



**UCA**

Universidad  
de Cádiz

Escuela Superior  
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

**DISEÑO ORIENTADO A LA FABRICACIÓN  
DE UNA PRÓTESIS DE MANO ROBÓTICA  
PARA NIÑOS DE CORTA EDAD**

AUTOR: PABLO MEDINA COELLO

Cádiz, noviembre 2021



**UCA**

Universidad  
de Cádiz

Escuela Superior  
de Ingeniería

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

**DISEÑO ORIENTADO A LA FABRICACIÓN  
DE UNA PRÓTESIS DE MANO ROBÓTICA  
PARA NIÑOS DE CORTA EDAD**

DIRECTOR: MOISÉS BATISTA PONCE  
CODIRECTOR: ÁVARO GÓMEZ PARRA  
AUTOR: PABLO MEDINA COELLO

Cádiz, noviembre 2021





## Índice

1.	Introducción.....	11
1.1.	Objetivos.....	11
1.2.	Alcance del proyecto.....	12
1.3.	Definiciones y abreviaturas.....	12
1.4.	Uso de herramienta software.....	13
2.	Estado del arte y trabajos relacionados.....	16
2.1.	Diseño para la fabricación y el montaje.....	16
2.2.	Procesos de fabricación.....	17
2.2.1.	Fresado de aluminio.....	17
2.2.2.	Mecanizado láser en metal.....	18
2.2.3.	Impresión 3D.....	20
2.3.	Materiales.....	21
2.3.1.	Metales.....	21
2.3.2.	Plásticos.....	22
2.3.3.	Compuestos.....	22
2.3.4.	Otros materiales.....	23
2.4.	Manos robóticas más actuales.....	23
2.4.1.	TMB Hand.....	23
2.4.2.	RTR II.....	24
2.4.3.	Keio Hand.....	24
2.4.4.	SmartHand.....	24
2.4.5.	Vandervilt Multigrasp.....	25
2.4.6.	DEKA Hand.....	26
2.4.7.	Hannes Hand.....	26
2.5.	Conclusión de la búsqueda de información.....	27
3.	Metodología.....	29
3.1.	Planificación.....	29
3.2.	Desarrollo del diseño de la prótesis.....	31
3.2.1.	Análisis de requisitos.....	31
3.2.2.	Introducción al diseño previo.....	32
3.2.3.	Fase de diseño.....	35
3.2.3.1.	Diseño de dedos.....	35
3.2.3.2.	Diseño del dedo pulgar.....	37
3.2.3.3.	Diseño de la mano.....	39

---

3.3.	Prototipo y verificación.....	42
3.4.	Fabricación y montaje de la mano. ....	45
3.4.1.	Mecanizado por CNC. ....	45
3.4.2.	Mecanizado láser. ....	48
3.4.3.	Impresión 3D. ....	53
3.4.4.	Moldeo de plástico polimórfico.....	55
4.	Resultados finales. ....	57
5.	Presupuestos.....	61
5.1.	Coste del personal.....	61
5.2.	Coste de software.....	61
5.3.	Coste de material adquirido. ....	61
5.4.	Costes totales.....	62
6.	Futuras líneas de trabajo. ....	63
7.	Conclusiones. ....	64
8.	Referencias. ....	65
9.	Planos. ....	69

---

## Relación de tablas

Tabla 1: Distribución del tiempo en cada actividad. ....	29
Tabla 2: Diagrama de Gantt. ....	30
Tabla 3: Especificaciones de los modelos de fresas que se han usado. ....	46
Tabla 4: Parámetros de corte utilizados para las herramientas. ....	47
Tabla 5: Coste del personal. ....	61
Tabla 6: Coste de software. ....	61
Tabla 7: Coste de material adquirido. ....	61
Tabla 8: Costes totales con IVA. ....	62

## Relación de ilustraciones

Ilustración 1: a.) Diseño previo del dedo. b.) Rediseño del dedo. c.) Diseño fabricado y ensamblado. ....	11
Ilustración 2: Aspire 9.5. ....	13
Ilustración 3: Interfaz de Inkscape.....	13
Ilustración 4: Keyshot 9.0 Pro. ....	14
Ilustración 5: Makerbot Desktop.....	14
Ilustración 6: Catia V5-6R2018. ....	15
Ilustración 7: Representación de cómo afectan los cambios en el coste, a medida que el diseño avanza .....	16
Ilustración 8: Representación de los efectos BUL y BUE en la herramienta de corte..	17
Ilustración 9: Representación del mecanizado láser. ....	18
Ilustración 10: Ángulo de la cuña generado. ....	19
Ilustración 11: Representación de los parámetros de Wobble.....	19
Ilustración 12: Representación de cómo actúa la lente en el láser. ....	19
Ilustración 13: Principales tecnologías de impresión 3D. ....	20
Ilustración 14: Ejemplos de manos robótica de plástico. ....	22
Ilustración 15:TMB Hand .....	23
Ilustración 16: RTR II .....	24
Ilustración 17: SmartHand.....	25
Ilustración 18: Vandervilt Multigrasp .....	25
Ilustración 19: DEKA Hand. ....	26
Ilustración 20: Hannes Hand.....	26
Ilustración 21: Tipos de agarre básicos.....	27
Ilustración 22: Planificación del proyecto. ....	29
Ilustración 23: Movimiento del pulgar.....	31
Ilustración 24: Simulación de la trayectoria del dedo diseñado. ....	32
Ilustración 25: Explosionado de las barras que conforman el diseño del dedo.....	32
Ilustración 26: Diseño del dedo.....	33
Ilustración 27: Estructura media con los dedos ensamblados. ....	33
Ilustración 28: Diseño de la palma superior e inferior.....	34
Ilustración 29: Colocación el ángulo de inclinación del dedo pulgar en la palma inferior. ....	34
Ilustración 30: Diseño de la mano completa.....	35
Ilustración 31: Pieza adaptadora del eje y rediseño de la barra cuatro del dedo. ....	35
Ilustración 32: Modificaciones del diseño del dedo. ....	36
Ilustración 33: Recreación del movimiento del dedo. ....	36
Ilustración 34: Rediseño de una de las piezas teniendo en cuenta el concepto de DFMA. ....	37
Ilustración 35: Rediseño de las falanges del pulgar. ....	37
Ilustración 36: Dedo pulgar con el actuador encargado del movimiento de flexión- extensión. ....	38
Ilustración 37: Dedo pulgar con los dos actuadores.....	38
Ilustración 38: Movimiento de abducción-aducción del pulgar.....	39
Ilustración 39: Rediseño de la estructura media, con la redistribución de los actuadores.....	39

