos y su vuelta al estado original, podría hacerse del mismo modo que el anterior, sin embargo, para ahorrar esfuerzos es preferible un sistema que se ponga en desequilibrio con la acción de cerrado y que con la energía almacenada vuelva al punto inicial. Con estas características encontramos los materiales elásticos, podría usarse gomas de caucho, los muelles de las pinzas o materiales flexibles de impresión, como los que hacían a la vez de eje en el modelo 2.

Se va a analizar los factores a favor y en contra del movimiento. El par que se haga en la muñeca es el único esfuerzo que ayuda al movimiento. El peso de los dedos puede jugar a favor o en contra dependiendo de su posición, no obstante, se intentará compensar con el sistema elástico para que no baile al moverlo. En oposición se encuentra el rozamiento de cada parte móvil, esto incluye cada articulación y los deslizamientos de las cuerdas por los conductos. También se ha de tener en cuenta la fuerza de elástica del material de retorno, esta controlado por la ley de Hooke, es directamente proporcional con el alargamiento producido. Interesa que el usuario haga la menor fuerza posible, no solo por comodidad sino porque muchas veces no conservan bien la musculatura, para ello se intentará formas de reducir el par de giro en la muñeca y se reducirán al máximo los factores que se oponen. Las articulaciones y conductos son de materiales termoplásticos por hacerse en impresión 3D, por lo que ya tienen un bajo coeficiente de rozamiento, sin embargo, se añadirá holgura en la articulación

evitando que no pierda rigidez. La fuerza elástica depende del rozamiento de las articulaciones de los dedos y del peso de estos, por lo tanto, se buscará reducir el peso del dedo al máximo. Al tratarse de momentos, el valor del par dependerá de la distancia del radio de giro, a mayor distancia menor par, sin embargo, aumentará la distancia a recorrer en el giro. Se tendrá que llegar a un compromiso entre fuerza y distancia.

La mano es un órgano que se utiliza mucho y el constante abrir y cerrar hace que los cables estén en continuo movimiento. Esto puede desgastar tanto el material de la prótesis como los propios cables, así se vuelve a destacar el uso de materiales de bajo rozamiento y resistentes. Sin embargo, se buscará dar prioridad ante desgaste al material de la prótesis, por dificultad de sustitución, y las cuerdas se intentará que sean de fácil recambio, asegurando el máximo tiempo de vida útil posible.

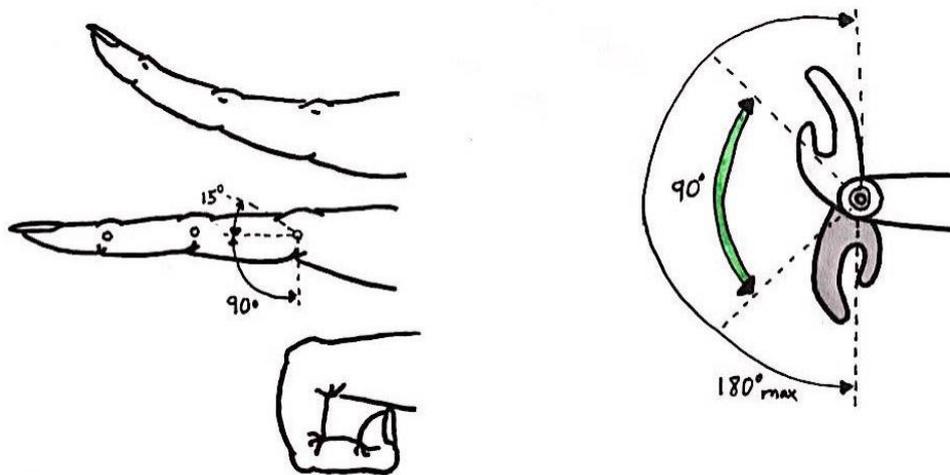


Ilustración 25. Rango movimientos dedo y muñeca

Para saber las distancias que necesitarán recorrer los cables para el cierre se necesita el rango de movimiento de las articulaciones afectadas. Las articulaciones de los dedos, partiendo de los dedos alineados con la mano, pueden girar hasta unos 15° en el movimiento de extensión y cuando flexionan pueden llegar a los 90° por articulación. La muñeca tiene un rango máximo de 90° en la flexión y otros 90° en la extensión. La diferencia es que los dedos serán diseñados completamente por lo que el rango de giro se podrá elegir, en cambio, la muñeca es la del usuario por lo que dependerá del estado de esta. En algunos casos por falta de uso o por atrofia tiene el rango más reducido, teniendo en cuenta esto se intentará reducir a 90° de acción para obtener el movimiento.

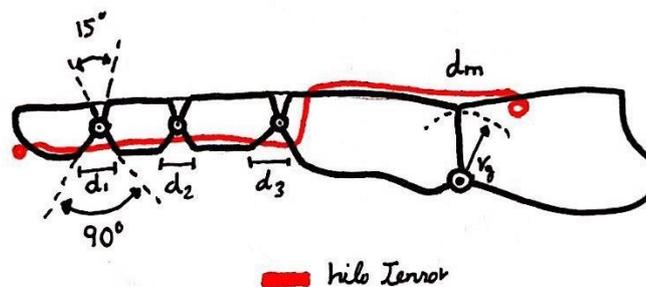


Ilustración 26. Recorrido cable tensor

Para producir el cierre completo de los dedos, la muñeca tendrá que producir una diferencia de posicionamiento (d_m) lo suficientemente grande para recoger las distancias del cable que pasa por las tres articulaciones que posee el dedo (d_1 , d_2 y d_3). Esta distancia dependerá del valor del radio de giro (la distancia del eje a la cuerda) y del rango de giro (ángulo), tanto de las articulaciones como de la muñeca. Por lo que se irá jugando con ellos.

Esa distancia es la necesaria para cerrar un dedo, al situarse en paralelo también lo será para cerrar los cuatro dedos restantes, sin embargo, el esfuerzo que se tendrá que hacer será cinco veces mayor.

El cable tensor tiene que estar en la parte inferior del dedo ya que se necesita de bastante fuerza para conseguir sujetar el objeto y que esta se pueda regular según la fragilidad del objeto. El sistema elástico va por la parte superior ya que solo ha de encargarse del pequeño esfuerzo de devolver los dedos a su posición de origen. Así se logra también un agarre más intuitivo. El problema de esto es que lo que estira el cable se encuentra en la parte superior, para ello los cables tendrán que pasar al otro lado con el recorrido más corto para no quitar espacio a la mano del usuario y así, estos cambios bruscos pueden producir desgaste en las esquinas de giro.

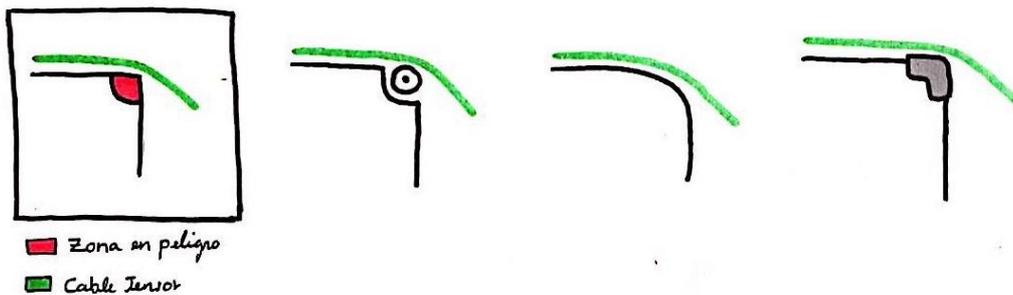


Ilustración 27. Canto conductos hilo tensor

El modelo de la polea se descarta por alta complejidad en tan poco espacio. Un refuerzo metálico liso daría muy buen resultado y sería una buena forma de alargar la vida útil del producto. La opción de redondear los cantos, al aumentar la superficie de contacto, distribuiría mejor la fuerza. Además, se trata de una solución constructiva que no habría que añadir ningún recurso externo. Por lo tanto, cuando sea necesario se reforzará con piezas metálicas (cambios bruscos de dirección) y cuando no haya problema se redondearán los cantos (articulaciones de los dedos).

6.4. Dedo (versión 1)

Ya que la prótesis es como una carcasa para la mano impedida, esto hace que tenga que ser un poco más gruesa que la mano normal. Para respetar la proporcionalidad los dedos se diseñarán también un poco más grandes, al estilo guante.

Como se quiere respetar la forma de la mano cada dedo respetará sus medidas dentro de lo posible (sin hacerlos todos iguales). Sin embargo, con la idea de simplificar el diseño se realizará una serie de generalizaciones en las medidas. Los distales de los cuatro dedos serán iguales. En anular y el índice por su exagerada similitud también. La anchura y altura de los mediales, proximales y la base del distal

será la misma para todos los dedos, por lo que el dedo Meñique se hará un poco más grande para conseguir un mejor efecto de proporcionalidad.

Genérico		
Longitud Distal (mm)	Anchura dedos (mm)	Altura dedos (mm)
34	22	19

Tabla 2. Medidas compartidas

	Longitud medial (mm)	Longitud proximal (mm)
Meñique	26	41
Anular e Índice	29	48
Corazón	32	55

Tabla 3. Longitudes dedos

Como todos los dedos son de la misma altura, en el caso de estar alienados, los cuatro distales llegarán al objeto a la vez (suponiendo grosor de este constante). No obstante, al tener diferentes longitudes, el dedo con menor longitud de proximal será el primero en que su medial llegue al objeto y así bloqueando el sistema. Esto quiere decir que cuando un dedo ya no pueda continuar con el recorrido los otros tampoco podrán avanzar, lo cual limita enormemente el agarre. Una buena solución sería el sistema de agarre adaptativo de las manos mioeléctricas.

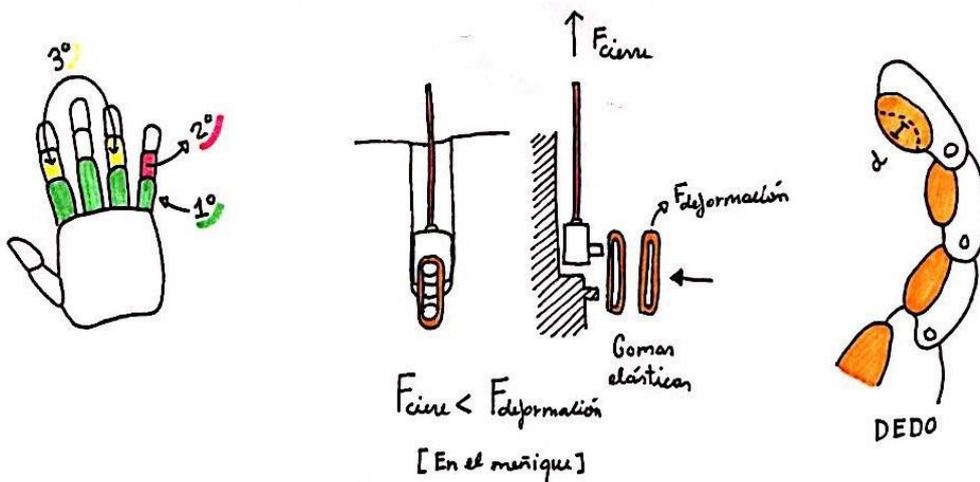


Ilustración 28. Sistema agarre adaptativo

Ya que esta limitación se debe a la rigidez de la cuerda de tensar, una solución sería dotarla de cierta flexibilidad. Sin embargo, el efecto elástico no podría darse durante la acción de solo cierre, ya que se

perdería el principio del movimiento en llegar al límite elástico y se habría cerrado la muñeca sin mover un solo dedo (gastando el esfuerzo en deformar el cable). Por tanto, la mejor forma sería añadir a la cuerda un sistema elástico que solo se activara cuando se pasara de la fuerza necesaria para el cierre (F_{cierre}) de los dedos. Eso pasará cuando un dedo se haya bloqueado al llegar al objeto, a partir de ahí el sistema elástico de su cuerda se irá deformando ($F_{\text{deformación}}$), dando paso al resto de dedos. Para este sistema se ha de conocer bien los valores de las fuerzas en contra del movimiento (rozamiento y fuerza elástica del sistema de recuperación).

El uso de materiales blandos en la parte interior de los dedos podría contribuir de forma muy leve, ya que solo permitiría el avance según la deformación de este al contacto. Sin embargo, es una buena forma de conseguir aumentar la superficie de contacto al adaptarse al contorno del objeto.

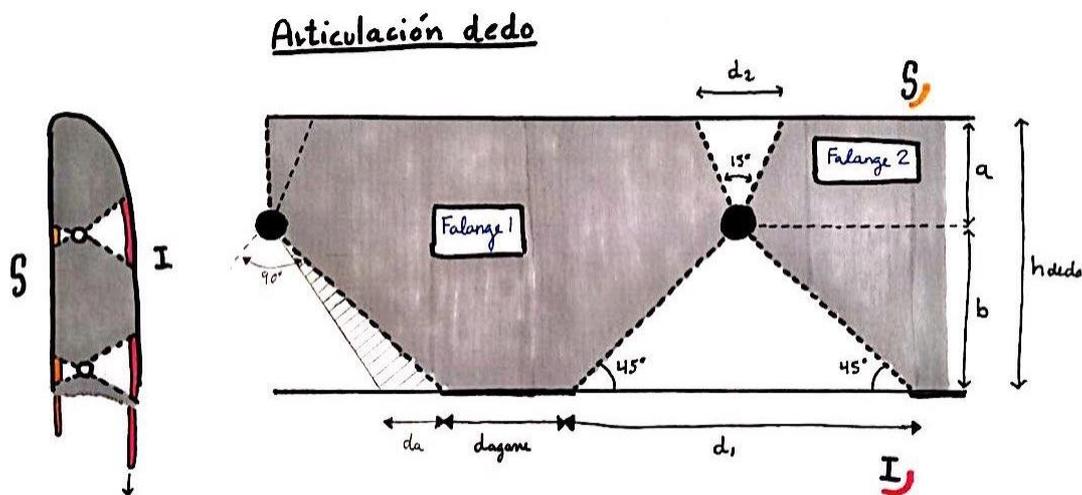


Ilustración 29. Estudio articulación dedo

Para el diseño del dedo, primero se ha limitado la altura del dedo de forma que se asemeje a uno real de la mano, cuyas medidas se han comentado anteriormente. También, se conoce la existencia de restricciones del movimiento de giro del dedo, que son 15 grados hacia la parte superior y 90 grados hacia la parte inferior.

Con todo ello, se procede a la disposición de los ejes que permita dicho desplazamiento. Cabe destacar que los ejes se han representado con pequeños círculos negros, como se puede observar en la anterior imagen.

En el proceso de realizar un giro, se necesita momento. Por ello, con el objetivo de disminuir el uso de la fuerza, se debería maximizar la distancia de "b", maximizando a su vez la medida de "d1". No obstante, esto deriva en la situación donde son nulos "d2" y "dagarre", eliminando el momento que se necesita para recuperar la posición de reposo del dedo y superficie para poder sujetar objetos, respectivamente. Por ello, al tener estas restricciones, se debe conseguir una solución de equilibrio entre las dimensiones de "a" y "b", para que a su vez exista una consonancia entre "d1", "d2" y "dagarre".

Tras la realización de varias pruebas y tanteos con materiales baratos y sin hacer uso de la impresora 3D, se ha llegado a la conclusión de que el resultado óptimo es colocar el eje a mitad altura del dedo,

permitiendo así un cómodo cierre de la mano, una tranquila abertura a la posición de reposo, una superficie de agarre que se adapta al propósito de la prótesis y, además, visualmente es más estético.

Por otra parte, se ha podido ver que, en la práctica, no es necesario permitir el giro hacia la parte superior, ya que la función de la prótesis es el agarre de objetos. Por ello, se ha decidido eliminar el hueco que queda arriba al eje. De esta forma proporciona también una mejor estabilidad al dedo a la hora de volver a la posición de reposo.

Asimismo, cabe comentar que en algunos casos lo más probable sería que no fuera indispensable un cierre de los dedos con un giro de 90 grados, de esta manera se podría reducir el ángulo para obtener una mayor área de agarre.

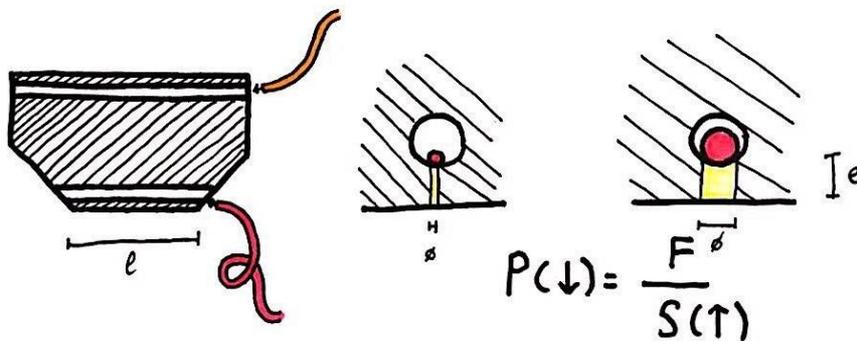


Ilustración 30. Esfuerzos conducto cable tensor

A continuación, se ha reflexionado también sobre el valor que debe tener el espesor “e” que se muestra en la figura. Este debe ser el mínimo posible para no influir en el valor de “b” que se ha comentado antes, pero ha de ser capaz de soportar un peso determinado sin llegar a fracturarse. Por ello, se ha realizado pruebas con piezas impresas en 3D con distintos valores de “e”, verificando que dicha zona no se comportase de manera muy frágil rompiéndose fácilmente durante el agarre de un objeto. Tras varios ensayos, se ha llegado a la conclusión de que el espesor “e” debía ser superior a 1 milímetro.

Por otra parte, hay que tener en cuenta el grosor que debe tener el hilo tensor para que no se deteriore la zona final de la falange donde se aloja la cuerda, una parte crítica que actúa como un concentrador de tensiones. Para ello, se ha hecho uso de la relación que tiene la sección del cable con la presión que se ejerce sobre ella en función de la fuerza desempeñada. Como la fuerza es constante, para obtener una menor presión, se necesita más superficie de contacto, lo que se traduce en una máxima longitud y/o grosor de la cuerda.

Cabe destacar que el hilo al estirarse actúa como una cuchilla en la zona crítica, siendo además la longitud de la cuerda limitada a la que ya tiene el dedo, se llega a la conclusión de que se debe escoger un grosor máximo posible. En el mercado se ha encontrado que el hilo de nylon común más grueso era de 0,5 milímetros, el cual superaba las pruebas que se han realizado. Como se ha dicho, es

importante tener la mayor superficie de contacto posible, por lo que se ha meditado la opción de introducir dos hilos en lugar de uno, para tener un resultado más conservador.

Para el sistema elástico del dedo, se ha decidido utilizar una goma elástica ya que es el material más barato, simple y accesible, sin necesidad de impresión y ocupando mucho menor espacio que las demás opciones, cumpliendo igualmente con la función que debe tener. Además, se ha estudiado que el canal por donde se va a alojar esta tendrá la parte superior sin cubrir, ya que la cuerda va a mantenerse siempre adherida a la superficie del dedo en cualquiera de sus posiciones, permitirá una fácil sustitución de la goma en caso de que se deteriore y una cómoda introducción de esta sin ningún tipo de rozamiento.

Respecto al eje utilizado para realizar la articulación, se han considerado varios modos: sin eje, con eje cilíndrico o con eje esférico. El primero se descarta porque no existe ningún tipo de apoyo con el que realizar el giro de la articulación correctamente ya que la unión mediante solo cuerdas hace que exista un balanceo entre piezas. La opción del eje esférico es bastante inestable y no consigue un giro holgado debido al considerable rozamiento que tiene la superficie. Por ello, se escoge un eje cilíndrico, formando un sistema más sencillo que consta de un pequeño cilindro que atraviesa las dos falanges que se desean unir. A su vez, como se puede ver en la imagen, en lugar de optar por un sistema de eje cilíndrico con dos apoyos como se pensaba en un primer boceto, se diseña la unión con tres apoyos, de forma que así existe un encaje más rígido entre ambas falanges con la correcta holgura para un cómodo giro.

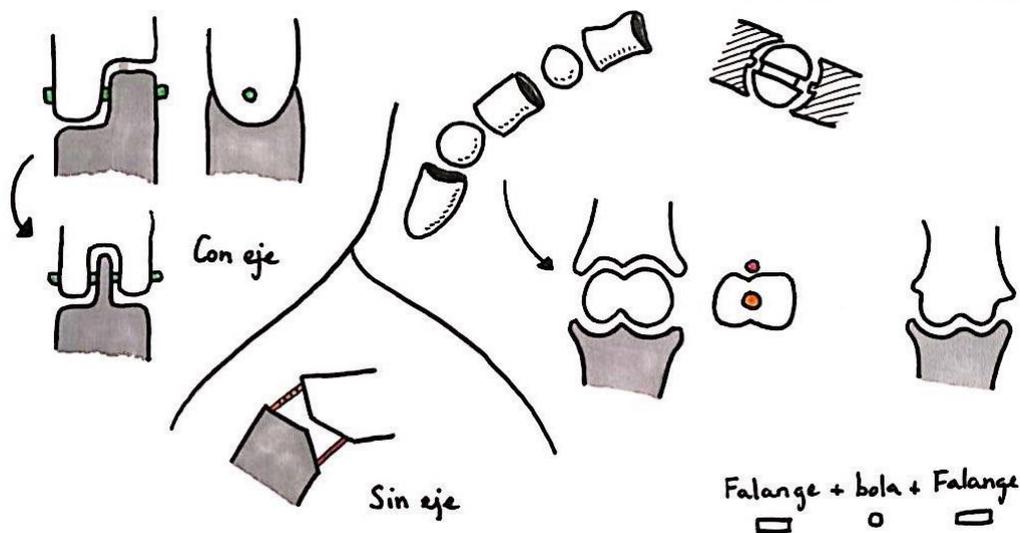


Ilustración 31. Tipos de eje articulación dedo

A continuación, se puede observar cómo ha resultado la evolución del sistema de articulación del dedo:

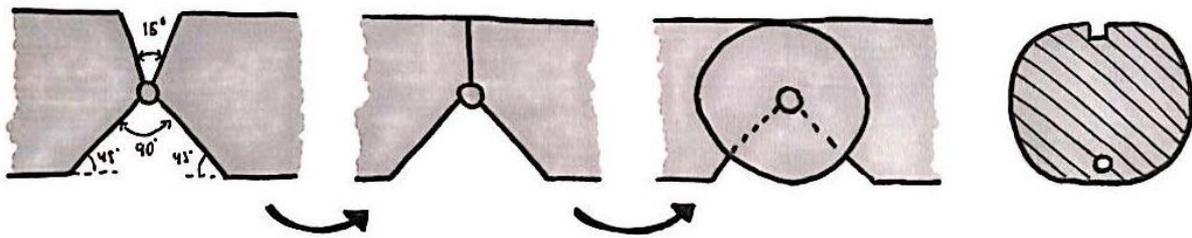


Ilustración 32. Evolución articulación dedo

Como ya se ha comentado, la parte superior al eje se decide realizar de forma maciza, sin dejar hueco para un giro hacia arriba. Además, se ha considerado introducir una pequeña pieza esférica en el hueco inferior del eje, aportando así más superficie de agarre para una mejor sujeción de los objetos. Se muestra también en detalle cómo es la sección transversal del dedo, donde se percibe de mejor manera cómo son los canales por donde se alojan el hilo tensor y la cuerda elástica.