Ilustración 40: Piezas encargadas de anclar los actuadores a la estructura media. ....	40
Ilustración 41: Rediseño del punto de unión del dedo a la estructura media. ....	40
Ilustración 42: Diseño de la palma superior e inferior. ....	41
Ilustración 43: Piezas que se utilizan para ensamblar el dedo pulgar a la palma superior. ....	41
Ilustración 44: Diseño de la palma inferior, junto a la pieza que se ensambla para sujetar los actuadores de los dedos. ....	42
Ilustración 45: Primer prototipo. ....	42
Ilustración 46: Segundo prototipo. ....	43
Ilustración 47: Primer prototipo de dedo pulgar. ....	44
Ilustración 48: Segundo prototipo del pulgar, las marcas de color rojo son los cambios realizados en el diseño entre el primer y segundo prototipo. ....	44
Ilustración 49: Máquina CNC Alarsis FRH170 ATC. ....	45
Ilustración 50: Fresa modelo FCR de Alarsis. ....	45
Ilustración 51: Trayectoria de corte y simulación de las operaciones. ....	46
Ilustración 52: Piezas del dedo índice mecanizadas en Prolab 65. ....	47
Ilustración 53: Resultado del proceso de mecanizado de las piezas de los dedos. ....	48
Ilustración 54: Máquina láser Sisma EASY. ....	49
Ilustración 55: Piezas cortadas en máquina láser. ....	49
Ilustración 56: Diseño del torno. ....	50
Ilustración 57: Diseño del mecanizado de las barras internas en el software Inkscape. ....	50
Ilustración 58: Colocación del torno en la máquina y marcado láser de posicionamiento. ....	51
Ilustración 59: Resultado del proceso de mecanizado de los ejes. ....	51
Ilustración 60: Máquina láser Epilog Mini Helix. ....	52
Ilustración 61: Resultado del proceso de mecanizado láser de la base del torno. ....	53
Ilustración 62: Impresora 3D Makerbot Z18. ....	53
Ilustración 63: Previsualización de las piezas que se van a imprimir. ....	54
Ilustración 64: Piezas de la mano impresas en PLA. ....	54
Ilustración 65: Pellets de plástico polimórfico. ....	55
Ilustración 66: Barra cuatro con la pieza de plástico polimórfico que adapta el eje. ....	56
Ilustración 67: Montaje de los dedos en la estructura media. ....	57
Ilustración 68: Montaje del actuador encargado del movimiento flexión-extensión del dedo pulgar. ....	57
Ilustración 69: Montaje de los dos actuadores y las barras internas del dedo pulgar en la palma superior. ....	58
Ilustración 70: Montaje de la estructura media sobre la palma superior con los dedos ensamblados. ....	58
Ilustración 71: Montaje final del pulgar y la palma inferior. ....	59
Ilustración 72: Prototipo final del diseño de la mano robótica. ....	59
Ilustración 73: Prototipo funcional con el dedo pulgar realizando el movimiento de abducción. ....	60
Ilustración 74: Ejemplo de aplicación de la técnica de optimización topológica en una pieza del tren de aterrizaje de una aeronave. ....	63

## 1. Introducción.

Este trabajo de fin de máster nace de un trabajo de fin de grado previo en el que se desarrolló el diseño de las barras internas de los dedos de una mano robótica para niños. Se fabricó la mano en una impresora 3D para obtener un prototipo funcional. El diseño realizado en el TFG no es posible fabricarlo en una CNC o crear moldes para cada pieza, debido a que lo que se buscaba en ese diseño es probar su funcionalidad y el movimiento de las barras internas. Además, el diseño del dedo pulgar del TFG, también fue preliminar para ver su funcionamiento mediante barras. Por ello, lo que busca en este TFM es realizar un diseño para que todas las piezas que componen la mano robótica se puedan fabricar mediante CNC o cortadora láser y obtener una mano realizada en metal y además rediseñar el dedo pulgar para que tenga total funcionalidad.

Se introducirá por medio del estado del arte los trabajos y conocimientos previos existentes en cuanto a fabricación de prótesis de mano. Se iniciará con diferentes proyectos de investigación de manos robóticas, para posteriormente analizar métodos de fabricación y materiales que se utilizan. Además de analizar diferentes propuestas de diseños de pulgar existentes.

Una vez se han explicado los conocimientos previos se explicará la metodología seguida para el diseño y la fabricación de la mano robótica. Después de ver la metodología se pasará a los resultados obtenidos, pasando desde los conceptos previos hasta el prototipo final. Se concluirá con los apartados de presupuesto, conclusiones y líneas de investigación futuras. Por último, se añaden los planos de todas las piezas utilizadas y fabricadas para el ensamblaje de la mano, a excepción de las que se imprimen en 3D.

### 1.1. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es realizar el diseño de una mano protésica robótica para niños que sea fabricable a través de los equipos de mecanizado que se disponen en el laboratorio. Todas las piezas que componen los dedos de la mano se fabricarán en metal, todas las piezas que utilizan las barras internas como mecanismo para el funcionamiento de los dedos se realizarán en chapa metálica. Además, se desarrollará un diseño del pulgar que tendrá dos grados de libertad que mejora la funcionalidad del trabajo anterior.

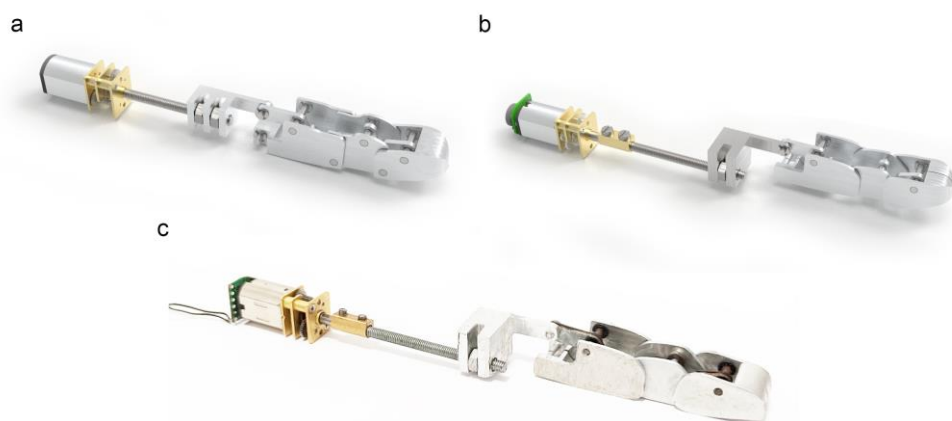


Ilustración 1: a.) Diseño previo del dedo. b.) Rediseño del dedo. c.) Diseño fabricado y ensamblado.

## 1.2. Alcance del proyecto.

Este trabajo de fin de máster se centra en adaptar el diseño de la mano para que sea fabricable por medio de las máquinas que se dispone. Las partes que conforman la mano robótica están fabricadas en diferentes materiales, cada uno de ellos será seleccionado en función a los requisitos que se someterán cada pieza. Los diseños de las piezas de los dedos de la mano se fabricarán en una CNC de 3 ejes en aluminio. Los diseños de las piezas de las barras internas se realizan en la cortadora láser en acero inoxidable. El diseño del dedo pulgar se basará en el uso de dos micromotores para tener 2 grados de libertad y un movimiento más natural. Este TFM se centra en el diseño mecánico para la fabricación de todas las piezas de la mano y queda fuera del alcance de este proyecto el control electrónico ya que lo está realizando otro estudiante.

## 1.3. Definiciones y abreviaturas.

*Render: imagen realista generada a partir de un modelo 3D.*

*Homing: se trata de mover los ejes X, Y, Z, hasta sus límites de carrera y por medio de sensores o interruptores mover los ejes a su posición inicial.*

*Pellet: Bola pequeña de un material.*

*DFM: Design for manufacturing (diseño para la fabricación).*

*DFMA: Design for Manufacturing and Assembly (diseño para la fabricación y el montaje).*

*BUE: Built-up edge (Borde acumulado).*

*BUL: Built-up layer.*

*CNC: Control numérico por computadora.*

*FDM: Fused deposition modeling (Modelado por deposición fundida).*

*SLA: Stereolithography (Estereolitografía).*

*SLS: Selective laser sintering (Sinterización selectiva por láser).*

*ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno.*

*PLA: Ácido poliláctico.*

*TPU: Poliuretano termoplástico.*

*CAD: Computer aided design (Diseño asistido por ordenador).*

*CAM: Computer aided manufacturing (Fabricación asistida por ordenador).*

*DXF: Drawing Exchange Format (Formato de intercambio de dibujos).*

*STL: STereoLithography Interface Format.*

## 1.4. Uso de herramienta software.

En este apartado se mencionan las herramientas software que se han utilizado para el desarrollo del trabajo.

Aspire: es un software basado en tecnología CAD/CAM, en el que permite generar o importar diseño en 2D y 3D, para posteriormente definir las operaciones necesarias para obtener la pieza deseada. En este proyecto es utilizado para generar las trayectorias de corte de la máquina CNC.

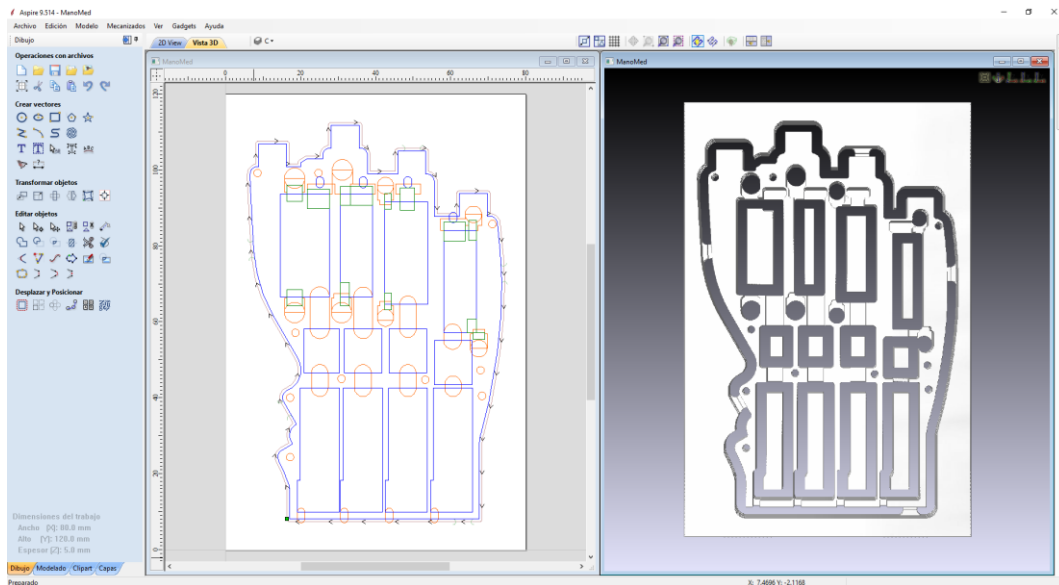


Ilustración 2: Aspire 9.5.

Inkscape: es un editor de gráficos vectoriales de libre uso. Dispone de las herramientas típicas de un software que trabaja en 2D. Se utiliza para generar los vectores que posteriormente son pasados a trayectorias para las dos máquinas de láser.

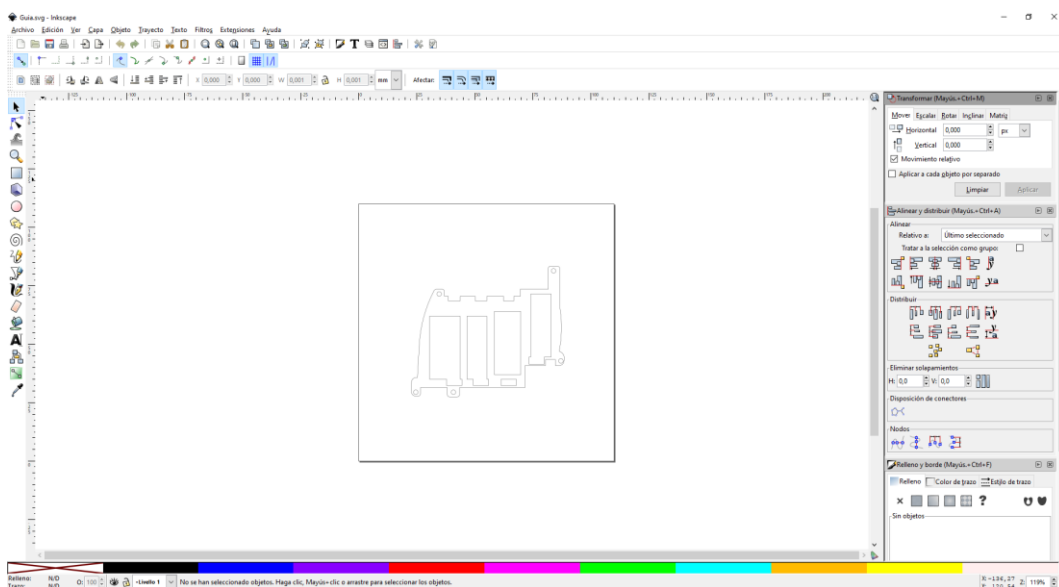


Ilustración 3: Interfaz de Inkscape.

Keyshot: es una herramienta de renderizado y animación en tiempo real, además permite realizar renderizados de alta calidad de una forma rápida. En este proyecto se ha utilizado para realizar renders, debido a que este software permite asignarles materiales a las piezas y de esta forma obtener renders del diseño con una alta calidad.

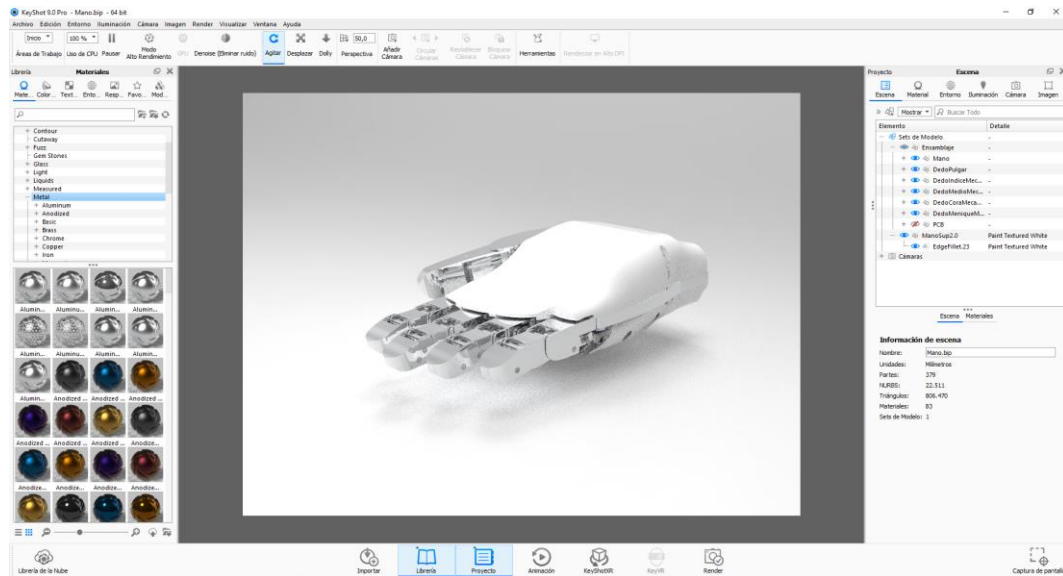


Ilustración 4: Keyshot 9.0 Pro.

Makerbot Desktop: es una aplicación que permite preparar, monitorear y administrar las impresiones 3D en las impresoras Makerbot. Se utiliza para controlar e imprimir las piezas de la mano, además de los prototipos.

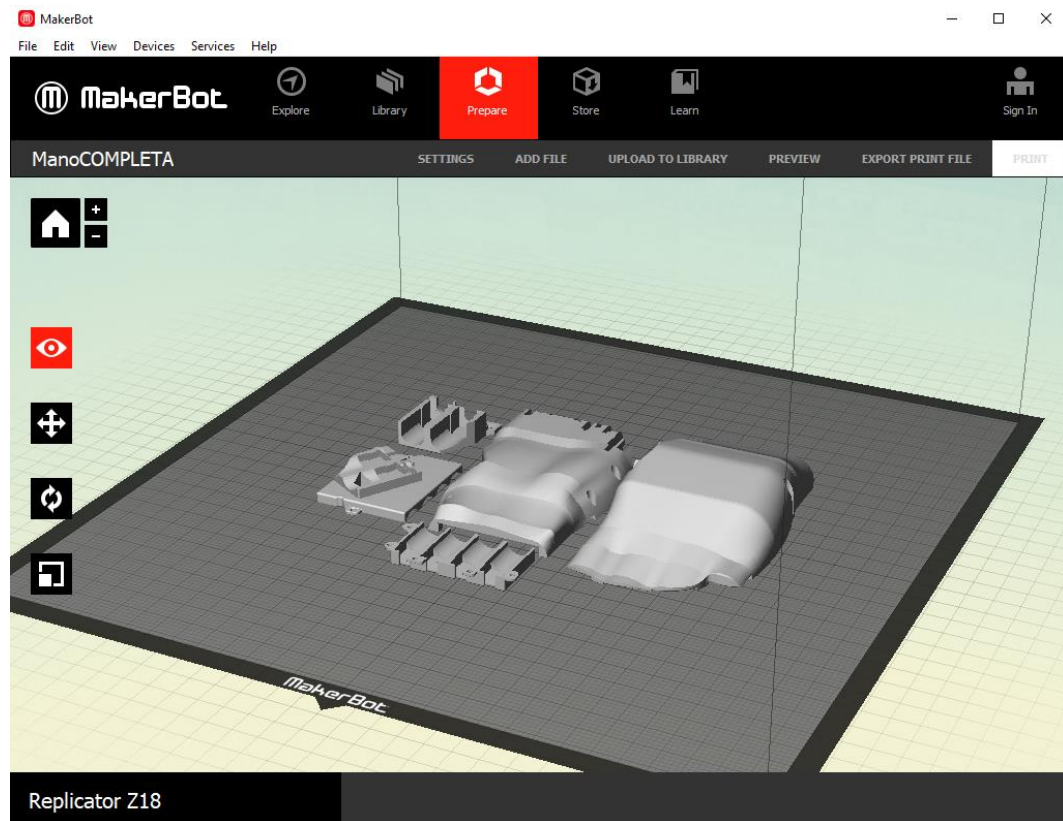


Ilustración 5: Makerbot Desktop.