Una vez definidos cómo tiene que ser el sistema y la forma del eje, se plantea el material que se utilizará para este último. Se ha barajado entre las ideas de usar tornillos metálicos o impresos en 3D. A pesar de que los metálicos tienen un acabado pulido que evitan el rozamiento y tienen mucha resistencia, han sido descartados, porque al tener también un mayor peso hacen que se complique más la vuelta a la posición inicial, traduciéndose esto en una mayor fuerza tensora en la cuerda elástica para mantener los dedos erguidos en reposo, a su vez, esto implica una mayor fuerza que ejercitar con el doblaje de la muñeca durante el cierre de la mano.

Por ello, se ha decidido usar ejes de PLA, es decir, diseñados e impresos en 3D, para una mayor ligereza en el conjunto. Cabe decir que los extremos de las falanges que se unen con el eje se han diseñado de forma que una de las falanges tiene apriete con el eje y la otra tiene cierta holgura, consiguiendo que el eje se pueda alojar y también mantenerse fácilmente.

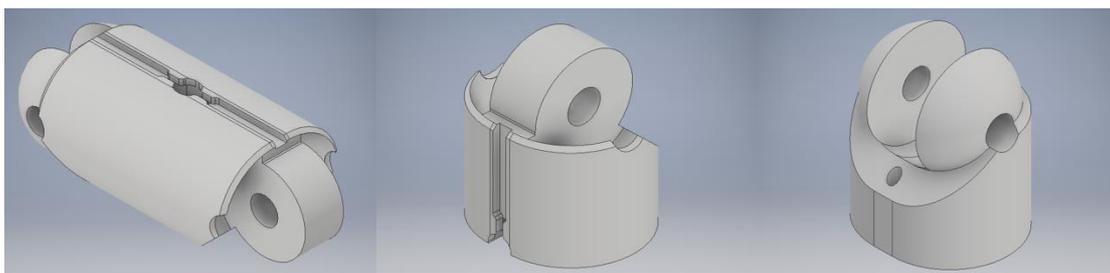


Ilustración 33. Falange modelo 3D

Para tener un giro del dedo más controlado, se ha ideado dividir en tres el sistema elástico, una por cada articulación, ya que así no se deja al azar el movimiento que realizan las uniones de las falanges. Para ello, se ha tenido que realizar unos agujeros a mitad posición entre articulación y articulación donde se alojarán los nudos de las gomas elásticas, que actúan como topes en forma de bola, impidiendo que se suelten del dedo mediante la realización de otros agujeros interiores con secciones más pequeñas.

Por otra parte, las falanges se dividirán en dos para la impresión con la finalidad de obtener un mejor acabado, ya que de esta forma se consigue tener una base plana en la que apoyarse durante la impresión. Para el acoplamiento entre las dos partes, se ha realizado otros pequeños agujeros donde se introducirán unos machos de madera que sirven de guía cuando se ensamblan y se hará uso de un fuerte pegamento que adhiera bien ambas fracciones.

El distal del dedo también se ha dividido en dos por la misma razón anterior y para poder introducir y ocultar el nudo de una de las gomas elásticas, de esta manera el dedo queda más estético. Asimismo, cabe destacar que se ha realizado un sistema de enganche del hilo tensor basado en el diseño de una media corona donde el cable entra y sale de allí, como se puede ver representada en la siguiente imagen:

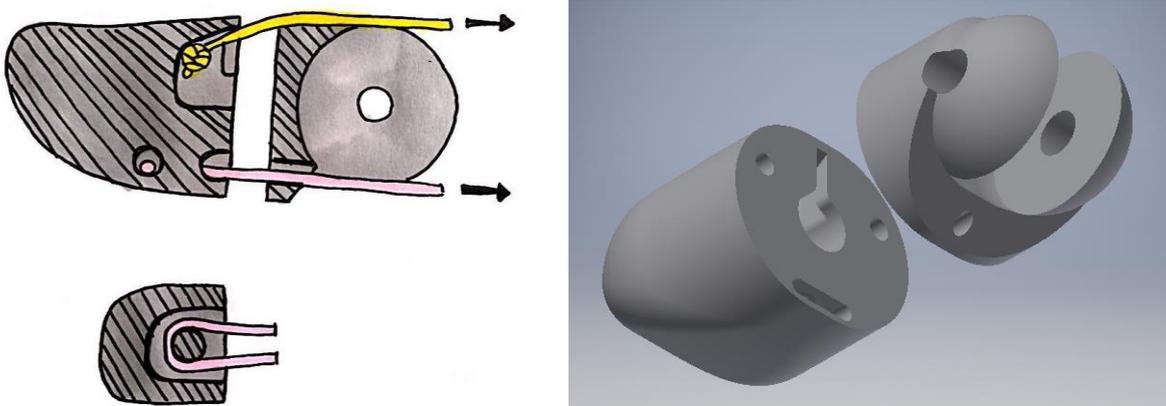


Ilustración 34. Sujeción cables distal concepto y modelo 3D finalizado

De este modo, por el conducto del cable tensor residen dos filamentos, aumentando así la superficie de contacto, que como se ha comentado anteriormente, se obtiene un resultado más conservador en cuanto a seguridad de que no se rompa. Como en el distal es donde se producirán los cambios de hilo tensor o elástico en caso de rotura o desgaste, la apertura de las dos fracciones tiene que ser de fácil acceso por lo que no se fijarán con pegamento. Respecto a la correcta adherencia entre ambas partes, se ha estudiado que con los machos de madera, que se introducen de la misma forma que en las falanges, y con las fuerzas de tracción tanto de la goma elástica como del hilo tensor son suficientes para mantener la cohesión de ambas piezas del distal.

6.5. Sistema de movimiento (versión 2)

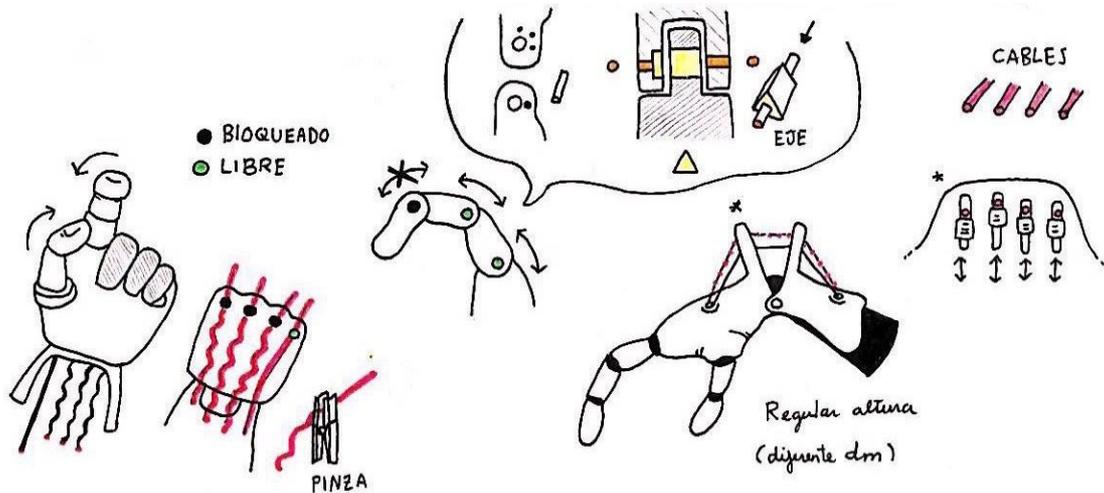


Ilustración 35. Tres ejemplos de ampliación rango movimientos

En este apartado se comentarán otros tipos de movimientos que pueden realizar los dedos, distintos al giro básico, en el que todos los dedos se cierran en la misma velocidad, a la vez y de forma idéntica.

Para ello, se ha reflexionado sobre tres tipos de sistema distintos al actual, que son:

- El bloqueo de los ejes para realizar oscilaciones distintas en los dedos. Este consiste en inmovilizar una articulación y así no permitir que se realice el giro en ese eje, manteniéndose esa unión de falanges erguida. En el bocadillo de la imagen posterior se puede observar algunas soluciones para este problema.
- El bloqueo de un hilo tensor para que un dedo quede aislado del giro. Su funcionamiento reside en que el impedimento del movimiento de un dedo se realice pinzando su hilo tensor correspondiente en el dorso de la palma de la mano cuando el dedo se encuentra en la posición de cerrado, así no se podrá producir ningún tipo de movimiento con ese hilo y a su vez con el dedo, mientras los demás siguen su funcionamiento normal.
- El control del radio de giro en la muñeca para que los dedos se muevan en orden y velocidad distintas. Para ello, lo que se ha de hacer es modificar la distancia que hay entre el hilo tensor a la muñeca. A mayor distancia, el dedo hará más recorrido con una fuerza determinada e irá más lento. El sistema para regular dichas distancias queda representado en la siguiente imagen.

6.6. Pulgar (versión 1)

Para el pulgar surge el problema de que solo tiene dos articulaciones, lo cual reduce mucho la distancia de recorrido que realiza el hilo tensor, esto implica que cuando el pulgar se cierre completamente, se inmovilizarán los demás dedos y no podrán cerrarse del todo. Por ello es necesario buscar una solución que permita el recorrido total de todos los dedos.

Entre las posibles opciones está aumentar considerablemente la altura del dedo del pulgar y/o la cota "b" de la ilustración 29 para así obtener una mayor distancia de recorrido de hilo tensor o idear un

sistema de movimiento compatible con el correcto funcionamiento de cierre de la mano sin tener que modificar excesivamente el diseño del pulgar respecto a los demás dedos.

Se opta por la solución de mantener las dimensiones de la falange del pulgar acorde al resto de dedos, mientras que el distal tendrá una longitud mayor, ya que así se asemeja más a una mano real y queda mejor estéticamente. En el siguiente apartado se explica el sistema de movimiento empleado para adoptar esta alternativa.

6.7. Sistema de movimiento (versión 3)

En la siguiente imagen se muestran los valores de los recorridos en milímetros que puede realizar cada articulación de los dedos.

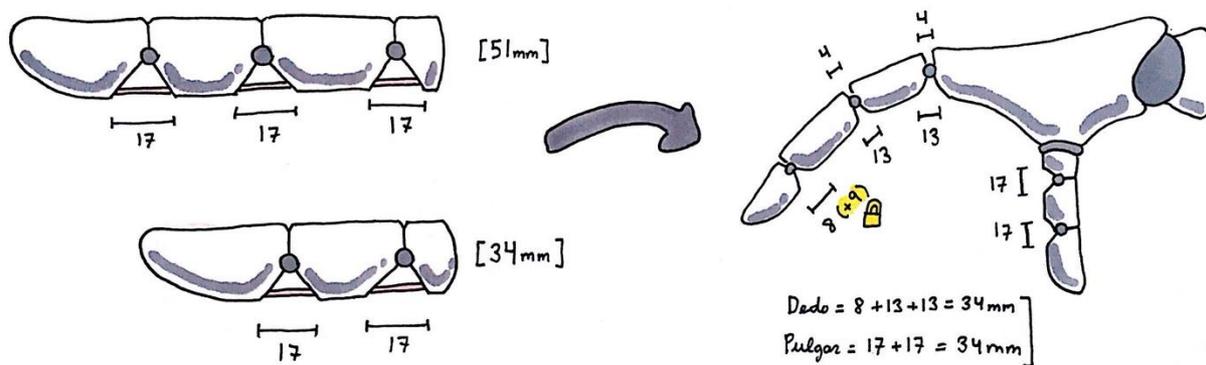


Ilustración 36. Reajustes sistema de movimiento

Como se puede ver, si no se modificase el sistema de movimiento de la versión anterior, cuando el pulgar recorriese todo su rango de 34 milímetros, el resto de los dedos quedarían paralizados sin finalizar su propio trayecto. Para solventar este problema, se ha decidido reducir el movimiento de la articulación del distal de 90 grados a 45 grados ya que, como se ha comentado, a parte de no ser necesario, entorpece el agarre de objetos. Esto se traduce que, durante el giro, en lugar de desplazarse 17 milímetros, hará aproximadamente 8 milímetros. El método para realizar esta limitación será tensando la goma elástica correspondiente hasta que recoja 9 milímetros del hilo tensor. Para las otras dos articulaciones, se divide entre dos el recorrido restante, por lo que cada articulación debe moverse: $(34-8)/2 = 13$ milímetros. Esto se verá reflejado como unos dedos más relajados en la posición de reposo, flectados unos pocos grados hacia el interior de la palma en lugar de estar completamente tensos (a cero grados respecto de la palma), mientras que el pulgar se mantendrá rígido, pudiendo así maximizar el recorrido de los dedos.

Tras averiguar todos los desplazamientos que pueden realizar los dedos incluyendo el pulgar, se ha estudiado cómo debería moverse la muñeca para llevar a cabo el proceso completo. Al principio del trabajo se ha comentado un par de rotaciones que puede realizar una muñeca sana, como son:

- La flexión-extensión. Que se desea usar para el movimiento básico y esencial de abrir y cerrar la mano.

- La desviación cubital-radial. Que ha sido relacionado para que realice los movimientos de abducción y aducción de la mano. No obstante, se ha decidido omitir debido a la poca utilidad que puede tener en la rutina del usuario, a su alta complejidad en el diseño y al tiempo limitado de este proyecto.

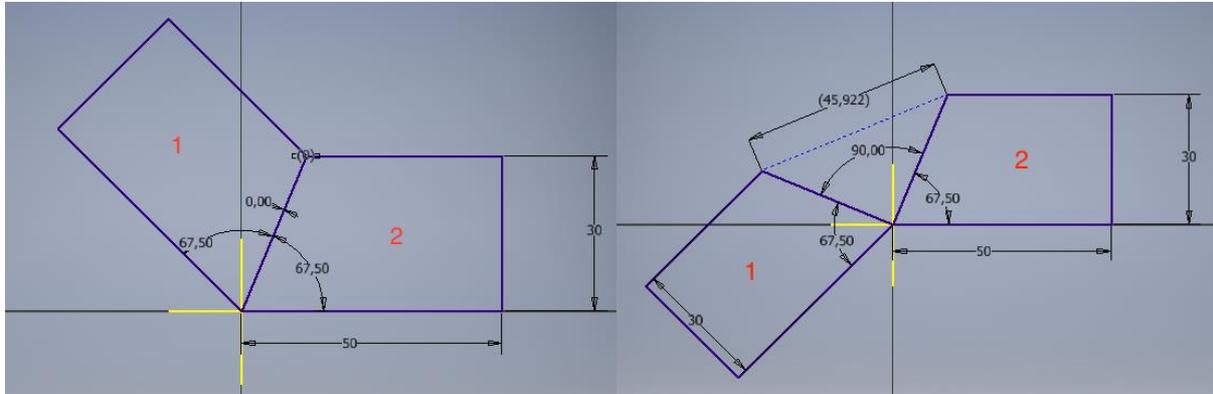


Ilustración 37. Articulación muñeca extensión y flexión

Por tanto, la muñeca realizará solamente el giro de flexión-extensión, el cual se hará finalmente con 90 grados (45 grados de flexión y 45 grados de extensión), como se ha expresado en el apartado 4.1.1. Para poder realizar el movimiento de 45 grados de extensión, se debe recortar parte de las piezas para que no choquen entre ellas limitando a 0 grados este giro, por lo que se quitará la mitad de esos 45 grados en la muñeca (número 1 de la **ilustración 37**) y la otra mitad en el antebrazo (número 2 de la **ilustración 37**), de esta forma queda más igualado. Para el movimiento de flexión no es necesario tener en cuenta ninguna restricción, ya que es libre de poder girar los 45 grados perfectamente. El radio de giro, como se puede ver también en la misma imagen, será en total de 30 milímetros, los cuales 20 milímetros se piensan que pertenecerán a la propia muñeca del usuario, 5 milímetros serán del velcro que se adherirá en la pieza y los otros 5 milímetros serán del grosor de la propia pieza. Con todo esto, se puede observar que dicho giro resultará en un recorrido de 45'922 milímetros, los cuales son más que suficientes para recoger el pulgar, que es el dedo limitante.

6.8. Palma (versión 1)

Para el diseño de la palma, se opta por un diseño estético robótico simple basado en un videojuego, como es el que se muestra en la imagen de abajo. Parece un diseño que puede gustar generalmente a los usuarios y encaja a la perfección con las ideas que se comentarán posteriormente.

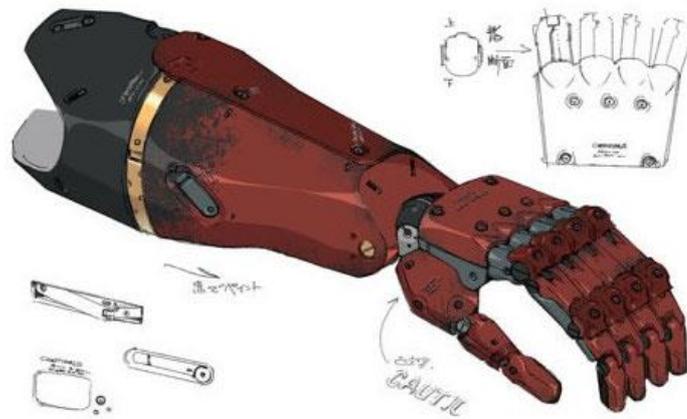


Ilustración 38. Bocetos prótesis videojuegos

Esta es una palma relativamente más pequeña, que se adaptará mejor al usuario, ya que este generalmente no tendrá mucha fracción de mano, por lo que no necesitará mucho espacio hueco de palma. Por otra parte, este diseño es compatible al de las falanges y se adaptarán de forma que el sistema de enganche sea más sencillo, además de poder ser aprovechado para incluir correctamente el sistema elástico para que quede todo perfectamente dispuesto y ocultado para una versión más estética. En la imagen siguiente se puede observar cómo la palma se complementa con una fracción de las falanges que van unidas a ella. Por comodidad de montaje y fabricación en impresión 3D se tratará de dos partes diferenciadas unidas de la misma manera que entre las partes de las falanges.

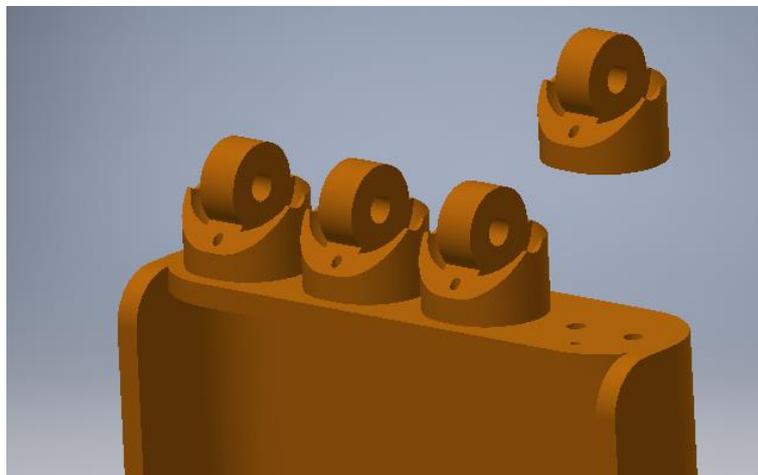


Ilustración 39. Modelo 3D palma y unión dedos palma

El problema surge con la salida de cables tensores en la parte dorsal, ya que, como ocurría en las falanges, se producen unos concentradores de tensiones en los agujeros por donde pasan los hilos tensores y esas zonas críticas se fragilizan y se cortan fácilmente. La solución que se ha propuesto y que se ajusta bien a la idea inicial es incluir un sistema de remaches que recubren los agujeros con un material más resistente evitando así el desgaste y en los agujeros pequeños reforzarlos con aros metálicos.

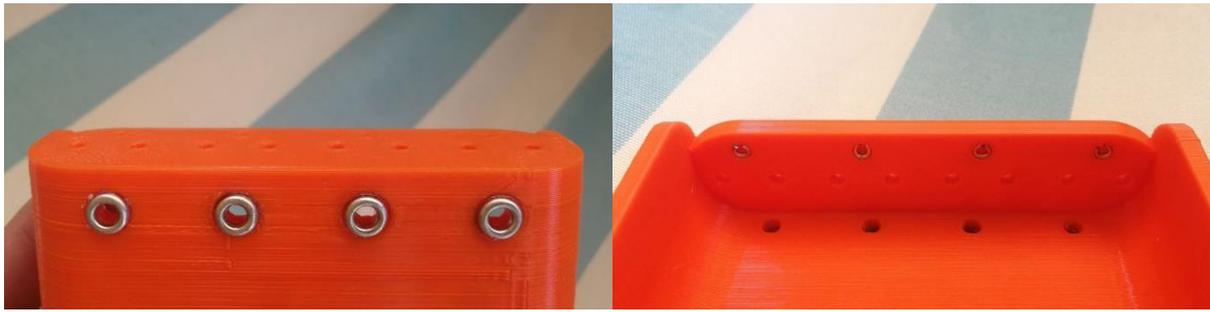


Ilustración 40. Protecciones para evitar el desgaste

En la imagen superior se puede observar los agujeros reforzados por donde pasarán los cables tensores, por otra parte, se puede ver los otros ocho agujeros correspondientes a las hembras por donde pasarán los machos que fijarán los dedos con la parte de la mano.

6.9. Pulgar (versión 2)

Como ya se ha comentado, se tratará de mantener estrictamente el diseño del pulgar similar al de las falanges. Asimismo, se creará un sistema de giro del pulgar en su unión con la palma, debido a que mantener el pulgar fijo limitaría mucho el movimiento de la mano. Para ello, se ha proyectado 3 formas distintas de girar y desplazar el pulgar.

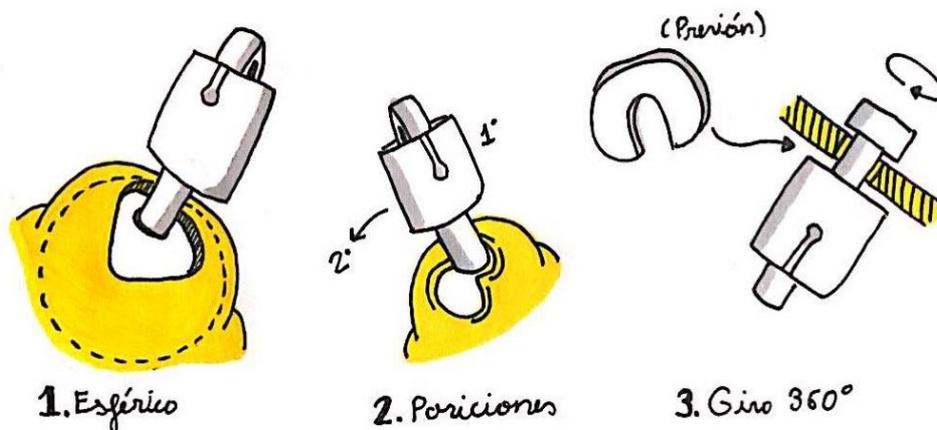


Ilustración 41. Tipos de giro pulgar

Como se ve en la **Ilustración 41**, el primer modo consta de realizar una pequeña esfera hueca con una abertura circular en la zona de la carcasa donde se pondrá el pulgar, en la cual este podrá moverse libremente. La complejidad de este reside en que habría que idear un método que consiguiese bloquear el dedo de manera fácil, el cual no se ha podido desarrollar por limitación de tiempo, por lo que este no será el que se utilizará.