Catia es una potente herramienta de diseño, fabricación e ingeniería (CAD, CAM, CAE). Para este proyecto se ha utilizado para desarrollar el modelado y ensamblaje de las piezas que componen la mano robótica.

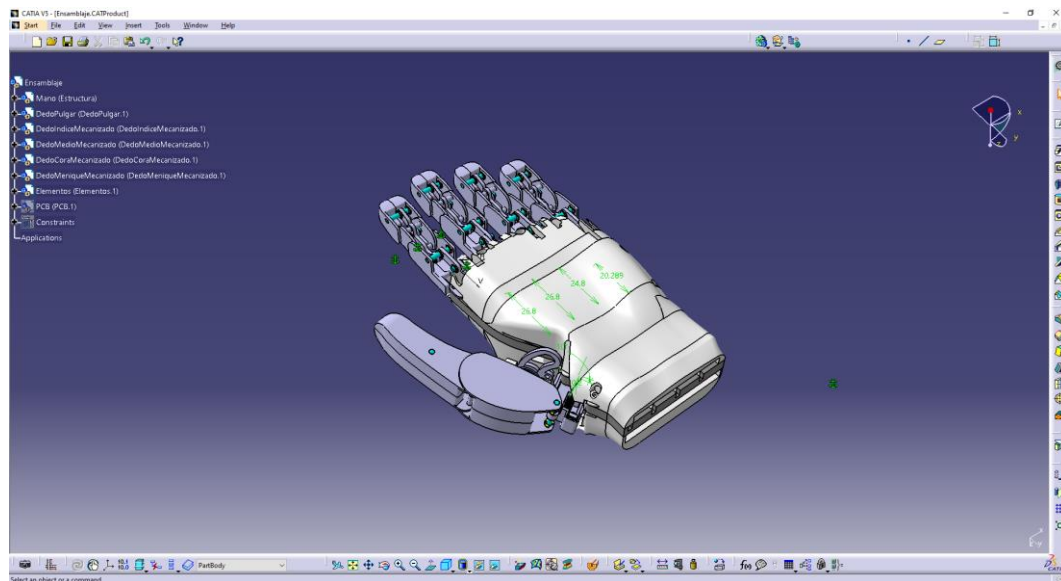
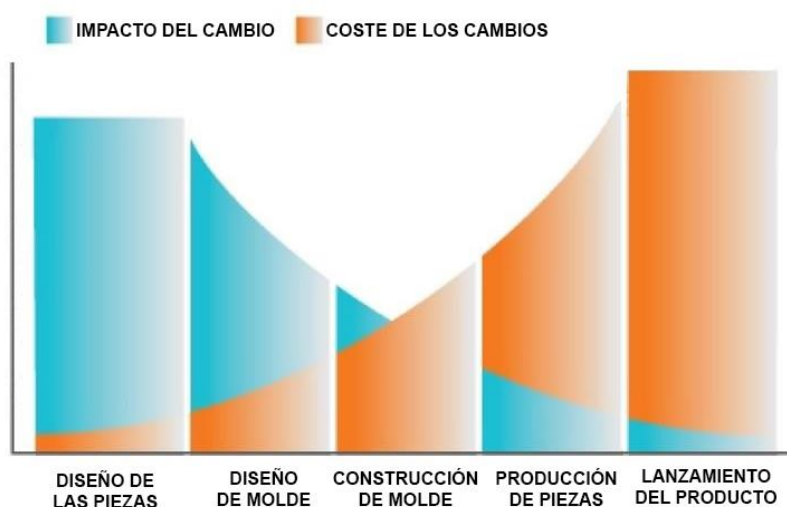


Ilustración 6: Catia V5-6R2018.

## 2. Estado del arte y trabajos relacionados.

### 2.1. Diseño para la fabricación y el montaje.

El concepto DFMA se basa en el proceso de diseñar productos, piezas o componentes para facilitar su proceso de fabricación y montaje. Esta metodología debe aplicarse en la etapa más temprana del diseño para poder identificar cuáles son las necesidades del producto.[1] Además, una correcta aplicación de este concepto conlleva a la reducción de costes, debido a que tal y como se muestra en la ilustración 7, los cambios en el diseño se vuelven más costosos y más difíciles de implementar a medida que las fases de diseño avanzan.[2]



**Ilustración 7: Representación de cómo afectan los cambios en el coste, a medida que el diseño avanza.[3]**

Esta metodología parte del concepto de DFA, que se basa en analizar un diseño ya sea existente o conceptual para simplificar su proceso de montaje. Que a su vez este concepto conlleva a tener en cuenta el proceso de fabricación DFM. El software CAD en 3D tiene una fuerte influencia en la fase de diseño del producto teniendo en cuenta el concepto de DFM. Además, existen software de modelado 3D que también combinan la tecnología CAM, luego es posible incorporar a un diseño el concepto DFMA por medio de este software.

El concepto de DFMA se tiene en cuenta en el ciclo de vida del producto, desde la etapa inicial de diseño y con la intervención de un equipo compuesto por diferentes expertos que permiten desarrollar un diseño teniendo en cuenta todas las fases del ciclo de vida de un producto. Se aplica generalmente en sectores de producción masiva como la automoción, la aeronáutica o la informática. Aunque también se puede aplicar para adaptar el diseño de una pieza, de forma que realizando un correcto rediseño se pueda reducir costes de fabricación y montaje.

Por lo tanto, DFMA se basa en un conjunto de metodologías y técnicas que mejoran un diseño o rediseño de una pieza o producto, a la hora de su fabricación y montaje.

## 2.2. Procesos de fabricación.

En este apartado se introducen los principales procesos de fabricación que se utilizan para el desarrollo y la fabricación de las piezas.

### 2.2.1. Fresado de aluminio.

El fresado de aluminio es considerado un tipo de mecanizado sencillo. Esto se debe a que la carga mecánica de la fresa es baja en comparación a la que se requiere para otros metales como el acero. Pero es fundamental utilizar una geometría de herramienta y unos parámetros de corte correctos, de esta forma se evitará que las propiedades del aluminio puedan generar problemas en el proceso de mecanizado.