El sistema número 2 es parecido al anterior, pero en lugar de tener una abertura circular donde el pulgar se puede mover libremente, en este la abertura tendría una forma de 8, en la que el dedo podría desplazarse solo en dos posiciones, como si de una caja de cambios con solamente dos marchas se tratase. Al ser tan limitado el posicionamiento del pulgar, se desecha esta opción.

El tercer y último estilo es el que se usará para este proyecto y se trata de un conjunto de pequeñas piezas que, acopladas entre sí, se consigue elaborar un sistema de giro del pulgar de 360 grados con un bloqueo sencillo en cualquiera de las posiciones en las que se encuentre. Para poder explicar el procedimiento, se ha de conocer las partes que componen el dedo:

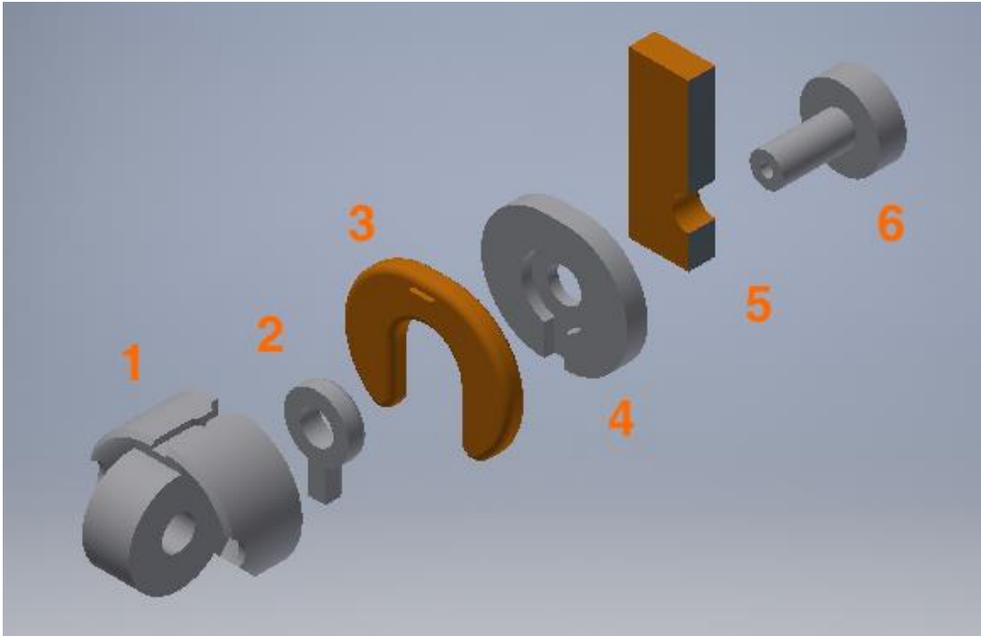


Ilustración 42. Despiece sistema de giro pulgar

1. Base pulgar. Es el elemento donde se apoyará la estructura del dedo pulgar. Es una media falange que sirve como unión del sistema de giro del dedo y las falanges del propio pulgar.
2. Soporte pulgar. Es fundamental para la existencia de giro y bloqueo del dedo. Es el elemento de unión de los elementos 1 y 6, estos irán adheridos con pegamento.
3. Anillo presionador. Es el componente que determinará el bloqueo y liberación del pulgar. Cuando este se introduzca en el sistema, el dedo pulgar quedará completamente inmobilizado, gracias a un pequeño relieve que hace como tope y se engancha en el agujero del sistema elástico. En cambio, cuando este se extraiga, el pulgar quedará libre para poder ser cambiado de posición.
4. Trozo pulgar. Esta pieza es la que, en posición libre del pulgar, irá acoplada en el elemento 2 (soporte pulgar), de esa forma es como el dedo podrá rotar. Como se puede observar en la imagen, tiene una pequeña hendidura que encaja con el bulto del soporte del pulgar. Cuando el anillo presionador se introduzca entre ambos elementos, se produce el desacoplamiento para que el dedo no gire. Cabe destacar que, en el lado contrario a la abertura mencionada, se pegará caucho de nitrilo para que aumente su coeficiente de fricción al realizarse el bloqueo, lo cual acentúa una de las ventajas que tiene esta pieza, ya que incluir un material de fricción en el propio anillo presionador haría que se dificultase la introducción de este. De esta manera, el elemento 3 entra y sale deslizándose fácilmente mientras que el 4 es el encargado de proporcionar rozamiento.
5. Carcasa mano. Sirve visualmente para imitar el grosor que tiene la carcasa de la palma.

6. Eje pulgar. Es el eje de giro, por donde pasa el hilo tensor. Este tiene que pasar por el centro de la pieza para que durante el giro no se modifique la distancia de cerrado que debe hacer el dedo pulgar. Sin embargo, esto ocasiona 3 giros bruscos en la trayectoria del cable, por lo que es necesario reforzar los agujeros por donde se producen estos, en la **ilustración 43** se puede observar dónde están situados. En el lado que toca la carcasa de la palma también se pega caucho de nitrilo, por la misma razón que se hace en la pieza 4.

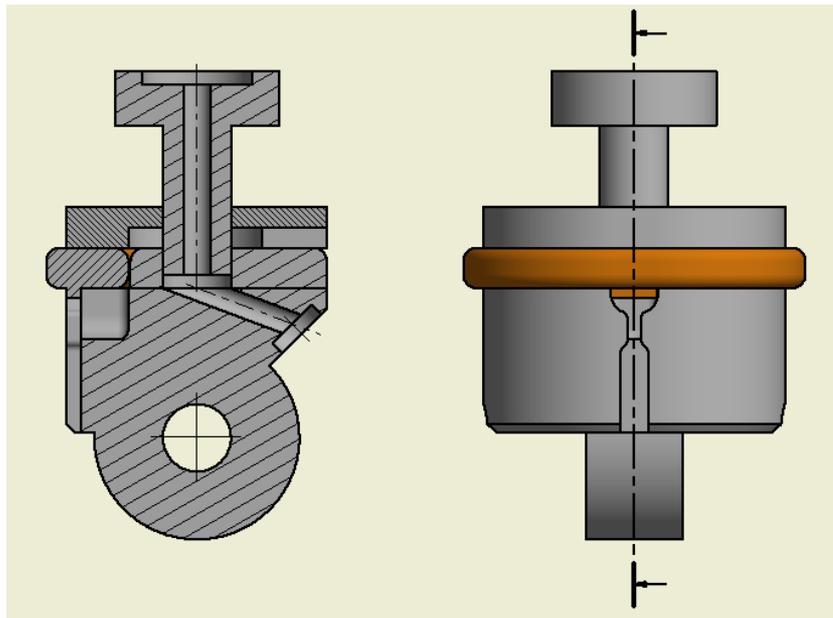


Ilustración 43. Vistas y corte sistema de giro pulgar

6.10. Palma (versión 2)

En esta segunda versión se incluyen nuevos sistemas que mejoran el funcionamiento del conjunto de la prótesis. Estos son tres:

Primero, es un elemento que recoge los cables y los concentran un poco más para que a posteriori pueda pasar por la zona plana del antebrazo, que es más estrecha, ya que por los laterales presenta curvaturas que no son apropiadas para el paso y distancias de las cuerdas. Consiste en una pequeña pieza que tiene 5 agujeros reforzados por los cuales atravesarán los 5 hilos tensores, uno por cada dedo. Por imposibilidad de impresión en 3D de forma conjunta a la palma, esta se hace de forma independiente y se adhiere con un fuerte pegamento a ella.

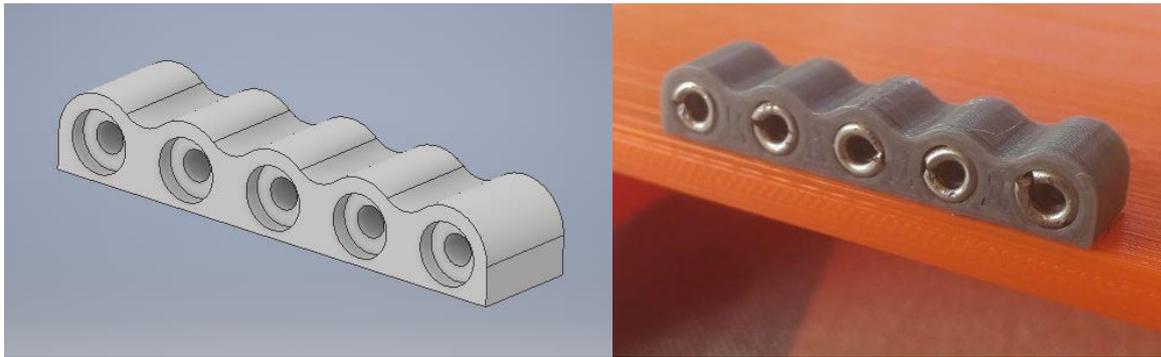


Ilustración 44. Soporte cables modelado y real

El segundo es un sistema de bloqueo de dedos, directamente realizado en la palma. Este consta de 4 agujeros con pequeñas fisuras intencionadamente orientadas en la dirección que irán los cables. Estos servirán para inmovilizar los hilos tensores de los dedos, exceptuando el pulgar que no se puede bloquear. De forma que, si el usuario desea mantener cerrado algún dedo, solo tiene que introducir el cable tensor anudado a una bola en los agujeros mencionados cuando el dedo está recogido completamente.

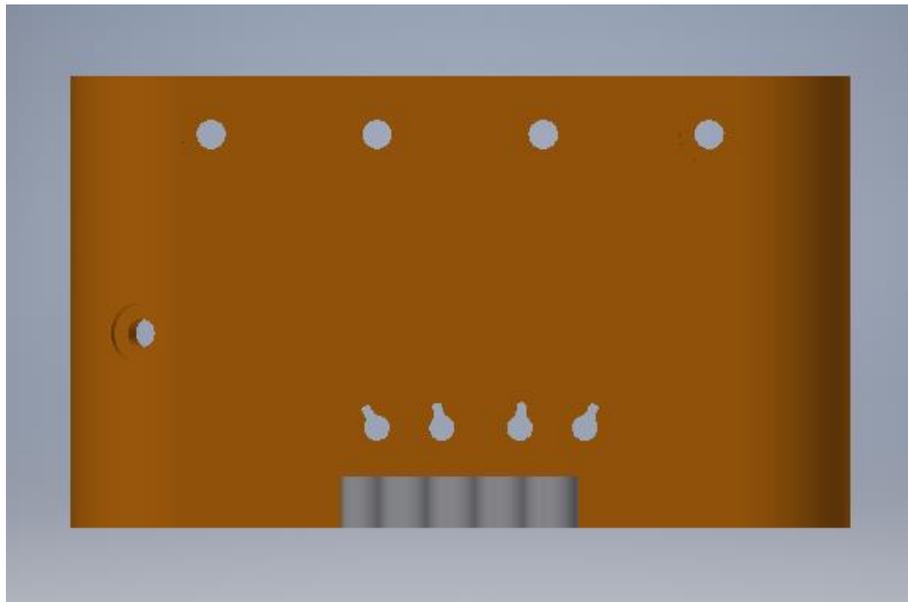


Ilustración 45. Sistema de bloqueo dedos

Por último, se crea un soporte para el eje impreso también independientemente de la palma, dado que era excesivamente complicado que se imprimiese bien de forma conjunta y porque es anisótropo (por imprimirse en 3D), al estar teniendo en cuenta que la unión de la palma con el antebrazo estará sometida a esfuerzos de tracción. Por tanto, se ha realizado una pequeña pieza que servirá de soporte del eje rotativo de la unión que además es mucho más resistente. Se unirá a la palma mediante pegamento y con el uso de agujeros y machos como guía.

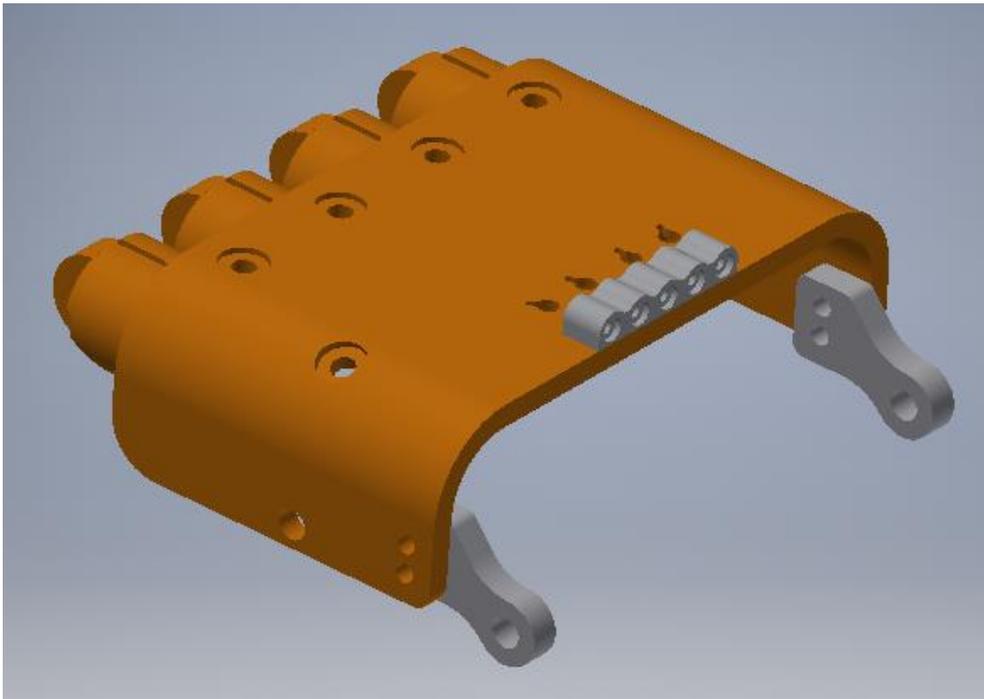


Ilustración 46. Palma modelada completa

6.11. Antebrazo (versión 1)

Se ha realizado una pieza cuyo diseño es envolvente al antebrazo y que es una parte esencial del sistema de movimiento de la mano. Esta va unida a la palma, como se ha explicado recientemente, mediante un soporte de eje, el cual tiene cierto grado de apriete con el antebrazo y juego con la palma. Esto último junto con el hecho de que el elemento del antebrazo posee algo de flexibilidad hacen que esta pieza sea fácilmente desmontable.

Presenta también cinco agujeros para que sirvan de guía y controle la distancia “dm” de la Ilustración 26 del trabajo. Además, de esta forma los hilos no tocarán el antebrazo del usuario, evitando posibles irritaciones en la piel. Estos cables deben ir sujetos al principio y al final de la pieza. Los pequeños orificios no necesitan refuerzo ya que no existe desplazamiento de hilos, tan solo sirve para orientarlos.

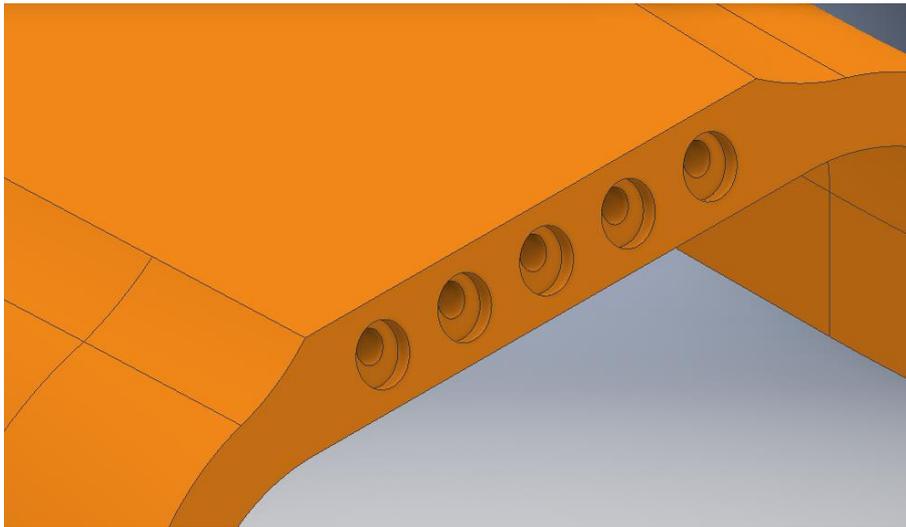


Ilustración 47. Agujeros guía antebrazo

Para la fijación de los hilos se ha pensado en dos posibles modos: el primero es mediante un tornillo que ajusta de forma más precisa la fuerza que realizar al hilo tensor, aunque también es más costosa, ya que es imprescindible el uso de un destornillador cada vez que se desee modificar la tensión. El segundo es el que se va a imponer en el sistema, el cual consiste en la disposición de pequeñas bolas que se incorporarán en el propio cable y servirán como tope al querer cambiar la fuerza tensora de los hilos, un método similar al de un cinturón, mucho más rápido, eficiente y simple.

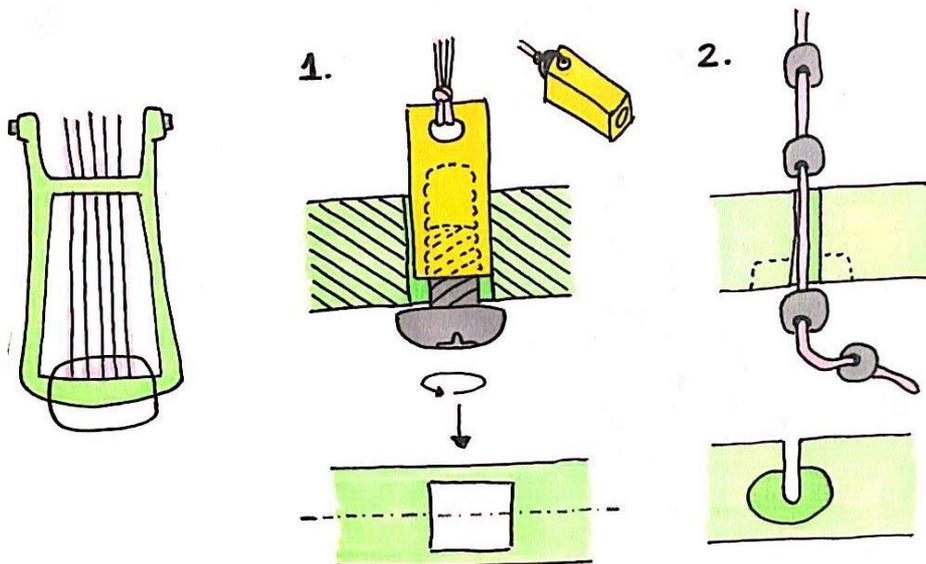


Ilustración 48. Sistemas de enganche cable tensor antebrazo

Además, se puede observar que tiene una parte de la pieza sin imprimir, es decir, que está destapada al aire, cuyas funciones residen en la ventilación del antebrazo y en el ahorro de material que se debe imprimir. Por otra parte, cabe señalar que la longitud de esta pieza va concorde al trozo de antebrazo que produce cierto grado de giro, es decir, que se ha medido la zona del antebrazo donde se produce

una considerable rotación (señalado en Ilustración 8) y esa es la medida longitudinal que se ha usado para la pieza.

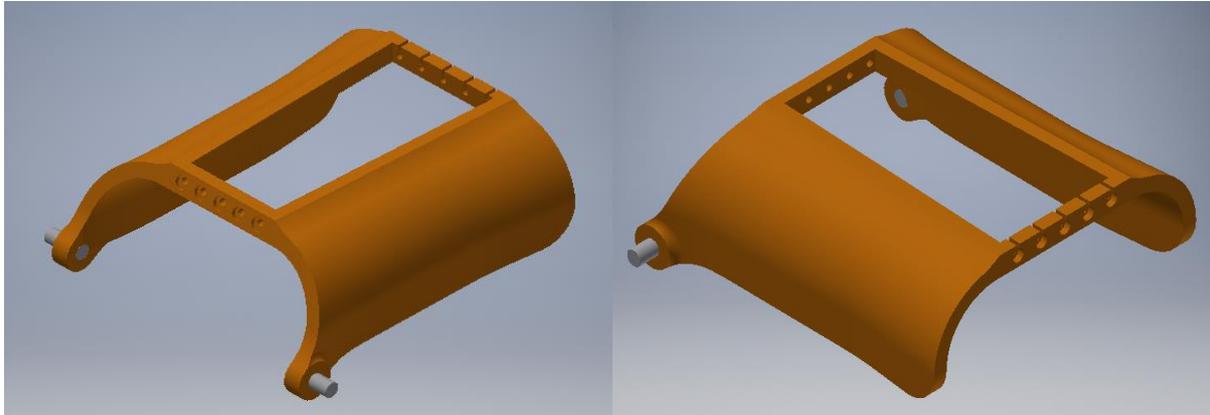


Ilustración 49. Antebrazo modelado completo

6.12. Agarre (versión 2)

Como ya se ha comentado en la versión 1 de este apartado, tras elaborar la mano impresa con los dedos, surge la necesidad de pegar material con rozamiento para mejorar el agarre de la prótesis, ya que el material plástico de la impresión 3D tiene poco coeficiente de fricción. Es un procedimiento fácil de realizar y tiene la ventaja de reducir considerablemente el esfuerzo que debe hacer el usuario.

Como posibles materiales que se implementarán se ha escogido:

- Caucho de nitrilo liso: utilizado en guantes para obtener un buen agarre.
- Caucho de nitrilo rugoso: es similar al caucho de nitrilo liso con la diferencia de que se puede usar también en ambientes húmedos. Imita la función de la huella dactilar.
- Papel de lija: Este tiene un alto grado de fricción y se obtienen resultados favorables con los materiales blandos. No obstante, daña las superficies duras y es propenso a irritar la piel.
- Goma EVA: Es blanda por lo que aumenta la superficie de contacto, lo cual es beneficioso, y fácil de conseguir.

Para conocer cuál es el más conveniente para este proyecto, se procede a realizar una serie de ensayos experimentales para observar hasta dónde puede llegar el agarre de cada uno de ellos y decidir con más seguridad el que mejor se adapte. La prueba consiste en los siguientes pasos:

1. Recortar dos trozos de uno de los materiales recién comentados con superficies aparentes iguales y adherirlos en ambas partes del extremo de una pinza.
2. Atar la pinza en algún soporte rígido que sea capaz de soportar al menos un peso de alrededor de 1 kilogramo.
3. Pinzar una fracción de material blando que se unirá a una botella vacía de unos 500 mililitros.
4. Llenar la botella con agua poco a poco hasta que esta se caiga y observar cuánta se ha introducido.
5. Repetir los pasos 3 y 4 pero con un material duro en lugar de blando.
6. Repetir todo el proceso con otro de los materiales adherentes escogidos.