El aluminio tiene una conductividad térmica elevada, esto hace que las virutas generen gran cantidad de calor en el proceso de mecanizado. Este calor generado es transmitido de las virutas al filo de corte de la herramienta, lo que supone que el filo de corte se exponga a una intensa fatiga térmica.[4]

Las propiedades del aluminio favorecen la aparición de los efectos BUL y BUE en la herramienta de corte. Las apariciones de estos efectos influyen en el desgaste de la herramienta y en el acabado superficial de la pieza. Para evitar este problema es necesario utilizar unos parámetros de corte que reduzcan el máximo posible la aparición de estos efectos.[5], [6]

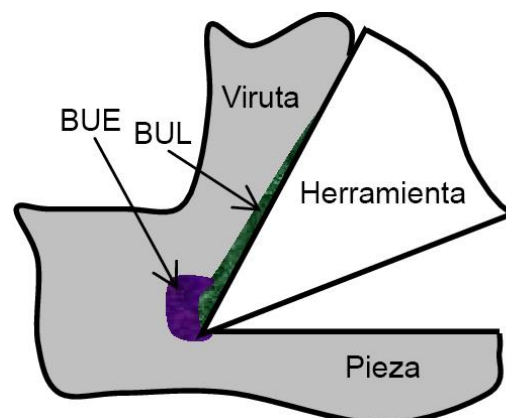


Ilustración 8: Representación de los efectos BUL y BUE en la herramienta de corte.[5]

La solución a estos problemas se centra en la elección de una herramienta correcta. Hoy en día los fabricantes de herramientas conocen y tienen en cuenta los problemas que supone el fresado de aluminio, luego los diseños de las herramientas tratan de reducir y suprimir estos problemas. Los fabricantes recomiendan utilizar herramientas con plaquitas intercambiables para fresar aluminio, el problema es que cuando se realizan trabajos de precisión este tipo de herramienta no es válido. Luego para aplicaciones más precisas cada fabricante desarrolla herramientas con más o menos filos y de diferentes materiales.

A pesar de la importancia de la herramienta si no se utilizan unos parámetros de cortes correctos el proceso de fresado puede ser tedioso también se complicaría el proceso de fresado. Por lo que es necesario tener en cuenta la geometría de corte de la herramienta, el estado del material a mecanizar

### 2.2.2. Mecanizado láser en metal.

Este proceso se basa en la utilización de un haz de láser para eliminar el material. El láser genera un haz de luz que no se dispersa y que centra toda su energía en un punto, ese haz crea altas temperaturas que ocasionan la eliminación del material.[7], [8] El mecanizado láser en metal tiene la ventaja de que es un proceso rápido y preciso. Permite poder realizar operaciones con una precisión inalcanzable para otros procesos de mecanizado.

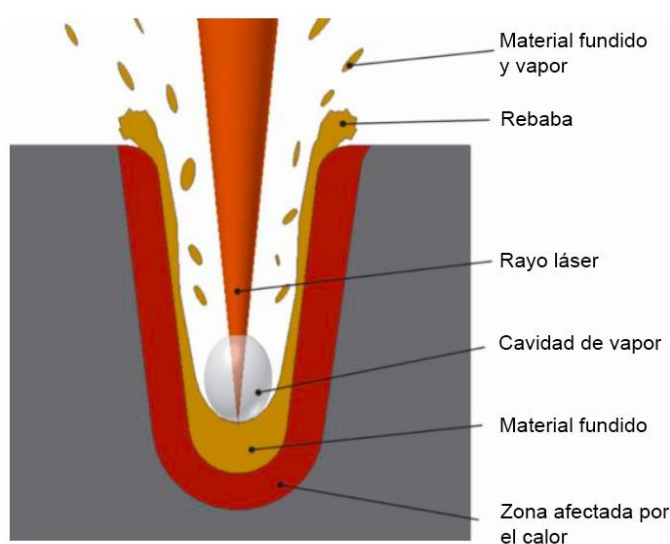


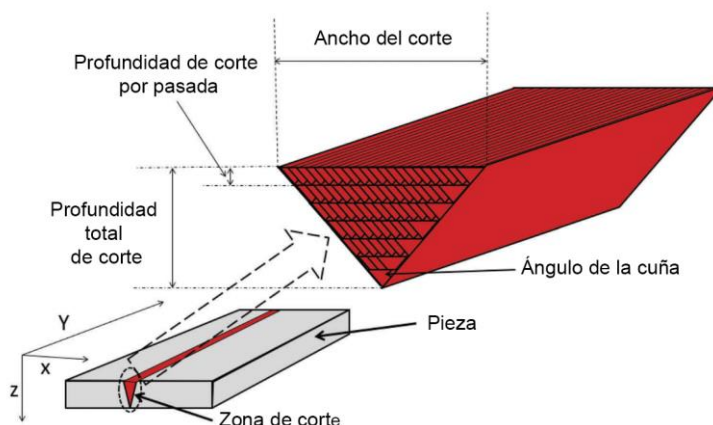
Ilustración 9: Representación del mecanizado láser.[7]

Existen dos tipos de máquinas láser dentro de las que se utilizan actualmente para mecanizar en metal, estas son de CO<sub>2</sub> y de fibra.

Las máquinas láser de CO<sub>2</sub> se basan en utilizar un método gaseoso para generar el láser, en este caso el dióxido de carbono. Por medio de espejos ópticos y el control numérico, se logra controlar y dirigir el láser hacia la posición que se requiere. Este tipo de láser permite cortar otros tipos de materiales como: plásticos, madera, piedra, vidrio y textiles.

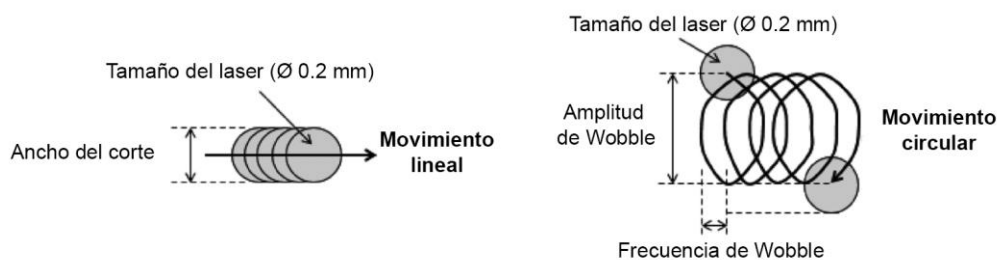
Las máquinas láser de fibra son más actuales y mejoran el rendimiento de las de CO<sub>2</sub>, ya que consiguen desarrollar el doble de potencia. Por lo que a la hora de cortar metales es preferible utilizar este tipo de máquinas. Esto se debe a que el corte que realiza es más preciso y con mayor rapidez. Además de que es más sostenible con el medio ambiente, ya que este tipo de láser convierte un 70-80% de la energía que consume.[8] Su funcionamiento se basa en generar y guiar el rayo láser por medio de una fibra activa.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de aplicar este tipo de tecnología es el perfil de corte que genera el láser. Este perfil de corte siempre va a estar sometido a defectos, como son: la porosidad, el relleno insuficiente y el ángulo de la una cuña de corte.[9] A medida que el láser profundiza el ángulo que se genera es mayor, tal y como se muestra en la ilustración 10.



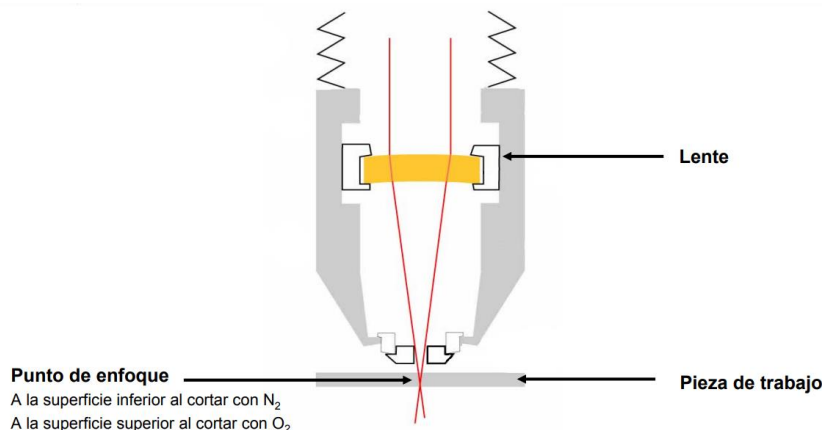
**Ilustración 10: Ángulo de la cuña generado.[9]**

Existen diferentes parámetros de corte que permiten corregir y tratar los defectos mencionados anteriormente. Estos parámetros son la frecuencia y la amplitud de Wobble, se basan en generar rotaciones oscilantes de alta frecuencia en la lente del láser.[10] Básicamente lo que controlan estos parámetros es el movimiento circular que generan en el láser, tal y como se representa en la ilustración 11.