Ilustración 50. Ensayos de materiales de fricción

Los resultados han sido los siguientes (siendo 1 el material que más peso ha aguantado y 4 el que menos):

	Caucho liso	Caucho rugoso	Papel de lija	Goma eva
Material duro	1	2	3	4
Material blando	2	3	1	4

En conclusión, para los materiales blandos sería mejor el papel de lija, pero por los problemas ya comentados, se descarta. La opción de la goma eva es la que peor ha funcionado en ambos ensayos, por lo que también se desecha. Aparentemente, el caucho liso parece la mejor solución. No obstante, se ha recapacitado la posibilidad de que el usuario pudiera agarrar objetos en ambiente húmedo como, por ejemplo: fregar platos, ducharse, etc. Por tanto, se ha decidido que la mejor alternativa es la del **caucho de nitrilo rugoso**. Además, este material reacciona ante las pantallas táctiles, algo ventajoso para la tecnología de hoy en día, ya que se hace mucho uso de smartphones, tablets, etcétera.

Tras conocer qué material se va a usar, se procede a investigar en qué zonas de la mano conviene más pegar el material. Se estudia que las franjas donde se colocará el caucho rugoso son: en el sistema de enganche de usuario-prótesis para poder coger los objetos, en todas las partes interiores de los dedos, en el sistema de giro del pulgar para evitar deslizamientos y en el lateral de la palma contrario al pulgar para poder apoyarse sobre el papel y facilitar la escritura.

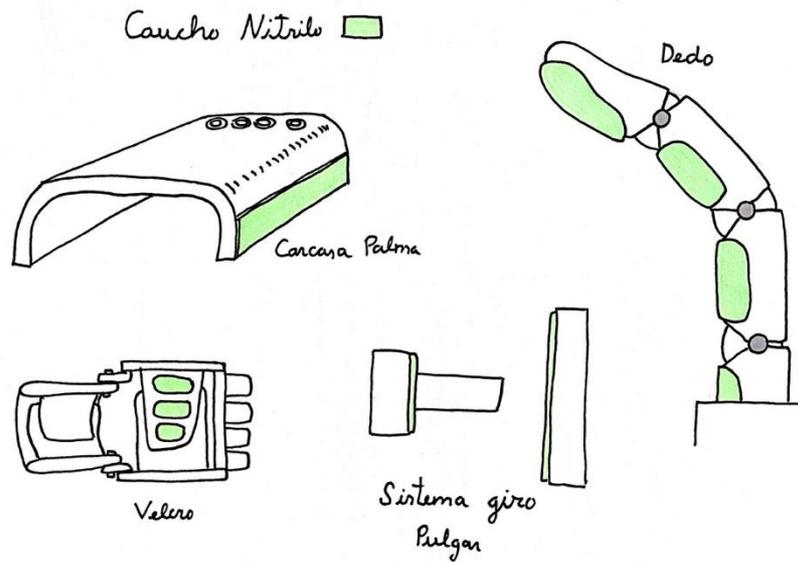


Ilustración 51. Zonas con necesidad de agarre

7. Sistema de agarre usuario-prótesis

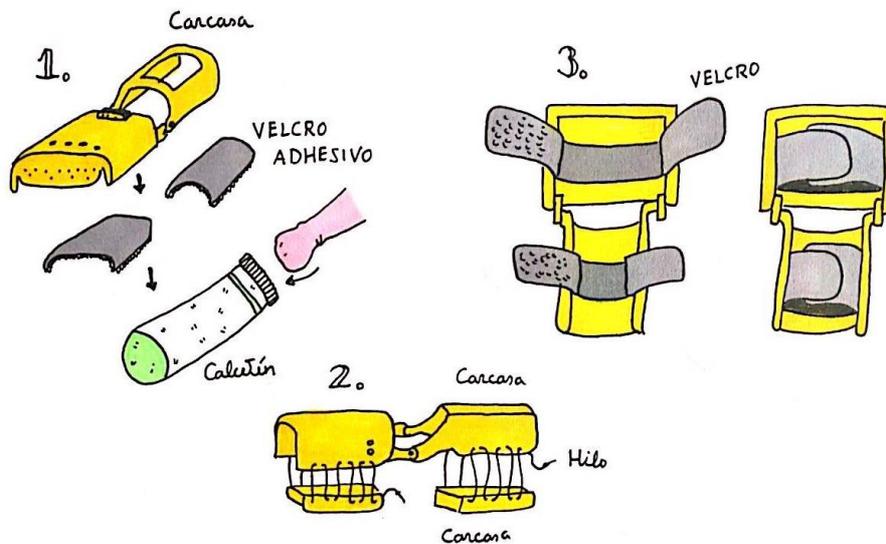


Ilustración 52. Opciones enganche prótesis

Finalmente, para vincular la prótesis con el usuario, se debe examinar cuál podría ser la mejor forma tanto técnicamente como estéticamente. Para ello, se ha ideado tres distintas formas que podrían servir. Como se puede ver en la imagen, la primera de ellas consiste en pegar un velcro adhesivo, con el que la cara del pegamento irá unida a la carcasa y la del velcro se anexará con un calcetín que se debe poner el usuario para no irritarse la piel. Las desventajas de este método es que el calcetín proporcionará mucho calor al usuario y se corre el riesgo de que este se escurra y se suelte fácilmente ante cualquier esfuerzo de agarre de un objeto.

El segundo modo es unir la carcasa con otras piezas que se dispondrían en el lado contrario del antebrazo y palma para luego unificarlos mediante un hilo, un procedimiento similar al de atar un zapato. Las desventajas que presentan son: el uso de más material de impresión (más plástico), molestias para el usuario ya que es más incómodo y poca transpiración, lo cual produce calor y sudoración.

La tercera y última forma es incluir dos velcros similares a los que se usan generalmente en el calzado deportivo infantil, uno para la palma y otro para el antebrazo. Así se mantiene independiente, es más estético, se puede ajustar como el usuario desee, y también es más fácil de manejar, quitar y poner. Además, es el que menor calor produce, ya que permite más ventilación que las demás opciones. Por tanto, este será el sistema que se utilizará para este proyecto.

8. Diseño impreso en 3D

En las siguientes imágenes se mostrará el resultado final de la prótesis ya montada con sus piezas impresas en 3D, con el sistema de cables tensores de Nylon, las gomas de caucho y con el pegado de los remaches y arandelas metálicas.



Ilustración 53. Prótesis mano montada: vista 1



Ilustración 54. Prótesis mano montada: vista 2



Ilustración 55. Prótesis mano montada: vista 3



9. Conclusiones

Tras el montaje de la mano al completo, se puede ver que funciona bastante bien. Se produce con éxito la apertura y cierre de la mano. Cumple con las funciones básicas de agarre esperadas. Se ha realizado varias pruebas con los diferentes tipos de acciones rutinarias con buen resultado. Además, se ha probado también que el caucho de nitrilo rugoso funciona correctamente en las pantallas.

El trabajo en general ha sido más complicado de lo esperado, ya que la mano es un órgano cuyo sistema se ha ido perfeccionando durante siglos de evolución e imitarlo es prácticamente imposible. Cabe destacar el diseño del sistema de giro del pulgar, el cual ha costado más de lo que se podía imaginar, debido a su mecanismo complejo distintivo, por el recorrido del cableado y el logro de agarres funcionales.

La complejidad de este proyecto se basa en que cada una de las decisiones que se han tomado tiene una razón, es decir, que se ha intentado seguir métodos lo más físicos y técnicos posibles. A pesar de no haber numerosos cálculos justificativos, se ha tratado de buscar el respaldo teórico en todo momento, por lo que cada diseño ha sido meditado lo máximo posible.

Por otra parte, han surgido problemas e imprevistos como es la situación actual de la COVID-19, lo cual ha derivado en desconocer dónde y cómo se podría imprimir el trabajo (porque en los laboratorios de la Universidad no se podía), lo cual implica un retraso y dificultad en la organización ya que se empieza a depender de una empresa externa. También, al pagar uno mismo todas las impresiones, se han tenido que realizar las justas para que no saliera demasiado caro, lo cual limitaba la posibilidad de realizar pruebas y diseños distintos. Además, la imposibilidad de desplazarse durante el confinamiento hacía que se debía tener autonomía con lo que hubiese en la propia casa, sin contar con las tecnologías de la Universidad. En general, todos estos factores han limitado mucho más el tiempo que se tenía para el desarrollo del proyecto.

Por ello, existen varias mejoras que se podrían implementar a este trabajo, como son: buscar un sistema de cálculo de movimientos (siendo necesarias las mediciones y pruebas en un laboratorio), desarrollar más las posibles opciones ya comentadas sobre el sistema de movimiento (que no ha podido ser por falta de tiempo), realizar pruebas con el uso de gomas de carpeta (con recubrimiento de tela, por lo que son más resistentes) para ampliar su vida útil elástica, etc. El desarrollo de estas se podría incluir en otro proyecto, como puede ser en el Trabajo Fin de Máster.

Sin embargo, cabe destacar que se ha aprendido mucho con la realización de este Trabajo Fin de Grado, ya que tiene un carácter multidisciplinar, englobando los campos de la mecánica, física, impresión 3D, biología, dibujo, materiales, etcétera. Por no mencionar el progreso que se ha tenido con el uso de programas como Autodesk Inventor e incluso el Microsoft Office Word durante la redacción de la memoria.



10. Bibliografía

Gómez-Senent Martínez, Eliseo (2009). *Fundamentos del diseño en la ingeniería*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

3D natives (2020) *Guía completa: Los softwares de impresión 3D*. Recuperado el (16/6/20), de <https://www.3dnatives.com/es/guia-programas-softwares-de-impresion-3d/#!>

Impresoras3D.com (2018) *Guía definitiva sobre distintos filamentos para impresión 3D*. Recuperado el (16/6/20), de <https://www.impresoras3d.com/la-guia-definitiva-sobre-los-distintos-filamentos-para-impresoras-3d/>

Jennifer Bourabah (2020) *PLA vs ABS: comparación de filamentos para impresión 3D*. Recuperado el (16/6/20), de <https://all3dp.com/es/1/pla-vs-abs-comparacion-impresion-3d/>

Triesfera (2018) *Cómo elegir el relleno más adecuado para tus impresiones*. Recuperado el (17/6/20), de <https://www.triesfera.com/como-elegir-relleno-impresion-3d/>

Baraza, J.C. (2020) *Tema 3: Impresión 3D*. Manuscrito no publicado, Departamento de Informática de Sistemas y Computadores, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Comunidad Valenciana.

Villatoro, F.R. (2009) *Para qué sirven las huellas dactilares de los dedos de las manos*. Recuperado el (18/6/20), de <https://francis.naukas.com/2009/04/07/para-que-sirven-las-huella-dactilares-de-los-dedos-de-las-manos/#:~:text=Para%20qu%C3%A9%20sirven%20las%20huellas%20dactilares%20de%20los%20dedos%20de%20las%20manos,-Por%20Francisco%20R&text=Han%20medido%20la%20sensibilidad%20a,superficie%20que%20se%20pueden%20percibir.>

Directorio forense (2020) *¿Por qué tenemos las huellas dactilares y para qué nos sirven?* Recuperado el (18/6/20), de <https://directorioforense.com/index.php/2020/01/11/por-que-tenemos-huellas-dactilares-y-para-que-nos-sirven/>

EsMachina (2020) *Prótesis de la mano en la actualidad*. Recuperado el (19/6/20), de <https://www.esmachina.com/que-es-protesis-de-mano-tipos-y-precios/>

Dianceht (s.f.) *Lista de precios*. Recuperado el (19/6/20), de <http://www.manosydedos.com/precios.html>

O&P (s.f.) *Aspectos psicológicos de la amputación*. Recuperado el (19/6/20), de <http://www.oandplibrary.org/reference/protetica/LLP-02.pdf>

National Geographic (2015) *How 3-D-Printed Prosthetic Hands Are Changing These Kids' Lives | Short Film Showcase*. Recuperado el (19/6/20), de



<https://www.youtube.com/watch?v=Cl8ijPGEKO8&t=66s>

Makerbot (2013) *MakerBot and Robohand | 3D Printing Mechanical Hands*. Recuperado el (19/6/20), de

<https://www.youtube.com/watch?v=WT3772yhr0o&list=PLYpgBmHfeoFvtp4OUIa6pkJ4G1zX2lJH&index=6&t=0s>

Christoffer Lindhe - Triple Amputee (2018) *All my Arm Prosthetics by Triple Amputee*. Recuperado el (19/6/20), de

<https://www.youtube.com/watch?v=q818VbKmRDE&list=PLYpgBmHfeoFvtp4OUIa6pkJ4G1zX2lJH&index=11>

The Guardian (2018) *Beyond bionics: how the future of prosthetics is redefining humanity*.

Recuperado el (20/6/20), de <https://www.youtube.com/watch?v=GgTwa3CPrIE>

Truly (2019). *The Teen With The Bionic Arms | SHAKE MY BEAUTY*. Recuperado el (20/6/20), de

<https://www.youtube.com/watch?v=kG4eMZqppT4&t=277s>

3D Universe (2014) *A \$50 3D-Printed Prosthesis Compared to a \$42,000 Myoelectric Prosthesis (3D Universe)*. Recuperado el (20/6/20), de <https://www.youtube.com/watch?v=CHPuMCshkLU>

Prostheticsinmotion (2015) *Below The Elbow Amputee Demonstrates BeBionic 3 Myoelectric Prosthesis*. Recuperado el (20/6/20), de https://www.youtube.com/watch?v=7qR_2n5Y9Pw

Franco, A. (2016) *Fuerza de rozamiento*. Recuperado el (20/6/20), de

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/dinamica/rozamiento/rozamiento.html>

Wikipedia, la enciclopedia libre (s.f.) *Guillaume Amontons*. Recuperado el (22/6/20), de

https://es.qwe.wiki/wiki/Guillaume_Amontons#Friction



DOCUMENTO II: PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Introducción.....	1
2. Honorarios del personal.....	1
3. Amortizaciones	2
3.1. Herramientas	2
3.2. Hardware	3
3.3. Software	3
3.4. Total.....	3
4. Materiales	4
4.1. Maquetas.....	4
4.2. Prótesis mano	4
4.2.1. Impresión 3D	5
4.3. Total.....	6
5. Presupuesto total.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coste mano de obra por hora	1
Tabla 2. Horas dedicadas por el alumno	2
Tabla 3. Importe por mano de obra.....	2
Tabla 4. Importe de las herramientas.....	2
Tabla 5. Importe del hardware	3
Tabla 6. Importe del software	3
Tabla 7. Importe total de amortizaciones	3
Tabla 8. Coste de materiales de maquetas	4
Tabla 9. Coste de materiales de prótesis de mano.....	4
Tabla 10. Presupuesto piezas impresas 3D	5
Tabla 11. Coste real de materiales de la prótesis.....	5
Tabla 12. Coste total de materiales	6
Tabla 13. Presupuesto total del proyecto	6

1. Introducción

En el presente documento se mostrará el presupuesto del Trabajo Fin de Grado.

Primero se reflejarán los honorarios del personal, obteniendo el coste de la mano de obra que se tiene tras las horas dedicadas, tanto por el alumno al realizar este trabajo como por la tutora para las indicaciones, dudas, etcétera.

Asimismo, se comentará las amortizaciones que se tienen con el uso de herramientas, hardware y software en función de la vida útil que tenga cada componente.

Por otra parte, se incluirán también los costes materiales, es decir, todos los gastos de los elementos físicos que conforman la prótesis de mano.

Finalmente, se sumarán todos los apartados mencionados para obtener el precio total, incluyendo los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA en sus correspondientes tipos de presupuesto.

2. Honorarios del personal

Para obtener el coste del personal, hará falta realizar algunas estimaciones en cuanto al sueldo que tiene cada ingeniero. El alumno será considerado como un ingeniero técnico en prácticas, lo que supone un sueldo anual de unos 20.000 €/año. En cambio, la profesora, que es una ingeniera industrial, se estima un sueldo de 50.000 € al año. Además, conociendo que al año hay 250 días laborables y se trabajan 8 horas diarias, se tiene que:

$$50.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{250 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 25\text{€/h}$$

$$20.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{250 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 10\text{€/h}$$

En resumen:

	Coste (€/h)
Ingeniera industrial	25
Ingeniero técnico en prácticas	10

Tabla 1. Coste mano de obra por hora

Sabiendo el coste por hora que supone cada personal, se obtienen las horas dedicadas al trabajo. En el siguiente cuadro se muestran desglosadas en función del tipo de trabajo que se ha estado realizando:

	Horas dedicadas (h)
Diseño del producto	207
Modelado a ordenador	83
Realización de planos	16
Montaje mano	8
Realización memoria	62
Reuniones y dudas	18
Total	394

Tabla 2. Horas dedicadas por el alumno

Cabe destacar que las horas dedicadas por la tutora (ingeniera industrial) son las correspondientes a las reuniones y dudas. De esta forma, el importe por mano de obra es el siguiente:

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Importe (€)
h	Ingeniera industrial	18	25	450
h	Ingeniero técnico en practicas	394	10	3940
	Total			4390

Tabla 3. Importe por mano de obra

3. Amortizaciones

A continuación, se reflejarán las amortizaciones por el uso de algunas herramientas, hardware y software para la elaboración de la prótesis. Para ello, se estimará la vida útil que tiene cada componente, el tiempo que se ha usado para este trabajo y el precio que tiene en el mercado para adquirirlo. Con ello, se hará una regla de tres para obtener el importe que supone, es decir, este se saca dividiendo el precio por la vida útil y multiplicando por el tiempo de uso.

En la siguiente tabla se muestran los instrumentos físicos utilizados para el montaje de la prótesis:

3.1. Herramientas

Descripción	Precio (€)	Vida útil (años)	Tiempo uso (días)	Importe (€)
Martillo	23,26	15	3	0,01
Lija fina de metal	13,4	10	8	0,03
Alicates	23,2	20	4	0,01
Alicates corte	29,8	15	4	0,02
Cúter	11,19	5	13	0,08
Cúter cuchillas	1,8	0,3	13	0,21
			Total	0,37

Tabla 4. Importe de las herramientas

En los siguientes apartados se comenta la tecnología usada para realizar todo el trabajo como es el portátil y los programas que se han tenido que manejar para poder llevar a cabo el diseño del proyecto.

3.2. Hardware

Se considera que el portátil tendrá una vida útil de 11 años, ya que ha estado en uso 7 años y se estima que le quedan alrededor de 4 años.

Descripción	Precio (€)	Vida útil (años)	Tiempo uso (días)	Importe (€)
Portátil	699	11	90	15,67
Total				15,67

Tabla 5. Importe del hardware

3.3. Software

Los programas utilizados son proporcionados de manera gratuita por la Universidad Politécnica de Valencia para los alumnos. No obstante, se han incluido también para elaborar un presupuesto más real de los costes que se han consumido. Buscando los precios que tienen por un año de licencia y estimando el tiempo de uso de estos, se obtiene la siguiente tabla:

Descripción	Precio (€)	Un año licencia	Tiempo uso (días)	Importe (€)
Microsoft office	69,99	1	90	17,26
Autodesk Inventor	2747	1	60	451,56
Total				468,82

Tabla 6. Importe del software

Sumando todos los apartados anteriores, se tiene un total de:

3.4. Total

Descripción	Importe (€)
Herramientas	0,37
Hardware	15,67
Software	468,82
Total	484,86

Tabla 7. Importe total de amortizaciones

4. Materiales

En este apartado se clasificarán los costes materiales que se han tenido. Se diferenciarán los elementos usados para realizar las pruebas de prótesis en las maquetas iniciales y los usados para la versión final y física de la propia prótesis de la mano.

4.1. Maquetas

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Importe (€)
ud	Cola blanca	1	2,59	2,59
ud	Palos de madera	150	0,01733	2,60
m2	Panel poliestireno extruido	2	2,06	4,12
			Total	9,31

Tabla 8. Coste de materiales de maquetas

4.2. Prótesis mano

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Importe (€)
m	Filamento de nylon	200	0,04975	9,95
ud	Gomas elásticas	80	0,013875	1,11
ud	Impresión 3D	1	216,77686	216,78
ud	Remaches	5	0,3	1,50
ud	Clips 100u	100	0,009	0,90
ud	Machos madera	50	0,0464	2,32
			Total	232,56

Tabla 9. Coste de materiales de prótesis de mano

Cabe destacar que el artículo que se describe como “Impresión 3D” en el apartado anterior (sombreado en color gris) viene desglosado a continuación por las distintas partes que tiene la prótesis. Este presupuesto se ha obtenido en base a lo que se ha pagado a una empresa externa, ya que debido a la situación de la COVID-19 no se ha podido acudir a la Universidad e imprimir lo necesario para el proyecto.

4.2.1. Impresión 3D

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio (€)	Importe (€)
Ud	Carcasa mano derecha	1	25	25
Ud	Soporte cables	1	2	2
Ud	Soporte eje muñeca	2	2	4
Ud	Carcasa antebrazo	1	25	25
Ud	Eje muñeca	2	1,50	3
Ud	Base dedos	4	3	12
Ud	Eje pulgar	1	1,50	1,50
Ud	Anillo presionador	1	2	2
Ud	Soporte pulgar	1	1,50	1,50
Ud	Trozo pulgar	1	1,50	1,50
Ud	Base dedo pulgar	1	3	3
Ud	Eje dedos	14	1,50	21
Ud	Anular e Índice medial 1/2	2	3	6
Ud	Anular e Índice medial 2/2	2	3	6
Ud	Anular e Índice proximal 1/2	2	4	8
Ud	Anular e Índice proximal 2/2	2	4	8
Ud	Corazón medial 1/2	1	3	3
Ud	Corazón medial 2/2	1	3	3
Ud	Corazón proximal 1/2	1	4	4
Ud	Corazón proximal 2/2	1	4	4
Ud	Distal dedos 1/2	4	3	12
Ud	Distal dedos 2/2	5	3	15
Ud	Distal pulgar 1/2	1	3	3
Ud	Meñique medial 1/2	1	3	3
Ud	Meñique medial 2/2	1	3	3
Ud	Meñique y pulgar proximal 1/2	2	4	8
Ud	Meñique y pulgar proximal 2/2	2	4	8
Ud	Piezas fallidas y ensayos	1	21,28	21,28
			Total	216,78

Tabla 10. Presupuesto piezas impresas 3D

	Gramos PLA	€/g	Material €
Mano completa	215	0,025715	5,53

Tabla 11. Coste real de materiales de la prótesis

La tabla 11 hace referencia al importe material que costaría llevar a cabo la prótesis impresa. Se puede ver que hay una gran diferencia respecto a lo que se ha abonado a la empresa externa, lo que hace reflexionar sobre la cantidad de gastos y amortizaciones que engloba todo el trabajo de impresión 3D.

4.3. Total

El importe total material se refleja en la siguiente tabla:

Descripción	Importe
Maquetas	9,31
Prótesis	232,56
Total	241,87

Tabla 12. Coste total de materiales

5. Presupuesto total

Ahora se obtiene el presupuesto total del proyecto. Sumando los importes parciales de cada apartado anterior, resulta el Presupuesto Ejecución Material (P.E.M.). Si se tiene en cuenta los gastos generales y el beneficio industrial, que suponen el 13% y 6% del P.E.M., se saca el Presupuesto Ejecución por Contrata. Finalmente, incluyendo el IVA (21%), deriva el Presupuesto Base de Licitación.

Concepto	Coste (€)
Honorarios del personal	4.390
Amortizaciones	484,86
Coste material	241,87
PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL	5.116,73
Gastos generales (13%)	665,17
Beneficio industrial (6%)	307
PRESUPUESTO EJECUCIÓN POR CONTRATA	6.088,90
IVA (21%)	1.278,67
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	7.367,57

Tabla 13. Presupuesto total del proyecto

Se tiene que el Trabajo Fin de Grado tiene un coste de 7.367,57 €.

(SIETE MIL TRESCIENTOS SESENTA Y SIETE EUROS CON CINCUENTA Y SIETE CÉNTIMOS).

Cabe comentar que la prótesis en sí no debe costar esto, ya que la mayor parte del importe mencionado incluye las abundantes horas de estudio que ha ejecutado el alumno para obtener el diseño de esta. Por tanto, al tratarse de un trabajo académico no remunerado, se resta el sueldo del alumno (ingeniero técnico en prácticas) y el beneficio industrial del Presupuesto de Ejecución por Contrata, lo que resulta un coste de 1.841,90€. Con IVA supondría un importe de 2.228,70€.

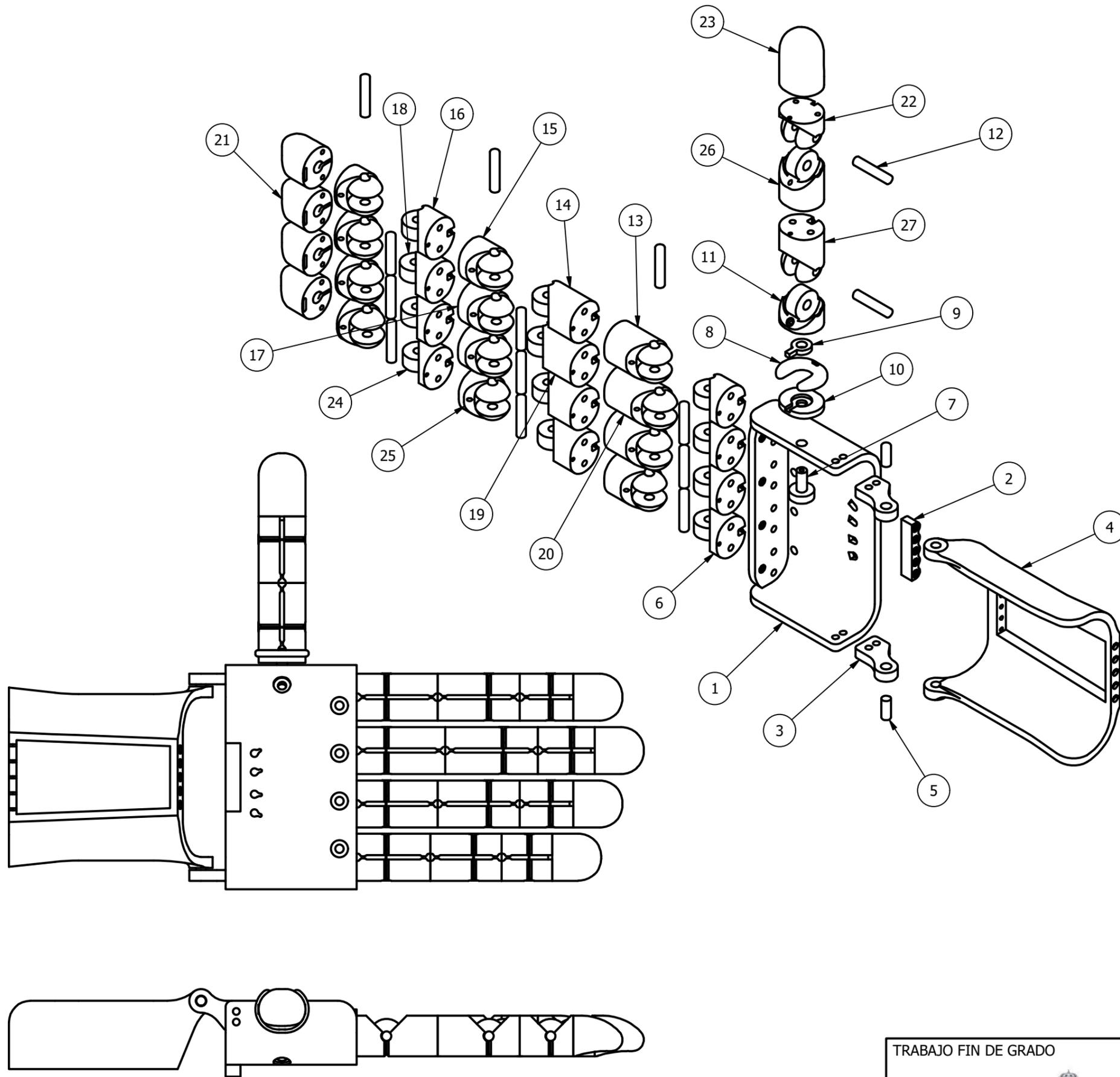
Asimismo, el trabajo se deja abierto para que cualquier usuario pueda beneficiarse de este diseño, por lo que acudiendo a una empresa de impresión 3D, únicamente tendría que pagar los gastos materiales de la prótesis, siendo estos de un importe de 232,56€.



DOCUMENTO III: PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1.	PLANO DE CONJUNTO	2
2.	PLANO PIEZA 1	3
3.	PLANO FIGURAS 2, 3, 5 Y 12	4
4.	PLANO PIEZA 4	5
5.	PLANO FIGURAS 7, 8, 9 Y 10	6
6.	PLANO FALANGE PARTE 1.....	7
7.	PLANO FALANGE PARTE 2.....	8
8.	PLANO PIEZA 10	9
9.	PLANO PIEZA 22	10
10.	PLANO DISTAL	11
11.	DISTINTOS DISEÑOS MANO IZQUIERDA Y MANO DERECHA	12



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Carcasa mano derecha
2	1	Soporte cables
3	2	Soporte eje muñeca
4	1	Carcasa antebrazo
5	2	Eje muñeca
6	4	Base dedos
7	1	Eje pulgar
8	1	Anillo presionador
9	1	Soporte pulgar
10	1	Trozo pulgar
11	1	Base dedo pulgar
12	14	Eje dedos
13	2	Anular e índice proximal 2/2
14	2	Anular e índice proximal 1/2
15	2	Anular e índice medial 2/2
16	2	Anular e índice medial 1/2
17	1	Corazón medial 2/2
18	1	Corazón medial 1/2
19	1	Corazón proximal 1/2
20	1	Corazón proximal 2/2
21	4	Distal dedos 1/2
22	5	Distal dedos 2/2
23	1	Distal pulgar 1/2
24	1	Meñique medial 1/2
25	1	Meñique medial 2/2
26	2	Meñique y Pulgar proximal 1/2
27	2	Meñique y Pulgar proximal 2/2

Escala: 1:2



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

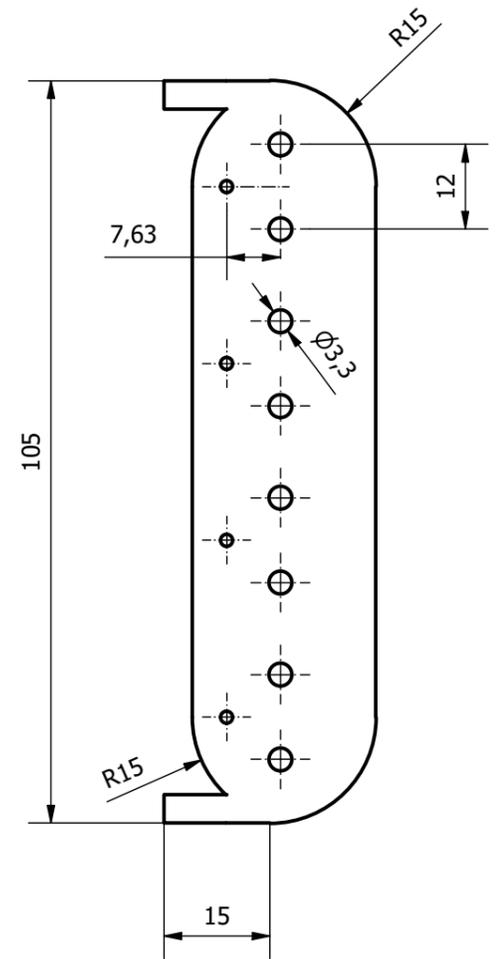
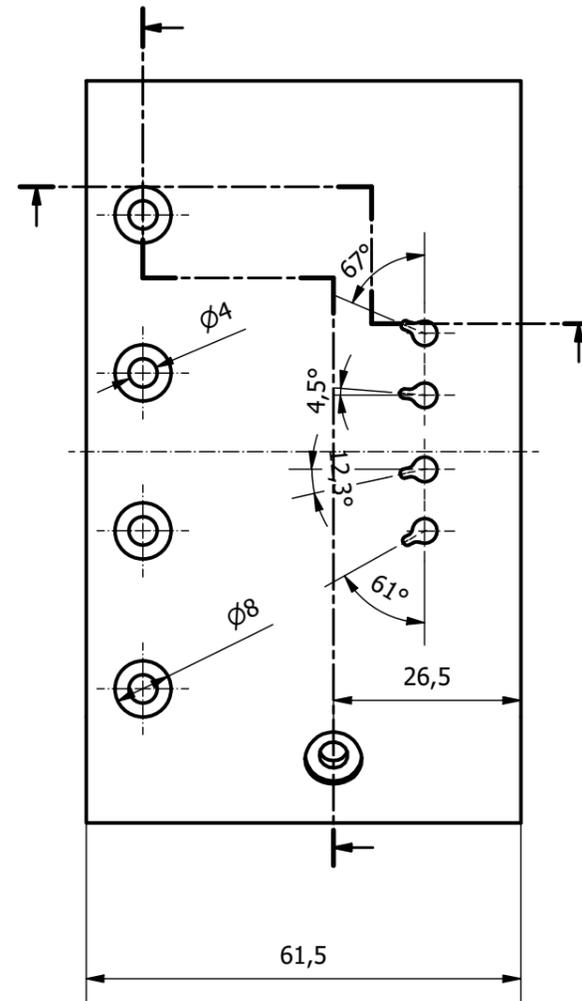
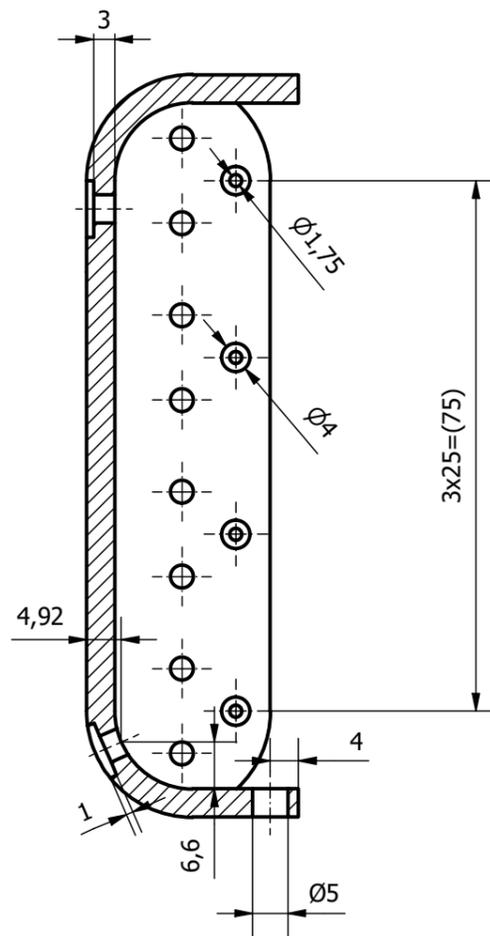
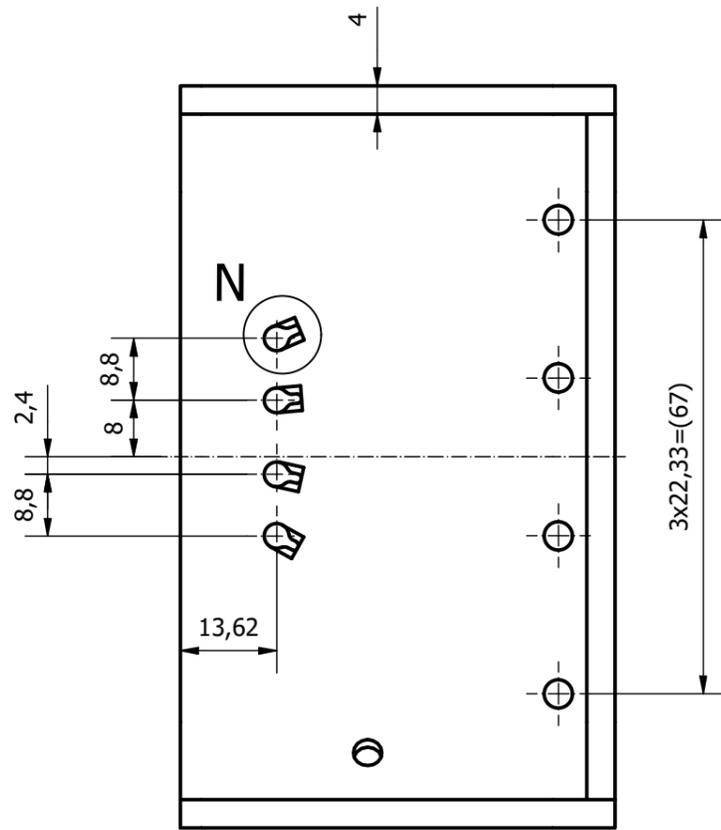
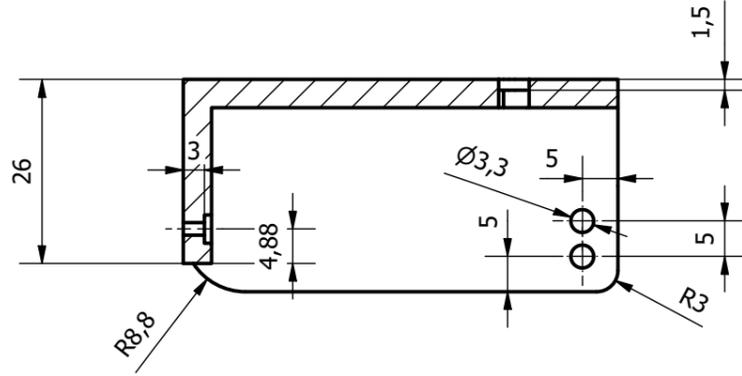
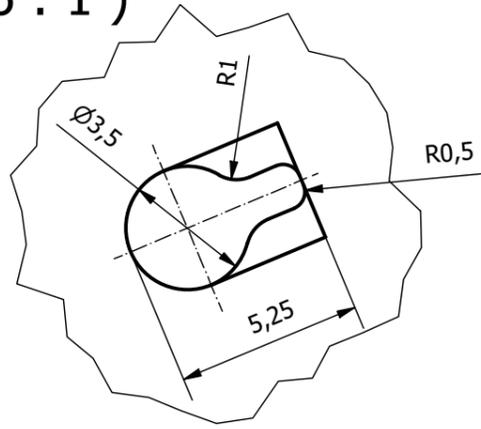
Título: Plano de conjunto

Fecha: Agosto del 2020

Autor: José Royo Bono

Página: 1/11

N(5:1)



Escala: 1:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

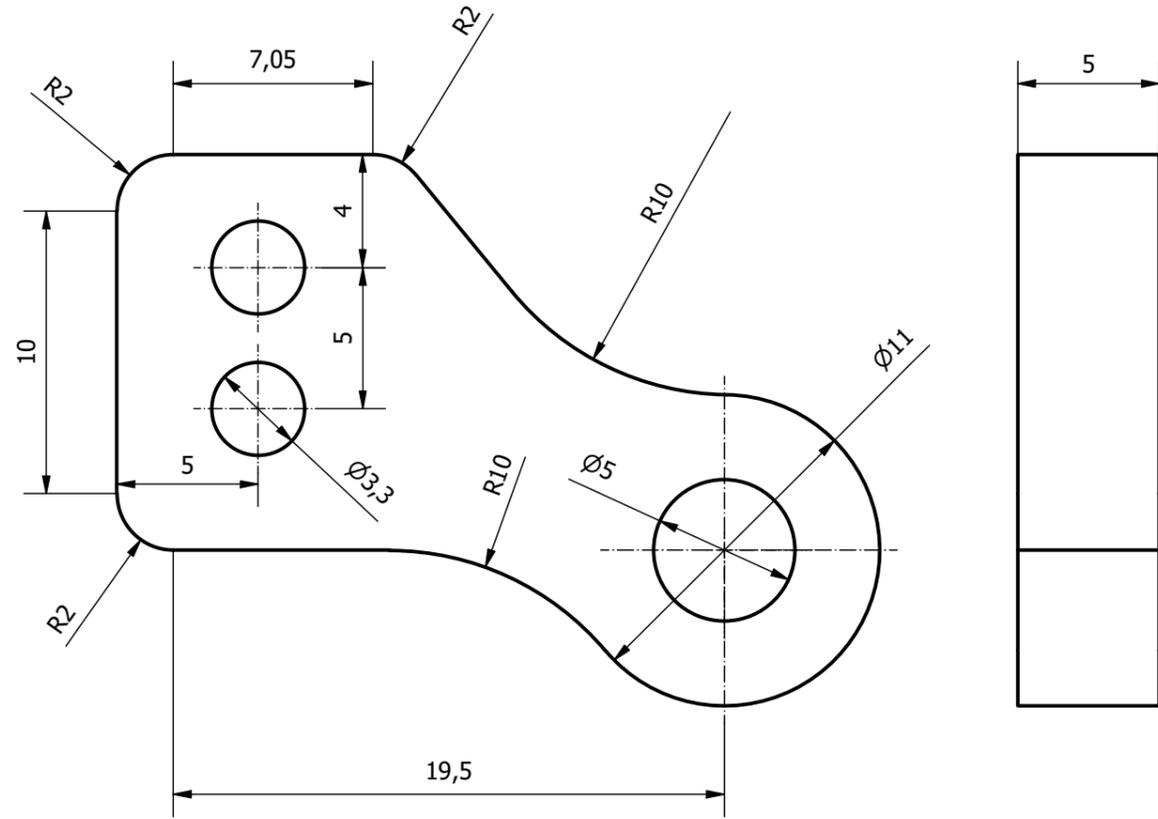
Título: Plano pieza 1

Fecha: Agosto del 2020

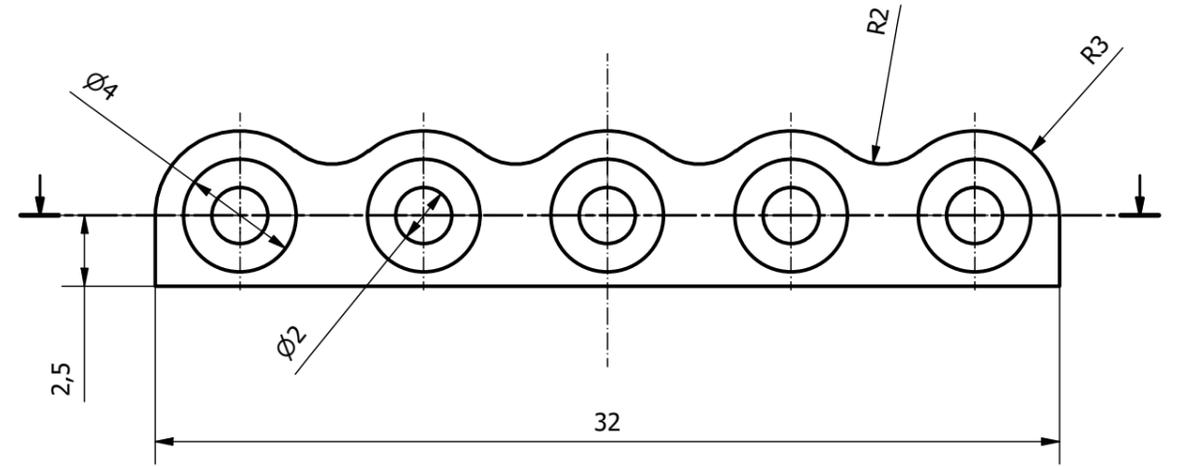
Autor: José Royo Bono

Página: 2/11

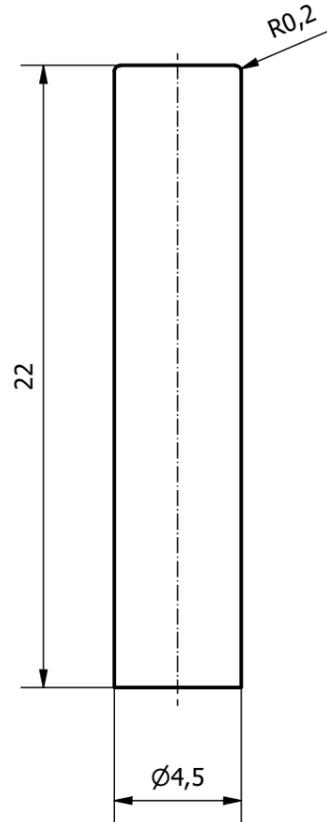
3



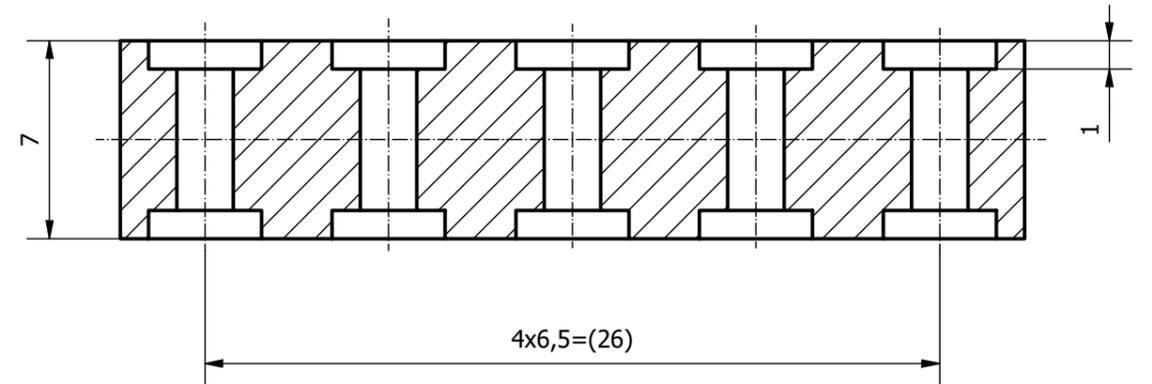
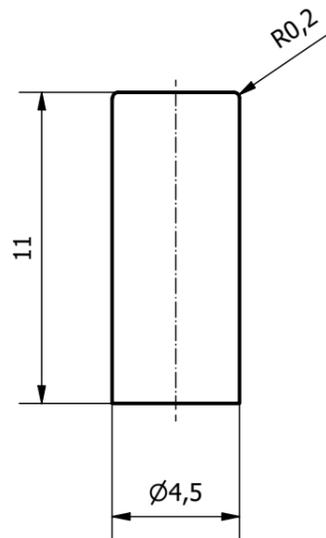
2