**Ilustración 11: Representación de los parámetros de Wobble.[10]**

Otro aspecto fundamental es el enfoque del láser, que se basa en que haya la distancia correcta entre la pieza y el cabezal de láser. El rayo láser que generan las máquinas pasa por una lente focal que es la encargada de dirigir el rayo a una posición concreta. Esta lente actúa de lupa y converge el rayo a un punto determinado y preciso. Por tanto, si el láser no está colocado en la posición correcta no incidirá de forma adecuada.



**Ilustración 12: Representación de cómo actúa la lente en el láser.**

### 2.2.3. Impresión 3D.

La tecnología de impresión 3D permite a un sector como el de las prótesis poder desarrollar componentes y prototipos para diferentes aplicaciones. La impresión 3D tiene la capacidad de poder fabricar piezas personalizadas y sofisticadas, además del potencial de facilitar el proceso de diseño. La fabricación aditiva permite que la adquisición de las prótesis sea más accesible. Esto se debe a que personas que no disponen de medios económicos se ven en la situación de no poder costear los altos precios de las prótesis convencionales.[11]–[13]

Además, la impresión 3D facilita el proceso de desarrollo de prototipos. Esto se debe a que esta tecnología es la más rápida, barata y fácil de emplear para el desarrollo de prototipos. Permite poder desarrollar prototipos incluso funcionales, por lo que se puede verificar que el diseño cumple con los requisitos establecidos.[12]–[14]

El crecimiento a ritmo elevado en el que se encuentra la fabricación aditiva hace que se reconozca como una de las tecnologías habilitadoras para la industria 4.0. Por lo que cada vez son más sectores los que se influyen de su aplicación para el desarrollo de nuevos diseños.[15], [16]

La decisión de utilizar esta tecnología dependerá de factores como el material o la funcionalidad que requieran las piezas a fabricar. Dentro de la impresión 3D existen diversos tipos de tecnología de fabricación aditiva. Las tecnologías con mayor campo de aplicación para el ámbito del proyecto son: FDM, SLA y SLS.

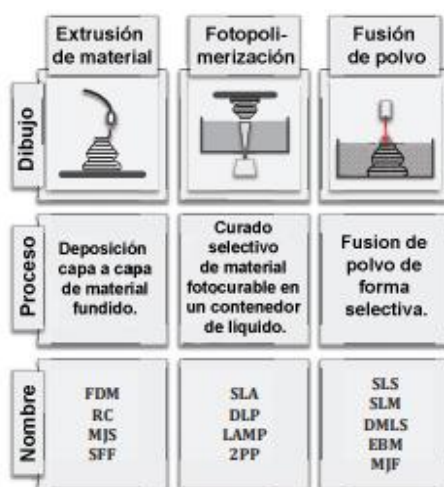


Ilustración 13: Principales tecnologías de impresión 3D.[15]

La tecnología FDM se basa en un extrusor que deposita capa a capa el filamento para generar la pieza en el área de impresión. En este tipo de tecnología se pueden usar diferentes filamentos termoplásticos, normalmente los utilizados son: PLA, ABS y TPU. Las piezas que se fabrican con este proceso son adecuadas para desarrollar prototipos o modelos básicos, debido a que son piezas de bajo coste y con una resolución menor por lo que su funcionalidad se reduce.[17]

La SLA utiliza un láser para curar la resina que se encuentra en estado líquido. De esta forma la resina se convierte en plástico endurecido por la fotopolimerización que genera el láser. Esta tecnología ofrece el mayor grado de precisión y acabado de todas las

tecnologías de impresión 3D, lo que permite poder desarrollar piezas más funcionales y en materiales de diferentes propiedades.[14]

Las impresoras con tecnología SLS utilizan un láser que requiere de una alta potencia para fundir y unir el polvo de polímero. Un aspecto positivo de este tipo de impresión es que no requiere de material de soporte, debido a que el material que no es fundido se mantiene en polvo y hace la función de soporte.[15] Luego la impresión por SLS es ideal para fabricar piezas que requieren de geometrías muy complejas. Además, las piezas tienen unas buenas propiedades mecánicas y de resistencia. Normalmente se suele utilizar nailon en esta tecnología, debido a las buenas propiedades mecánicas que tiene.

### **2.3. Materiales.**

Los materiales que se han utilizado para la fabricación de prótesis y manos robóticas han ido evolucionando.[18] Las primeras prótesis pasivas fueron fabricadas en madera, pero en la actualidad los materiales utilizados han ido mejorando a medida que la tecnología ha ido evolucionando.

Desafortunadamente no existe un único material que reúna un conjunto ideal de propiedades para el desarrollo de una mano robótica, luego es necesario utilizar diferentes materiales en función a los requisitos de cada pieza que conforma la mano. A la hora de seleccionar el material para fabricar una pieza es fundamental tener en cuenta diferentes requisitos, como pueden ser el coste, la funcionalidad, el peso o la maquinabilidad. Los requisitos influyen en que la elección final debe ser lo más óptima y acertada posible.

#### **2.3.1. Metales.**

Dentro de los metales los más empleados para el desarrollo de prótesis son el titanio y el aluminio. Otros como el acero, cobre, hierro y magnesio son menos utilizados. [19], [20] Los metales normalmente son comparados con los plásticos debido a la diferencia de peso existente entre ambos, a la hora de fabricar una prótesis o una mano robótica es fundamental tener en cuenta que el peso debe de estar dentro de los límites antropométricos de la extremidad a replicar. Luego los metales ligeros son adecuados para cumplir con este requisito y es por ello que el aluminio es el metal más utilizado en el desarrollo de prótesis pediátricas.[21]

Las aleaciones de aluminio y las de titanio son utilizadas ampliamente en la biomedicina. Su amplia aplicación se debe a las excelentes propiedades que tienen, como son: su bajo peso, la resistencia a la corrosión y la relación resistencia/peso. Además, ambas se pueden alear para mejorar sus propiedades mecánicas. [20] La principal diferencia entre ambas es que la aleación de titanio tiene mejor resistencia y un módulo de elasticidad menor, que le hace tener unas propiedades similares al hueso humano. Aunque el coste de las aleaciones de titanio es mucho mayor.

Luego el coste de la aleación de aluminio es menor y cumple correctamente con los requisitos, de ahí que tengan una mayor aplicación. Normalmente dentro de las aleaciones de aluminio la más aplicada es la 2024, que proporciona bajo peso, alta resistencia a la corrosión y un buen acabado.[18]

### 2.3.2. Plásticos.

Los plásticos no se suelen aplicar en la parte estructural y funcional de las prótesis. Normalmente se utilizan para piezas que no se van a someter a cargas o esfuerzos grandes.[18] Los plásticos también se utilizan para el desarrollo de prototipos, debido a que por medio de tecnologías de impresión 3D se obtienen prototipos funcionales y de bajo coste.

El crecimiento de la tecnología de la impresión 3D ha permitido una revolución en la fabricación de las prótesis. La facilidad con la que se pueden extruir, fundir o moldear los plásticos permite darle a la prótesis un aspecto y acabado final mejor. Además, el peso es una condición a tener en cuenta en el desarrollo de una prótesis, luego los usos de plásticos permiten reducir el peso.[22]



Ilustración 14: Ejemplos de manos robótica de plástico.[11]

Actualmente existe una tendencia creciente hacia el uso de la fabricación aditiva para el desarrollo de prótesis y manos robóticas. [11], [13], [17] Por medio de materiales como el ABS o el PLA se logra: obtener piezas ligeras con buena resistencia, reducir los tiempos de producción y bajar los costes de fabricación. Materiales como el ABS, PLA, TPU y Nailon permiten poder desarrollar prototipos y piezas funcionales, ya que reúnen las propiedades necesarias para varios requisitos.[18]

### 2.3.3. Compuestos.

La fibra de carbono es uno de los materiales compuestos utilizados para desarrollar prótesis de alto rendimiento. Es decir, este tipo de prótesis están destinadas a aplicaciones en las que los requisitos son más exigentes que a los que se someten una prótesis normal.[23], [24] Este material permite una reducción considerable del peso manteniendo una gran resistencia, pero la principal desventaja es que implica un elevado coste.