12



5



Escala: 4:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

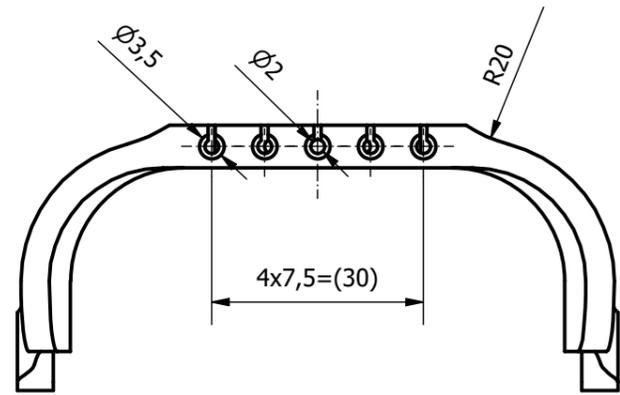
Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

Título: Plano figuras 2, 3, 5 y 12

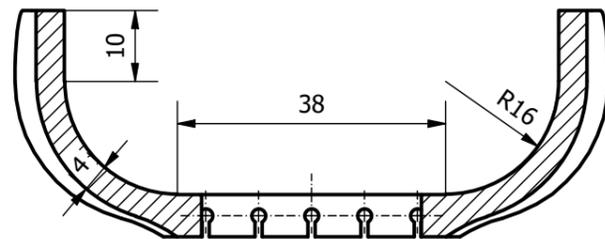
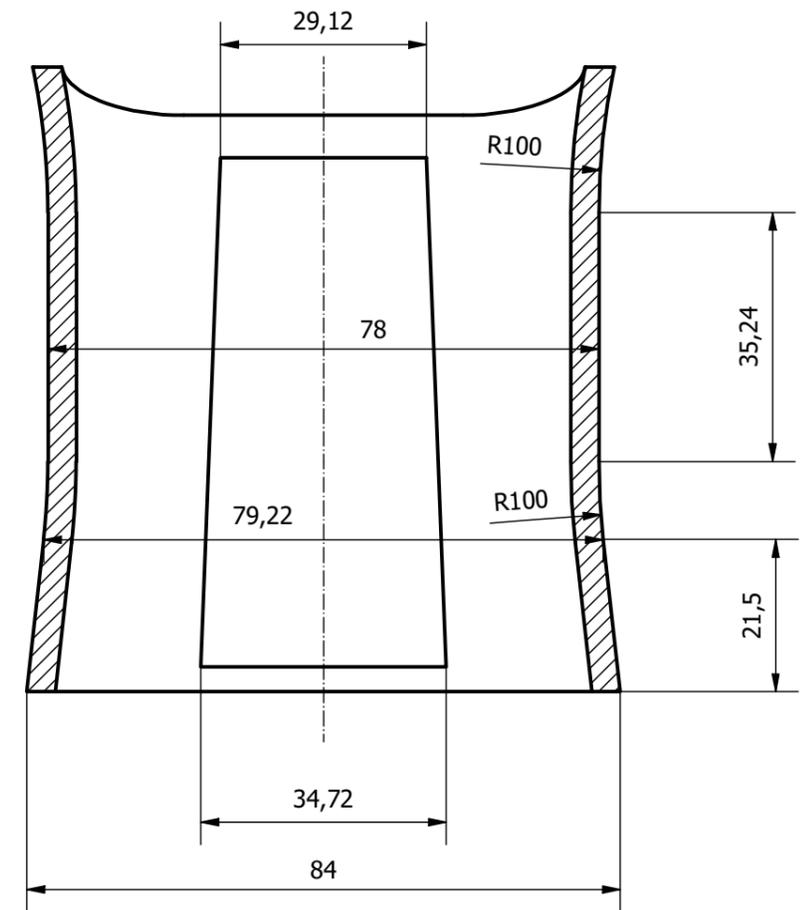
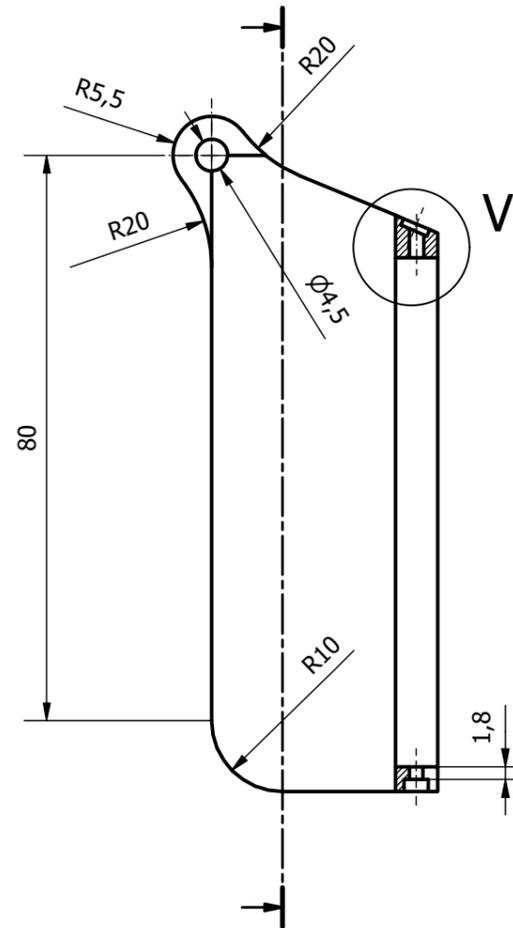
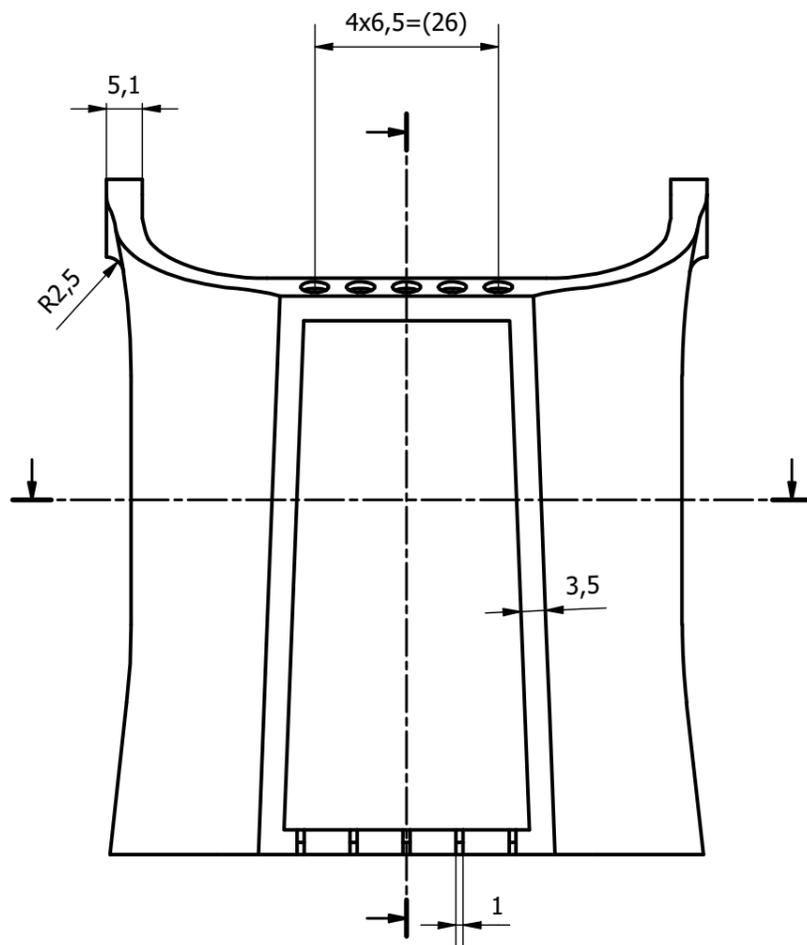
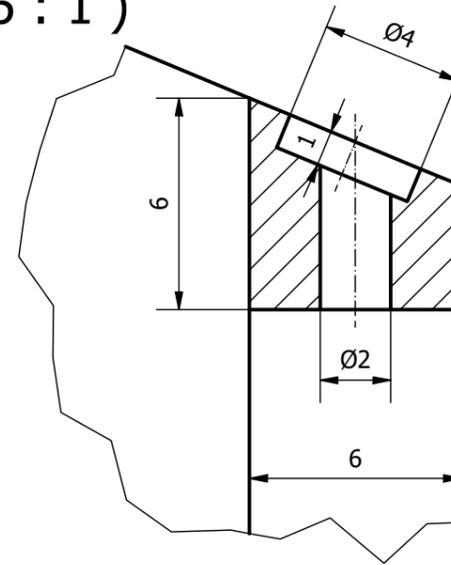
Fecha: Agosto del 2020

Autor: José Royo Bono

Página: 3/11



V (5:1)



Escala: 1:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

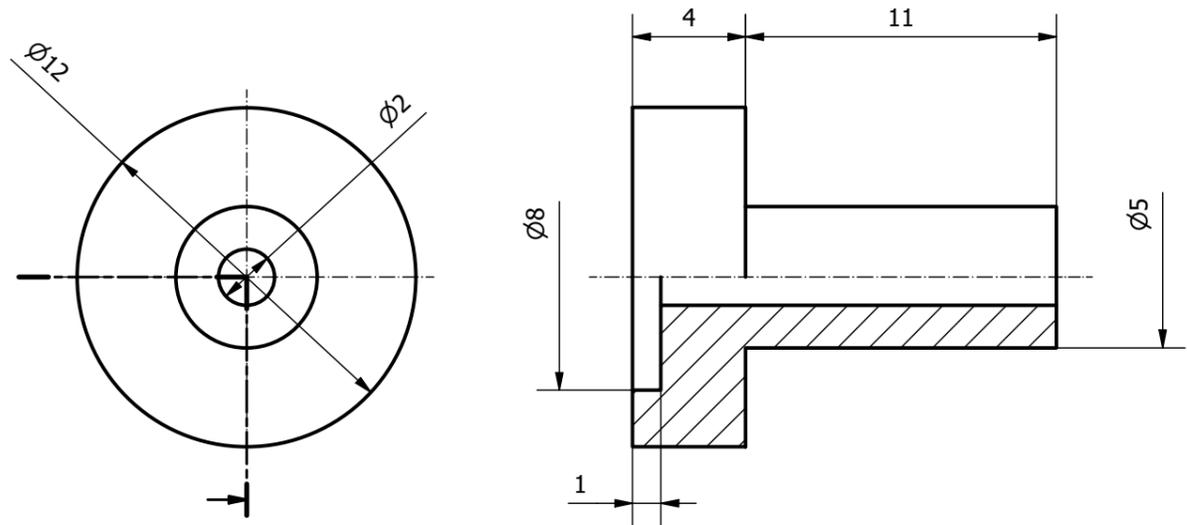
Título: Plano pieza 4

Fecha: Agosto del 2020

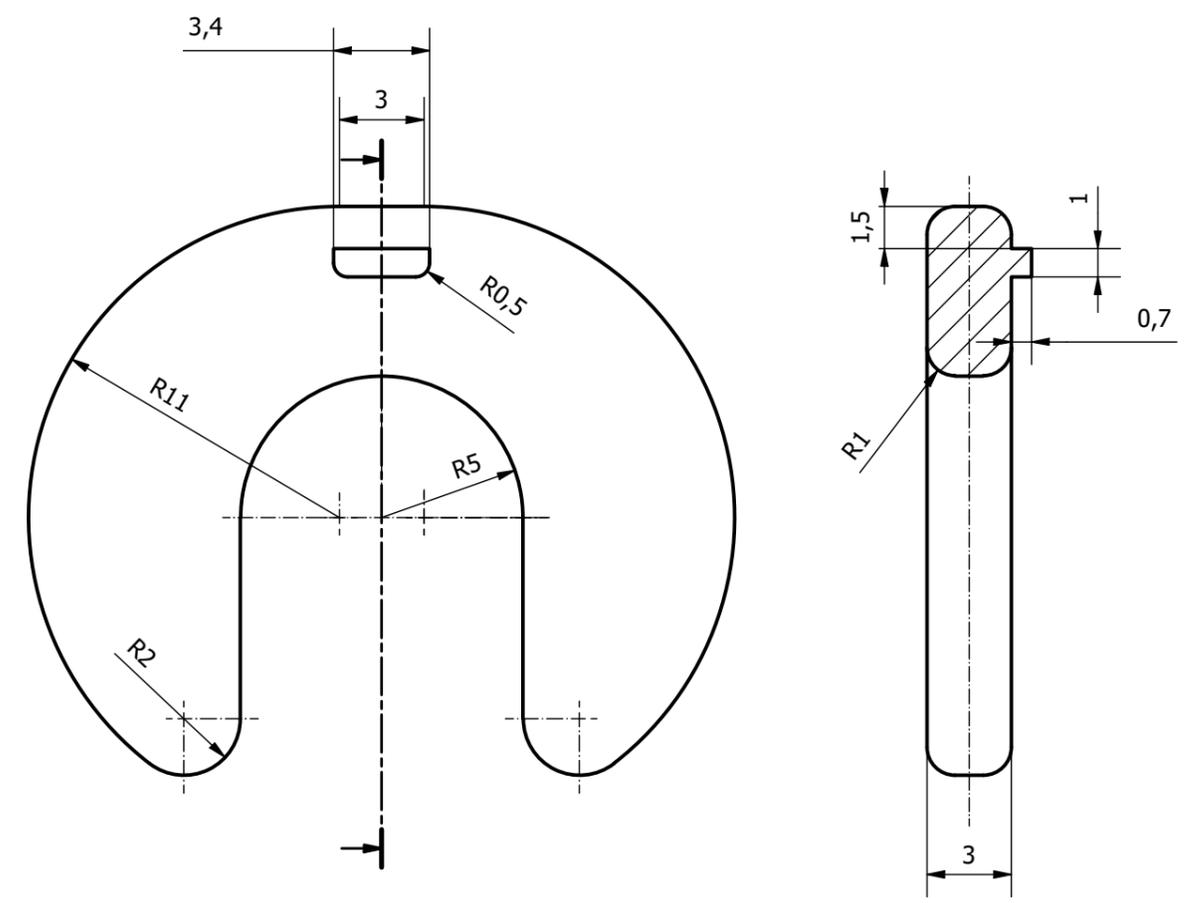
Autor: José Royo Bono

Página: 4/11

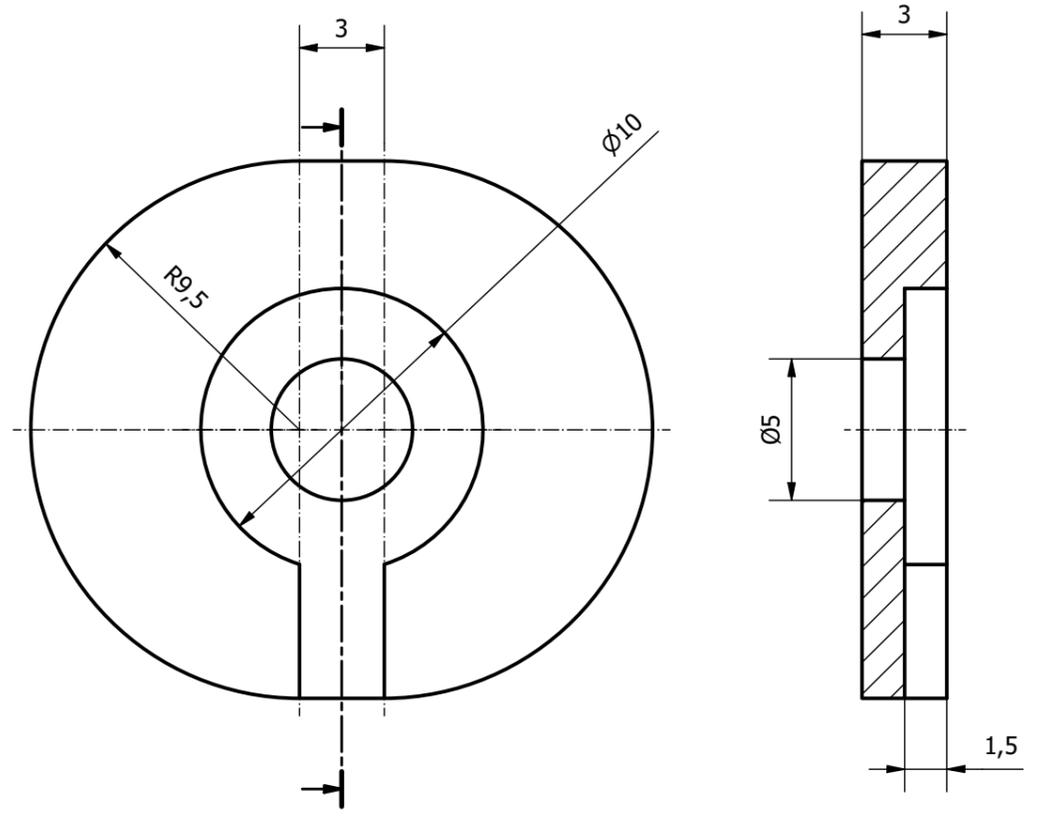
7



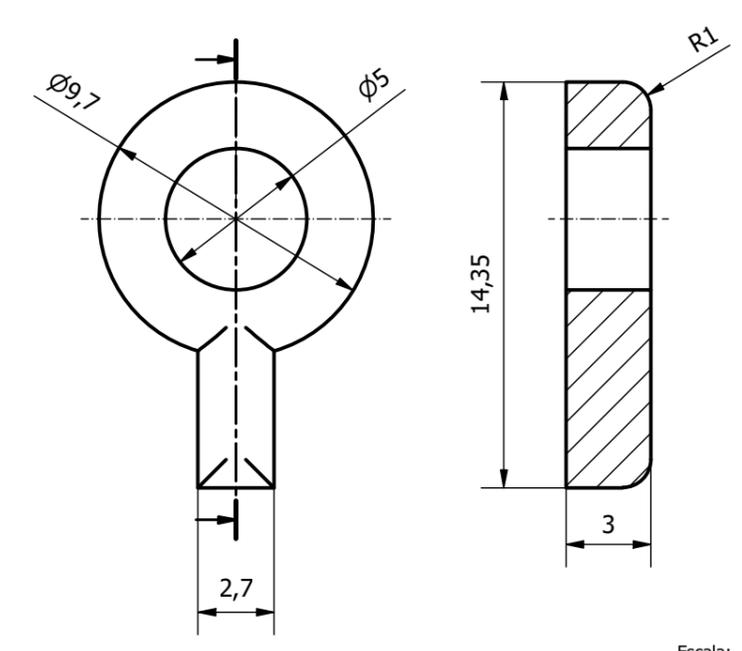
8



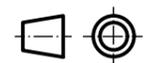
10



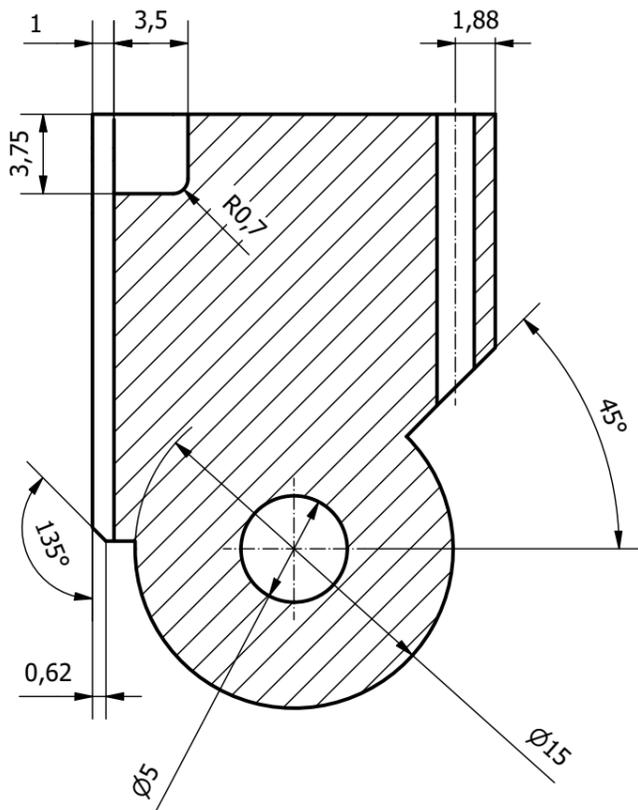
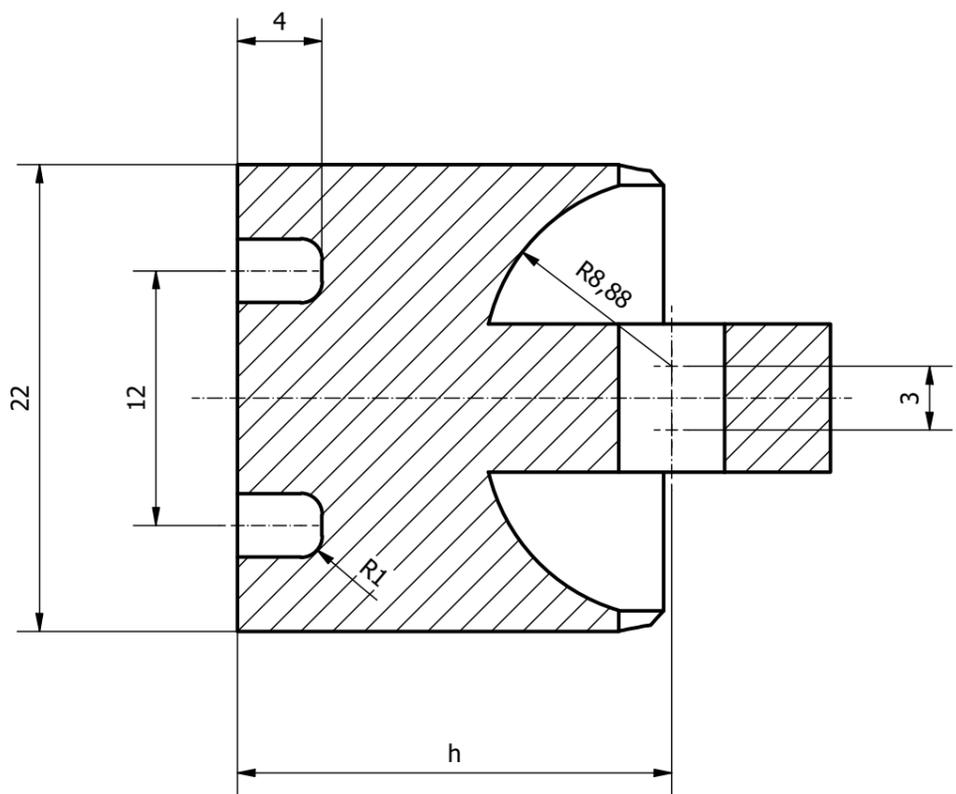
9