Actualmente la fabricación aditiva ofrece la posibilidad de reducir los problemas asociados al coste de la fibra de carbono. Se han desarrollado filamentos basados en PLA, ABS, Nailon o PETG con relleno de fibra de carbono o vidrio. De esta forma se mejoran las propiedades del filamento, pero se necesita de extrusores específicos para poder utilizar este tipo de material.[24], [25] Una reciente investigación se basa en desarrollar un fotopolímero líquido que incorpora fibras de carbono o vidrio, lo cual podría aumentar la aplicación de este tipo de material.[26]

### **2.3.4. Otros materiales.**

Las siliconas son aplicadas en las partes que proporcionan comodidad al uso de la prótesis. Este material es biocompatible, luego se utiliza en piezas de encaje y revestimiento. Es considerado el material que ha facilitado el avance más significativo de las prótesis pasivas, debido a que mejoró a la madera. [19]

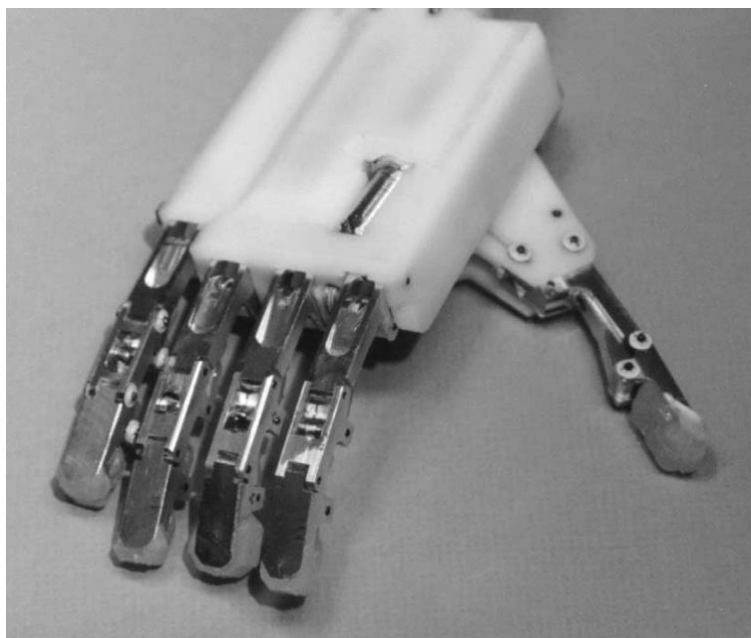
## **2.4. Manos robóticas más actuales.**

A continuación, se realizará una introducción de diferentes conceptos de manos y prótesis robóticas de proyectos de investigación, debido a que son de las que más información se pueden obtener.

Se analizará de cada una de ellas los siguientes aspectos: peso, número de actuadores que tiene, velocidad de actuación, la capacidad de movimiento que tienen los dedos, procesos de fabricación y materiales que utilizan.

### **2.4.1. TMB Hand.**

La TMB Hand es un proyecto de investigación del 2001 basado en desarrollar una prótesis de mano robótica con mayor funcionalidad y con aspectos antropomórficos. La mano es utilizada por niños de siete a once años. Utiliza un único actuador, basado en un motor de DC para mover los cinco dedos de la mano, con un tiempo de respuesta de 4-5 segundos y con un peso de 280 gramos.[27] En cuanto a funcionalidad de los dedos puede realizar un agarre adaptativo con los cinco dedos. Se fabrica por medio de mecanizado de aluminio 6061. [28]



**Ilustración 15:TMB Hand.[28]**

### 2.4.2. RTR II.

Este proyecto data del 2002 y trata de desarrollar una prótesis de mano que mejore los agarres de las manos existentes de esa época, que permita mayores tipos de agarres. Para ello introduce un diseño que se diferencia en que presenta tres dedos. Esta mano pesa 350 gramos, cuenta con dos actuadores de tipo DC con un tiempo de respuesta de un segundo.[27] Permite poder realizar nuevos tipos de agarres, debido a que un actuador sirve para el movimiento de abducción-aducción del pulgar y el otro para flexionar-extender los tres dedos. Se desarrolló un prototipo que no era funcional completamente, luego se desconoce cuáles fueron los procesos de fabricación y materiales.[29]

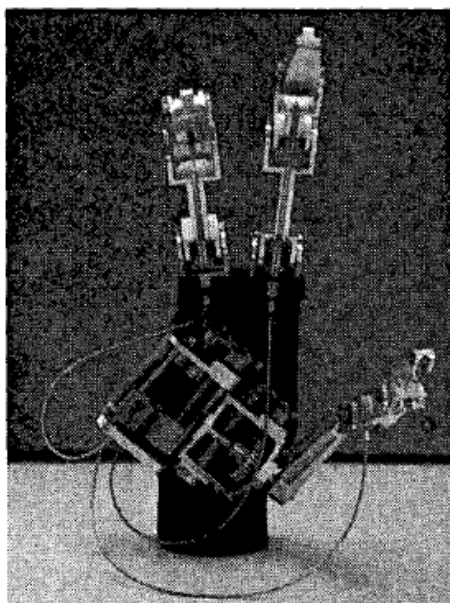


Ilustración 16: RTR II.[29]

### 2.4.3. Keio Hand.

Este proyecto de investigación fue desarrollado en 2008, con el objetivo de desarrollar una mano robótica que mejore las existentes basadas en pinzas. Presenta un diseño de cinco dedos que permite agarrar objetos de diferentes geometrías. Se desarrolló un prototipo que pesaba 730 gramos, con un solo actuador de tipo ultrasónico y un tiempo de respuesta de 1 segundo.[27] En cuanto a funcionalidad permite el uso de los cinco dedos, con un grado de libertad cada uno de ellos. El pulgar se coloca en contraposición al resto de dedos para poder hacer agarres de geometrías pequeñas, pero cuando la mano está abierta queda en una posición extraña.[30]

### 2.4.4. SmartHand.

La SmartHand es un proyecto de investigación del año 2009 en el que se desarrolló una mano antropomórfica con 16 grados de libertad. Con un peso de 520 gramos, con cuatro actuadores de tipo DC para diferentes movimientos y un tiempo de respuesta de 1.5 segundos.[27] Un actuador para el dedo índice, dos para el pulgar y uno para el resto de dedos, para poder realizar un gran rango de movimientos. La fabricación de las piezas del prototipo se basa en un proceso de mecanizado aluminio. Las piezas que se van a someter a esfuerzos críticos son mecanizadas en acero inoxidable AISI 430.[31]

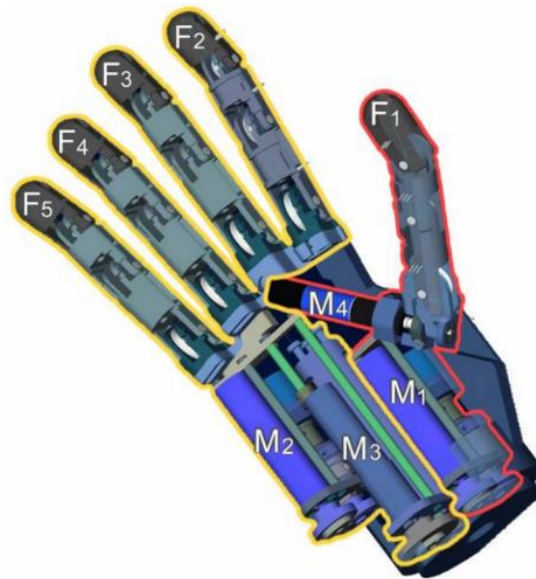


Ilustración 17: SmartHand.[31]

#### 2.4.5. Vandervilt Multigrasp.

La prótesis de mano Vandervilt es un proyecto que se desarrolló en el 2014 y es un rediseño del modelo anterior. Este rediseño pasa a cuatro motores de DC localizados en la palma de la mano para mover los dedos que tienen nueve grados de libertad. Tiene un peso de 580 gramos y una velocidad de respuesta de 0.5-1 segundos.[32] Esta prótesis está diseñada para poder realizar diferentes tipos de agarres, debido a que utiliza dos motores para el pulgar, un motor para el dedo índice y uno para el resto de los dedos. Se fabrica completamente por impresión 3D en PLA.