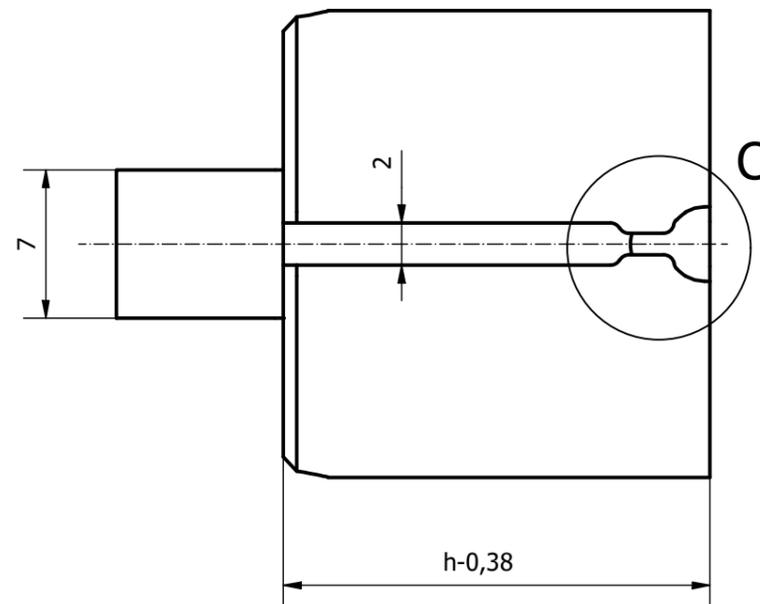
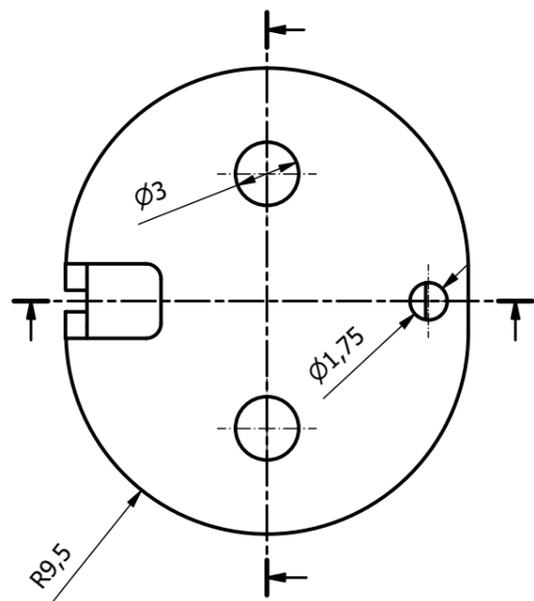
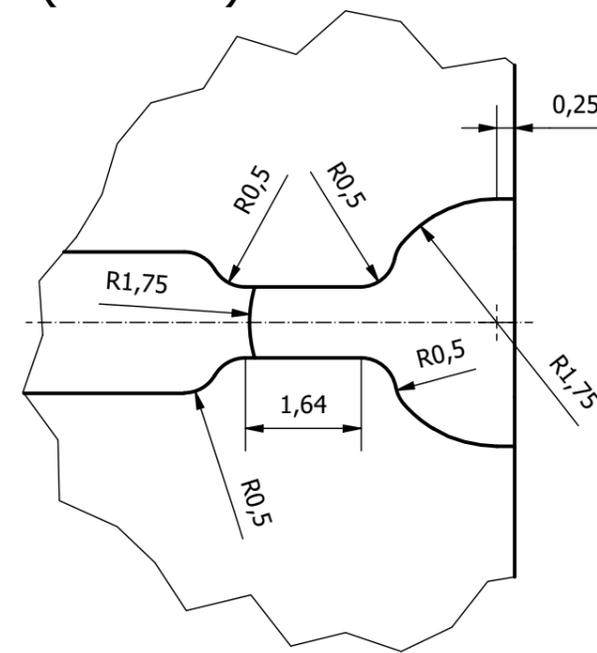
Escala: 4:1



TRABAJO FIN DE GRADO		Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico
		Título: Plano figuras 7, 8, 9 y 10
Autor: José Royo Bono		Fecha: Agosto del 2020
		Página: 5/11



C (10 : 1)



Escala: 3:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

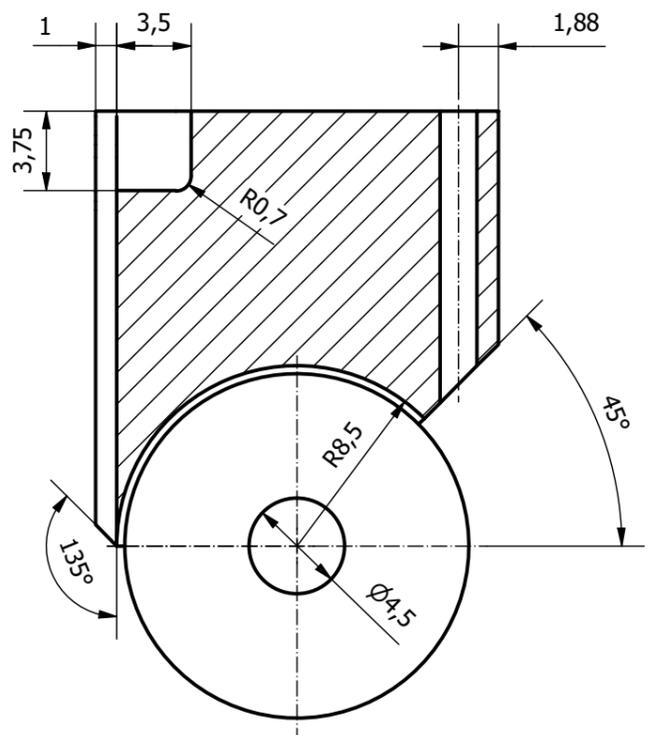
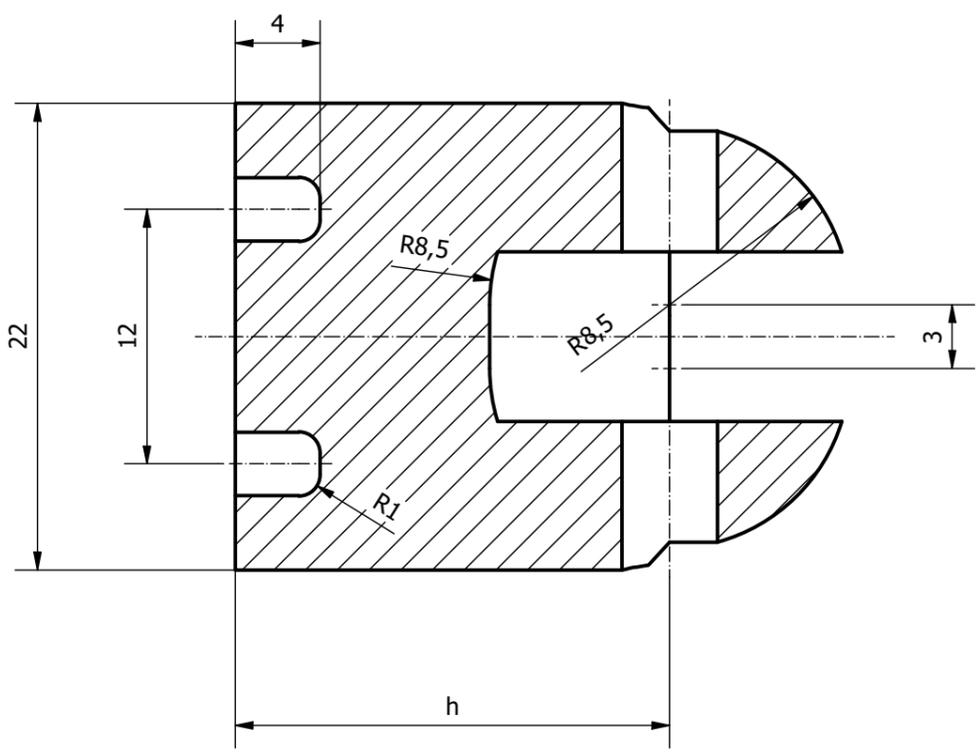
Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

Título: Plano falange parte 1

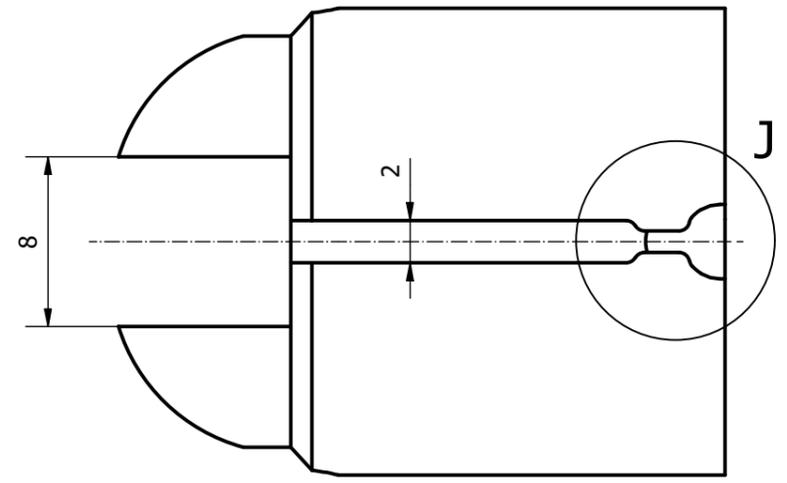
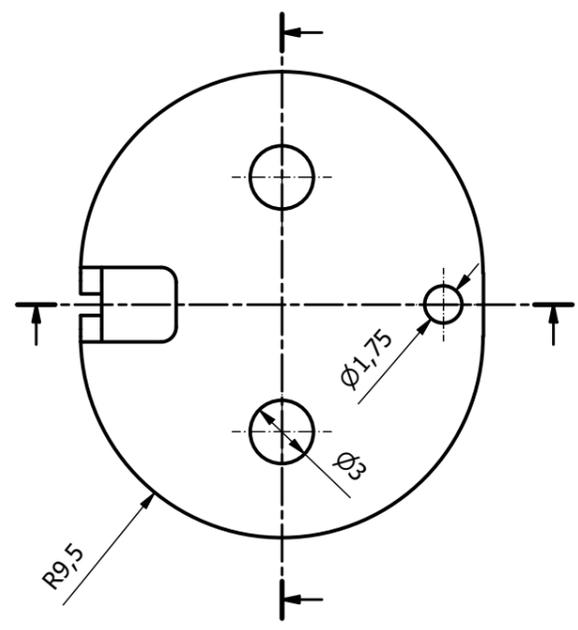
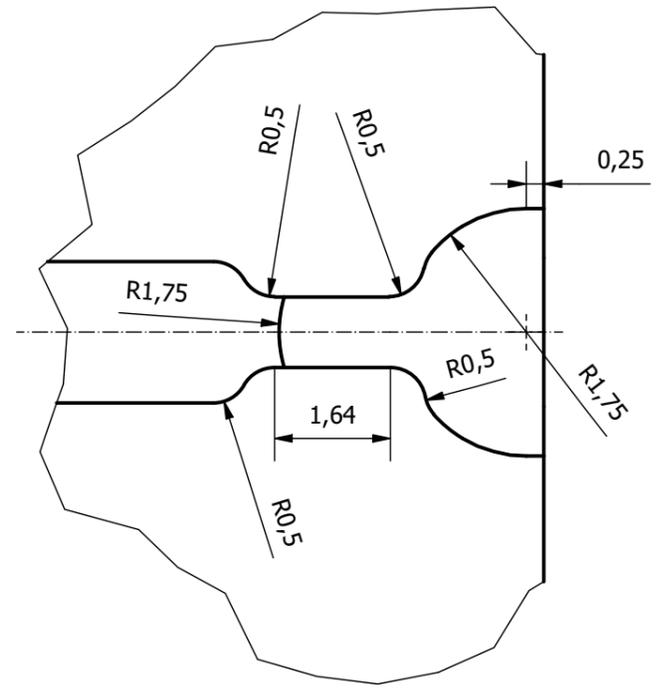
Fecha: Agosto del 2020

Autor: José Royo Bono

Página: 6/11

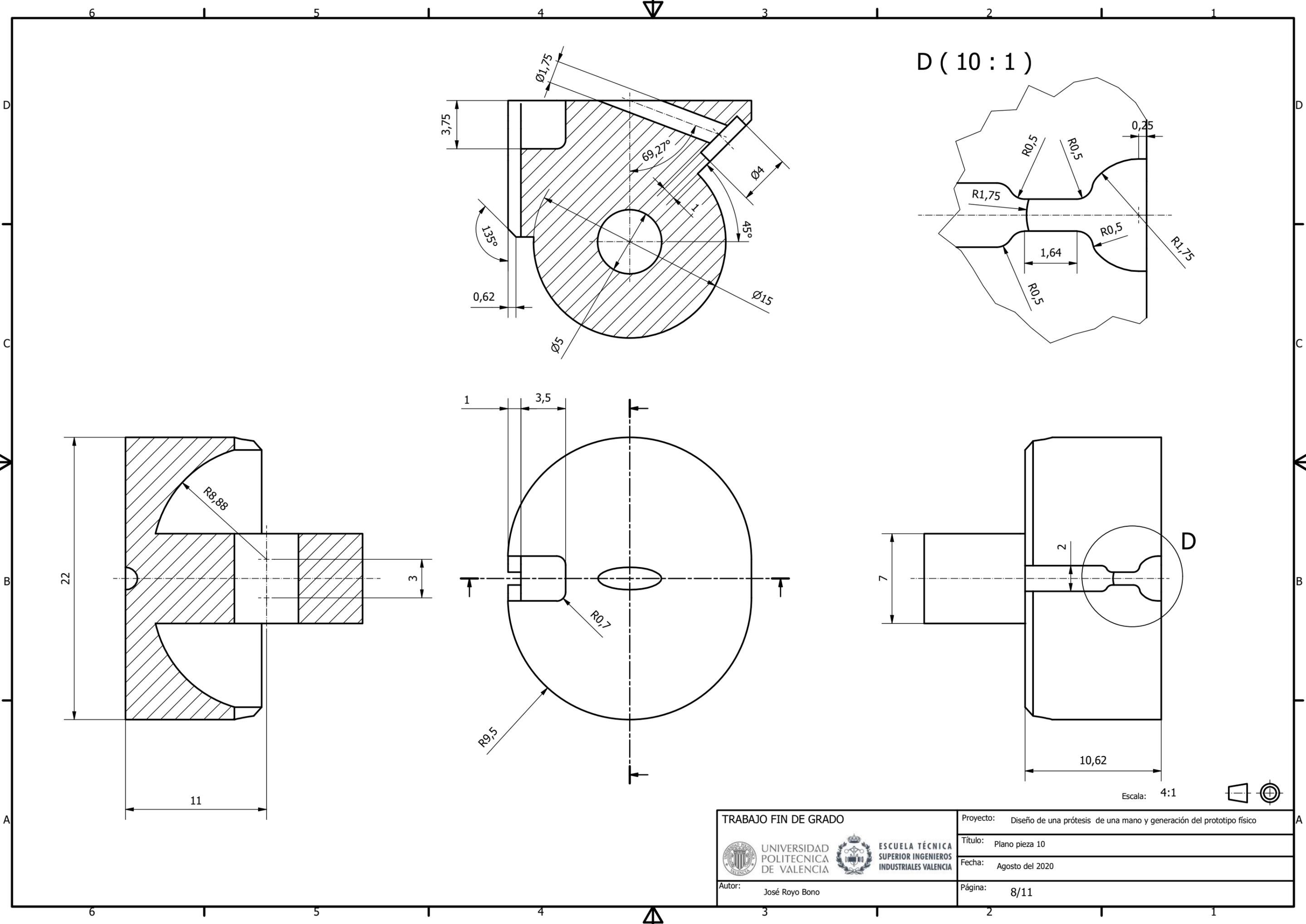


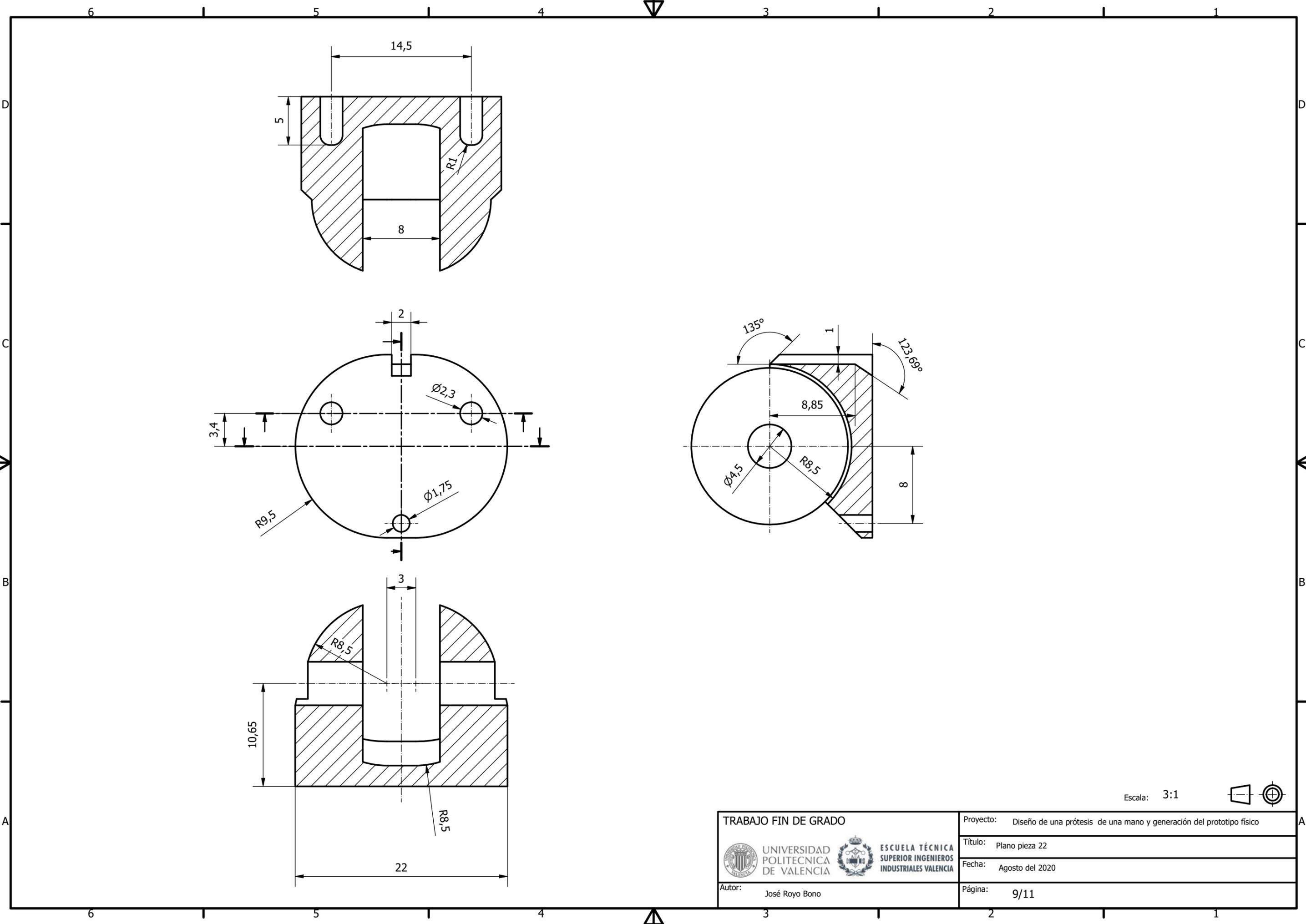
J (10 : 1)



Escala: 3:1

TRABAJO FIN DE GRADO		Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA		Título: Plano falange parte 2
Autor: José Royo Bono		Fecha: Agosto del 2020
		Página: 7/11





Escala: 3:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

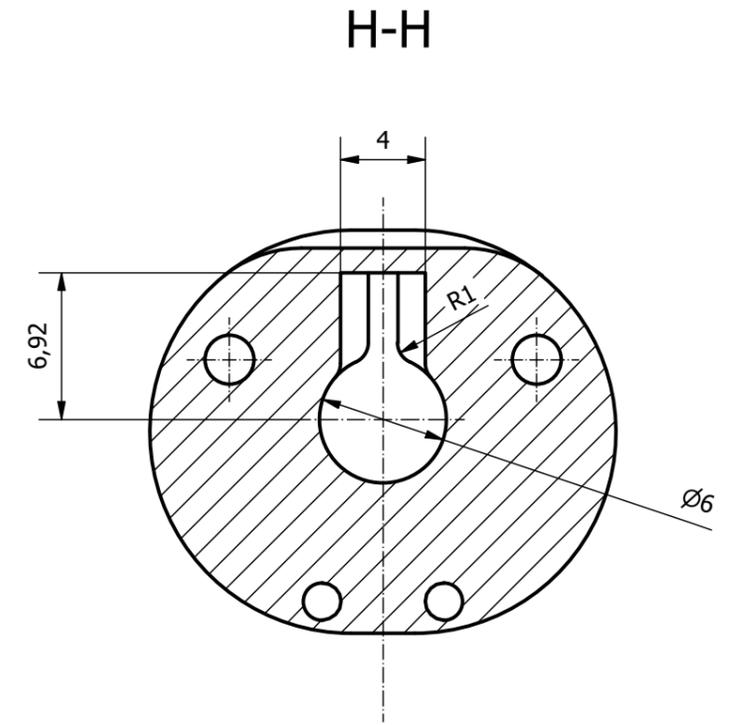
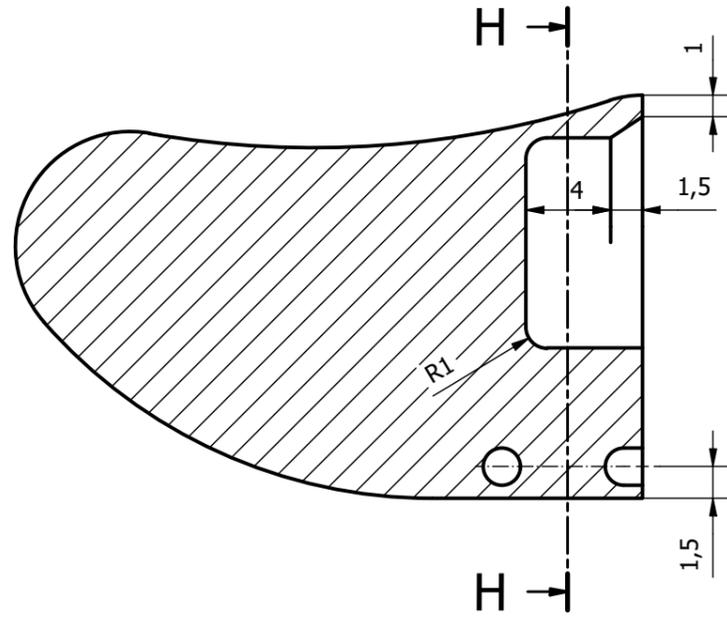
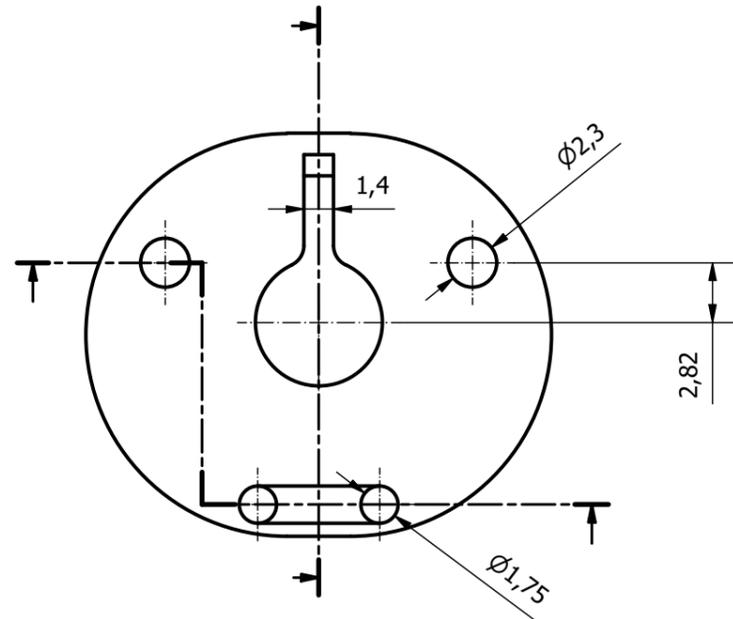
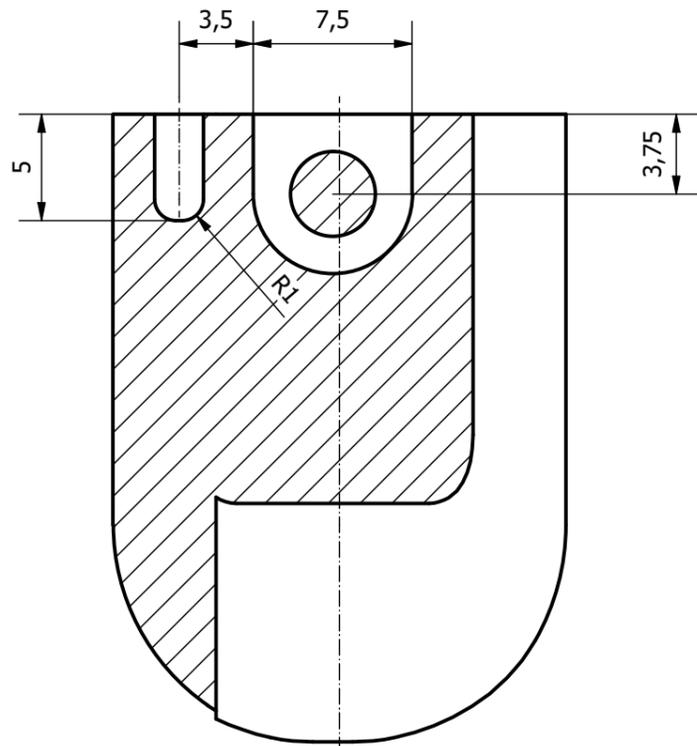
Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

Título: Plano pieza 22

Fecha: Agosto del 2020

Autor: José Royo Bono

Página: 9/11



Escala: 3:1



TRABAJO FIN DE GRADO



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

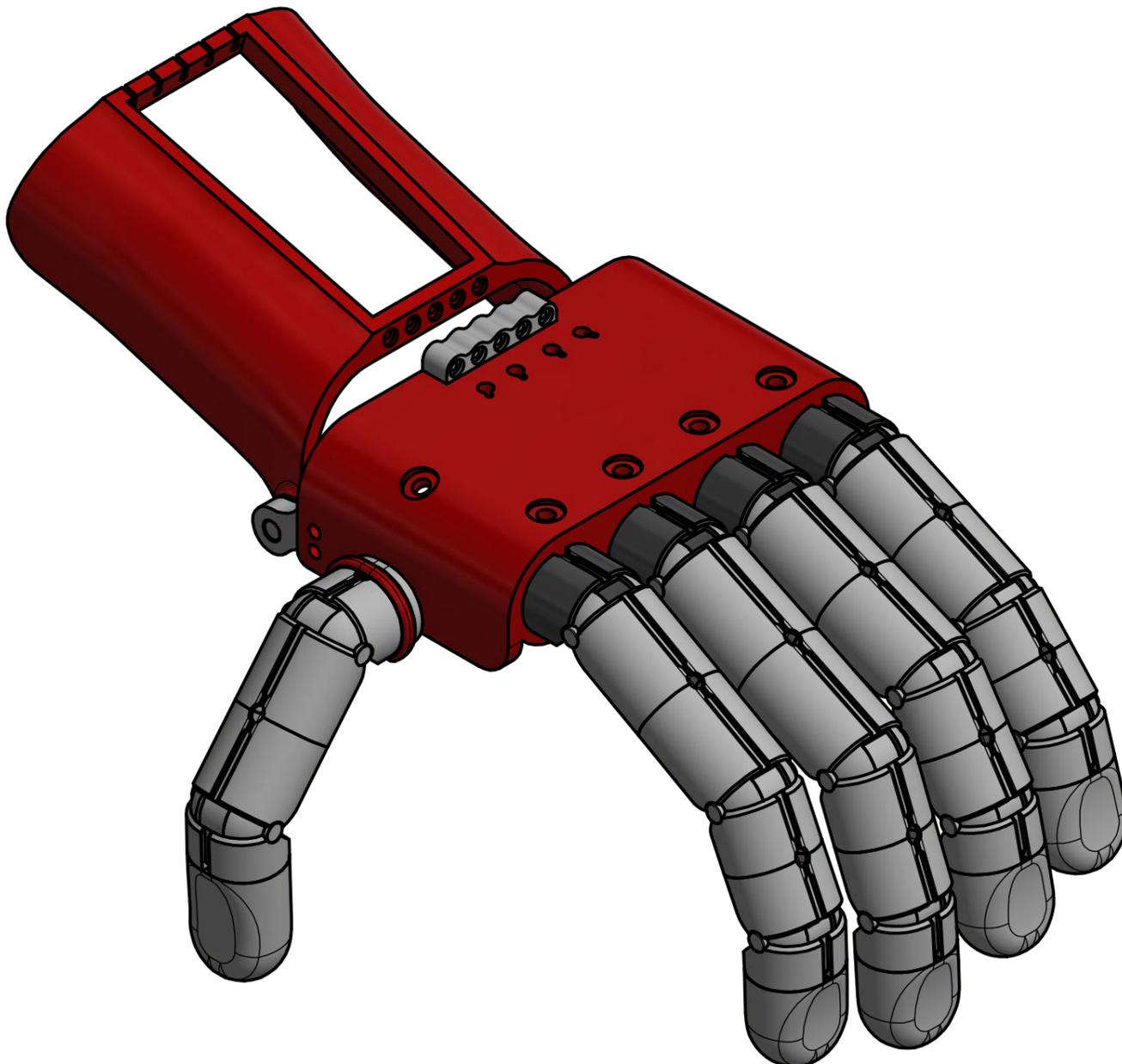
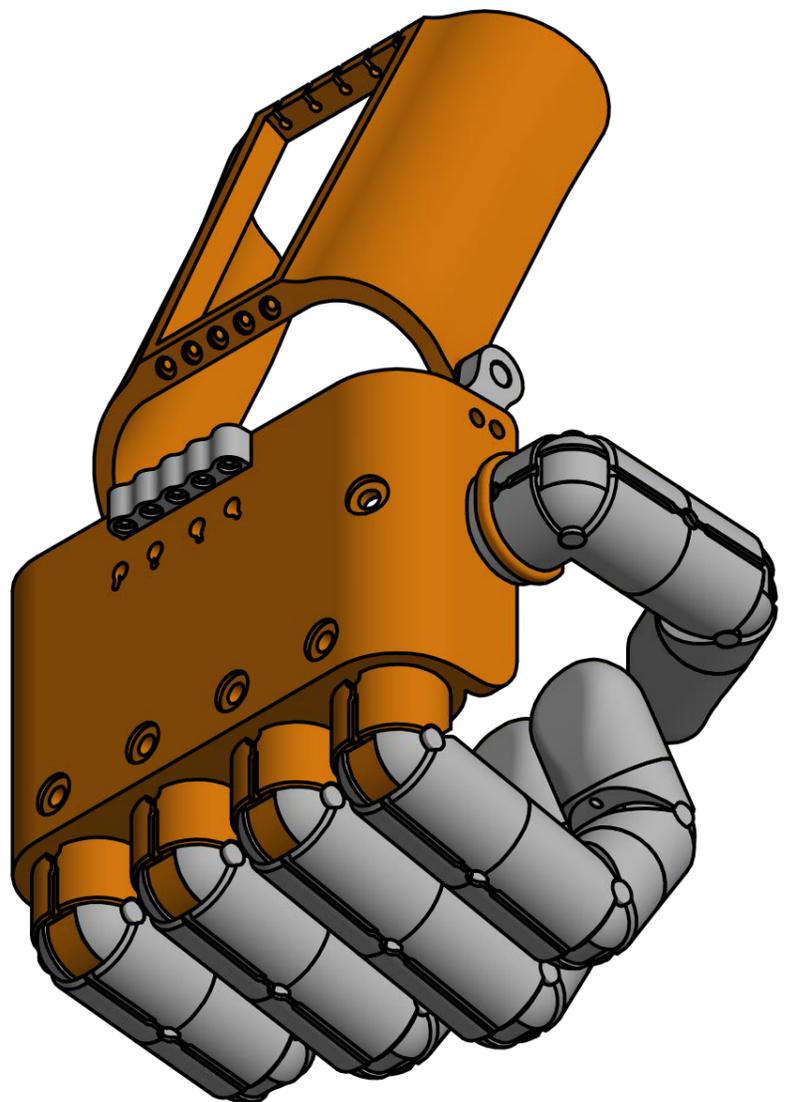
Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico

Título: Plano distal

Fecha: Agosto del 2020

Autor: José Royo Bono

Página: 10/11



TRABAJO FIN DE GRADO		Proyecto: Diseño de una prótesis de una mano y generación del prototipo físico
 UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA  ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA		Título: Distintos diseños mano izquierda y mano derecha
Autor: José Royo Bono		Fecha: Agosto del 2020
		Página: 11/11



DOCUMENTO IV: ANEXOS

1. Diseño pulgar en *Inventor*

Debido a la complejidad del diseño se ha decidido explicar su creación con el programa *Inventor*.

El único valor que diferencia el distal de los dedos y del pulgar es la longitud de la extrusión del boceto marcado en azul, en los dedos es de 12,35 mm y en el pulgar de 19,35 mm.

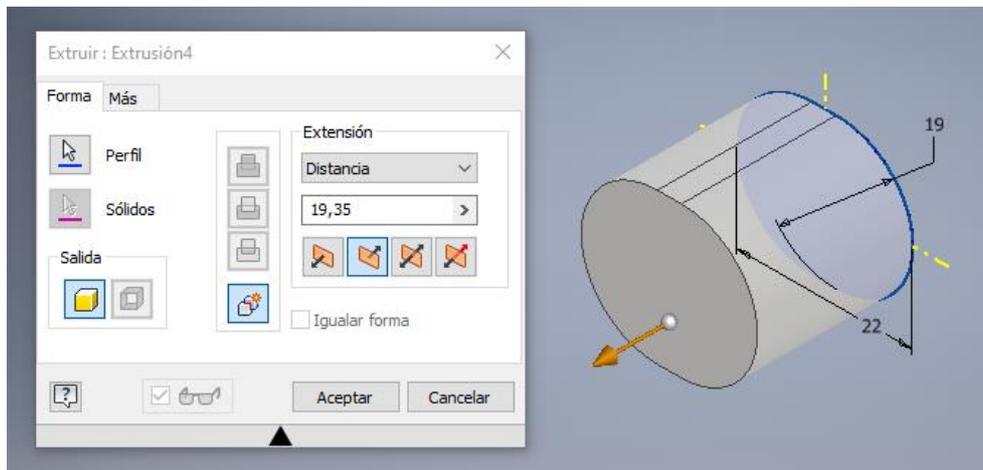


Ilustración 1. Extrusión base

El siguiente paso es una revolución de 180° de medio perfil de la extrusión anterior para conseguir una punta redondeada.

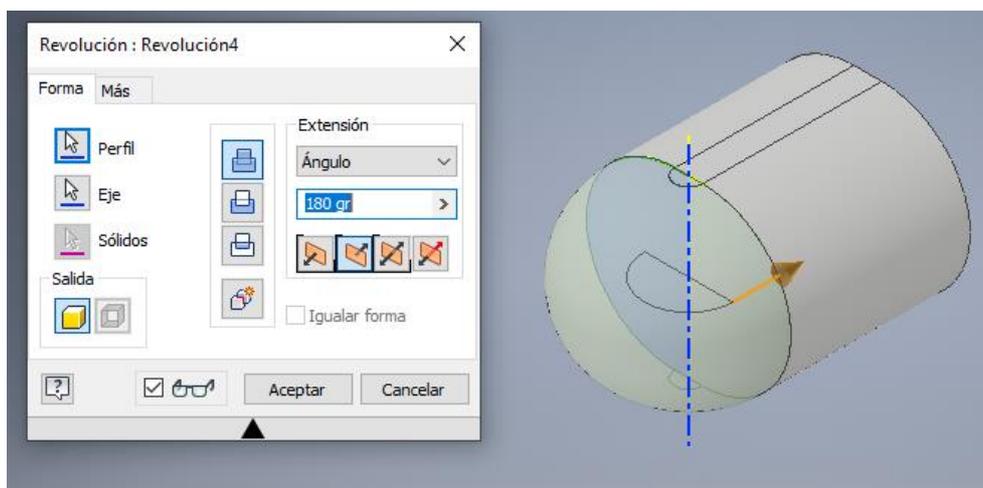


Ilustración 2. Revolución perfil base

Para imitar la forma compleja del perfil del pulgar se crea un boceto a base de circunferencias que servirá para crear una extrusión sustractiva de material con la longitud necesaria para que abarque toda la pieza.

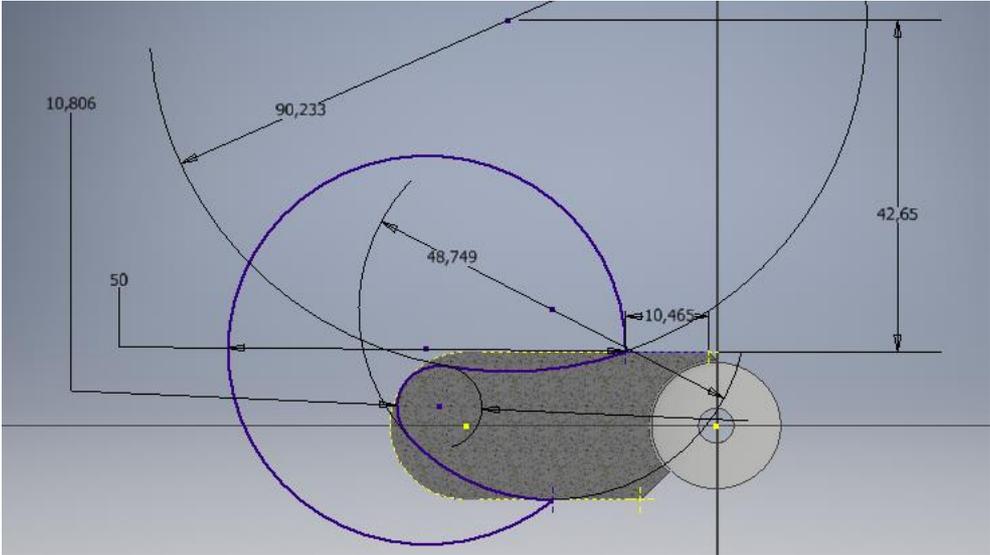


Ilustración 3. Boceto redondeo

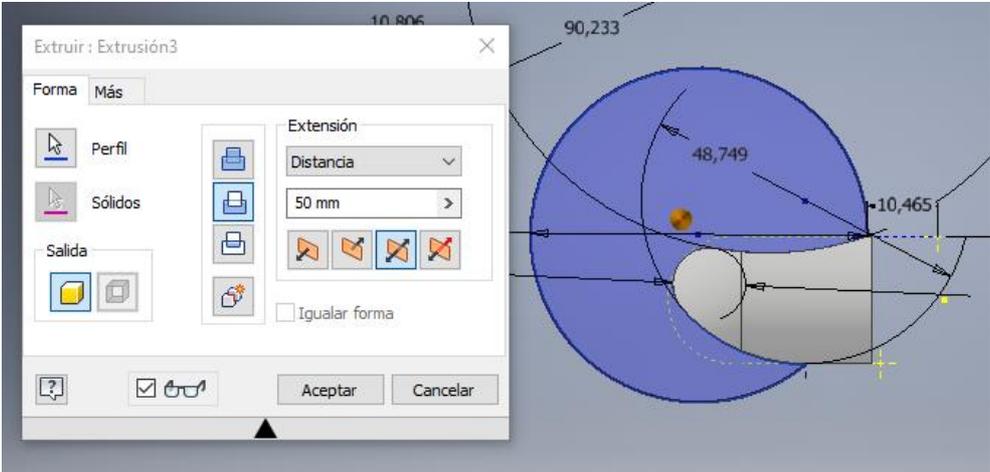


Ilustración 4. Extrusión negativa

Tras la extrusión negativa el objeto quedará de esta forma, sin embargo, se han creado cantos por el corte que se han de redondear para imitar al acabado de la punta de los dedos.

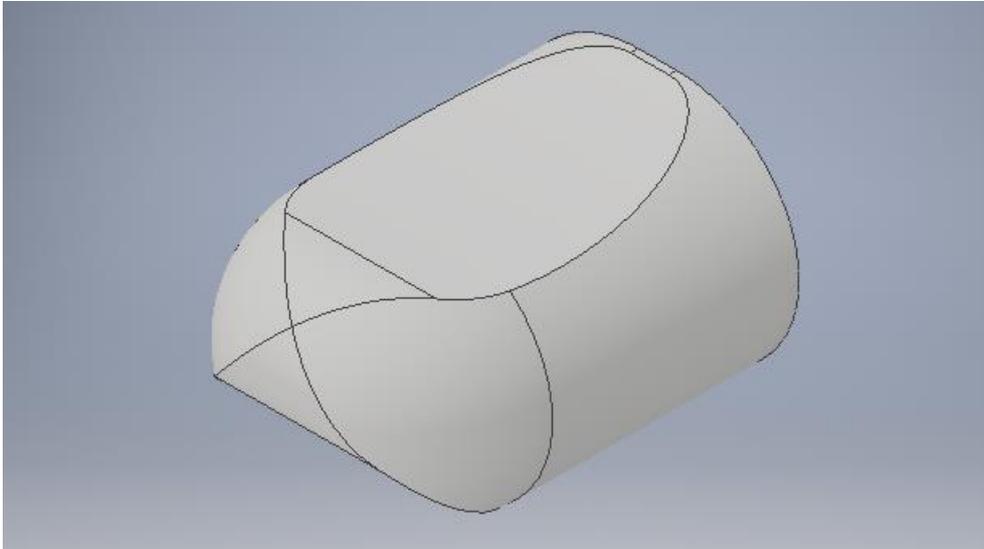


Ilustración 5. Acabado después de extrusión

Para conseguir tal efecto se utiliza la función de *Empalme* en los cantos con un radio de 5 mm consiguiendo así el acabado liso deseado.

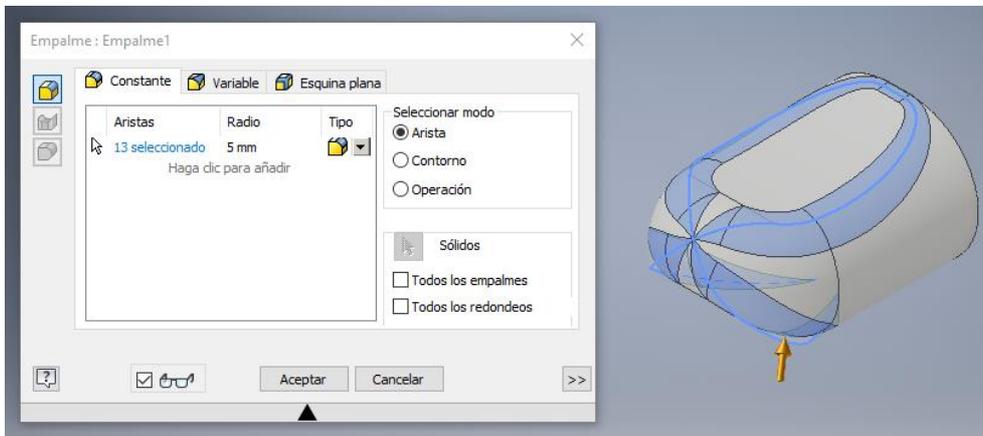


Ilustración 6. Redondeo

2. Creación de arandelas

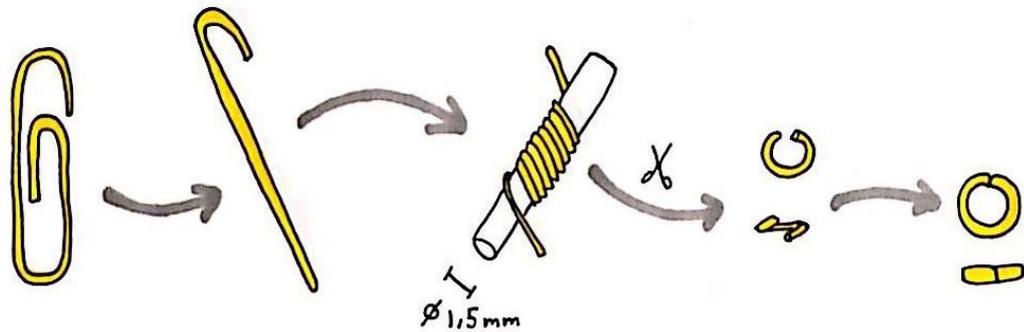


Ilustración 7. Creación de aros metálicos

Debido a la dificultad de encontrar remaches u otros sistemas de protección del material plástico de un tamaño tan pequeño (D_{exterior} : 4 mm, D_{interior} : 2 mm, Grosor: $\varnothing 1$ mm) se decidió crearlos de forma manual con elementos sencillos de encontrar. De esta forma se gastarán estos para hacer los ensayos y más tarde se intentará buscar algún aro de esas dimensiones normalizado en el mercado. En este anexo se explica el procedimiento que se utilizará para fabricarlos.

Primero se desdobla el clip para sacar un alambre que se doblará alrededor de una herramienta cilíndrica de entre 1,5 mm y 2 mm de diámetro. Después se corta creando aros, que se deberán corregir con alicates para obtener el resultado final.