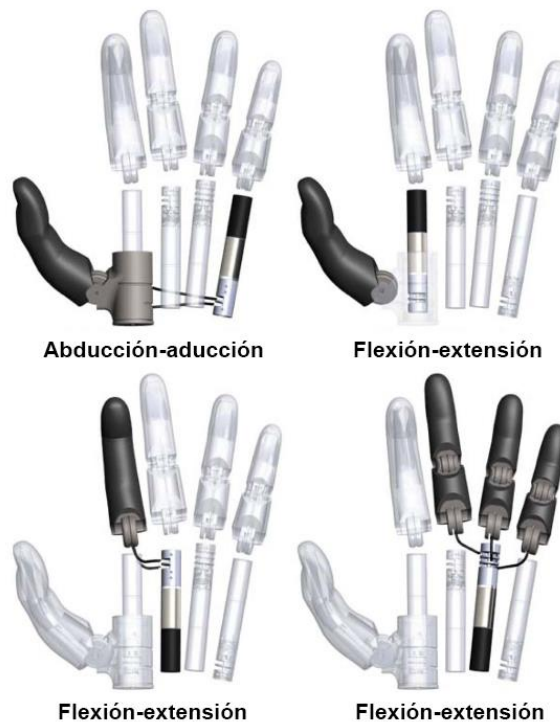


Ilustración 18: Vandervilt Multigrasp.[32]

#### 2.4.6. DEKA Hand.

Este proyecto nace con el objetivo de desarrollar una prótesis de brazo que tenga una funcionalidad similar a la de un brazo humano. Este tipo de dispositivo tiene múltiples grados de libertad, que permiten al usuario poder realizar diferentes agarres. Dispone de 10 grados de libertad motorizados que permiten el movimiento de todas las articulaciones que componen un brazo. Existen tres tipos de configuraciones en función al tipo de amputación del paciente. La configuración para amputados transradiales tiene un peso de 1.3 kg. La mano es fabricada en aluminio por medio de mecanizados y se le coloca un guante cosmético de silicona para mejorar su aspecto. [33]

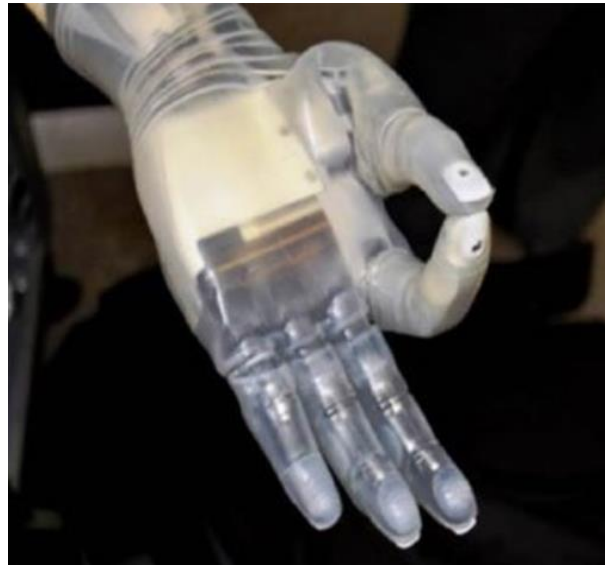


Ilustración 19: DEKA Hand.[33]

#### 2.4.7. Hannes Hand.

Este concepto de prótesis de mano trata de ser excepcionalmente similar a una mano real, para evitar la alta tasa de abandono que tienen las prótesis actualmente. Esto se debe a que las manos robóticas más avanzadas con varios grados de libertad no consiguen la adaptabilidad, destreza y complejidad que tienen una mano real. La mano Hannes incorpora un diseño antropomórfico y un comportamiento similar al de la mano humana.[34]

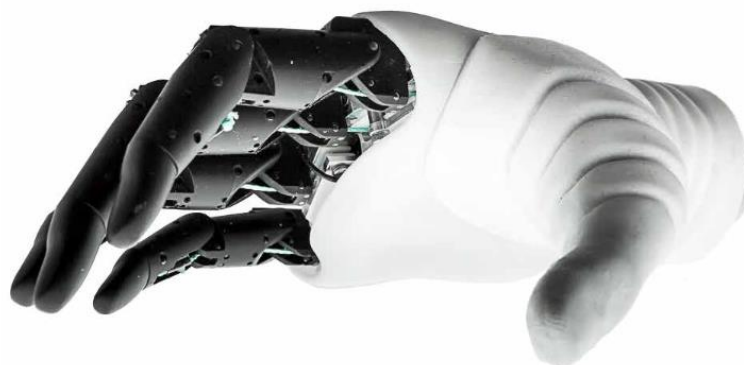


Ilustración 20: Hannes Hand.[34]

## 2.5. Conclusión de la búsqueda de información.

Tras la búsqueda de información presentada, en este apartado se busca analizar y obtener diferentes conclusiones. Estas conclusiones se obtienen para descubrir cuáles son los requisitos que no cumplen las manos actuales.

Un aspecto diferencial es la poca funcionalidad de la que disponen las prótesis dirigidas a niños que se distribuyen en el mercado actualmente. Tienen como problema la poca movilidad que le proporciona para agarrar objetos como un vaso o un juguete. Los niños encuentran dificultades a la hora de utilizar las prótesis ya que no pueden agarrar objetos de uso cotidiano. Esto se debe a que la geometría del objeto supera las posibilidades de agarre de la prótesis. El desarrollo del diseño de este proyecto tratará de resolver dicho problema, tratando de mejorar la funcionalidad y el agarre de las prótesis existentes.

Otro problema detectado es la funcionalidad del dedo pulgar, la mayoría de manos dirigidas a niños no disponen de dedo pulgar con movilidad. Por tanto, en este proyecto se tratará de desarrollar un diseño de dedo pulgar que permite múltiples tipos de agarres.

Tras analizar diferentes diseños de manos y artículos, es fundamental el aspecto estético de la mano. Hasta las prótesis de mano con varios grados de libertad reciben una tasa de abandono alta, esto se debe a que los diseños no tienen similitud a la mano humana. Por lo que el diseño debe de tener una forma, peso y medidas antropomórficas similares a la de una mano para evitar este problema.

En cuanto a los diseños de prótesis desarrollados en proyectos de investigación que se han introducido anteriormente algunas solucionan algunos de los problemas expuestos. Pero no hay ninguna que los solucione todos, debido a que algunas no cumplen con un diseño antropomórfico o son manos dirigidas a adultos.



Ilustración 21: Tipos de agarre básicos.

En base a estos problemas se tratará de desarrollar un diseño de mano robótica que los solucione. Se puede llegar a desarrollar las siguientes conclusiones:

La mano robótica deberá de permitir realizar los principales tipos de agarres más básicos, que son los presentados en la ilustración 21. Para poder solucionar este problema la mano deberá de disponer de un rango de movimiento en cada dedo como mínimo y el dedo pulgar disponer de dos rangos.

La mano robótica deberá mantener el peso, las dimensiones y una estética similar a la de una mano real de un niño.

### 3. Metodología.

#### 3.1. Planificación.

Este proyecto nace del diseño de mano robótica presentado en el TFG con nombre “diseño y desarrollo del mecanismo de las barras internas de los dedos de una mano robótica para niños de corta edad”. Este trabajo se basó en desarrollar un diseño de barras internas que dieran funcionalidad a los dedos de una mano robótica.

Este diseño de barras internas se mantendrá en este proyecto, pero se adaptará para que sea fabricable, debido a que en el anterior trabajo no se llegó a contemplar la fabricabilidad del diseño. Por lo tanto, este proyecto se iniciará con definir los requisitos que deberá de cumplir. Posteriormente se pasará a la fase de diseño en la que se deberá de desarrollar un diseño que cumpla con los requisitos definidos. Una vez obtenido el diseño se pasará a una fase de prototipado por medio de tecnología de impresión 3D. Tras desarrollar el prototipo se verificará su funcionalidad, dimensiones y estética que cumplan con los requisitos demandados. Finalmente se concluirá con la la fabricación y el montaje de una mano robótica en los materiales finales.

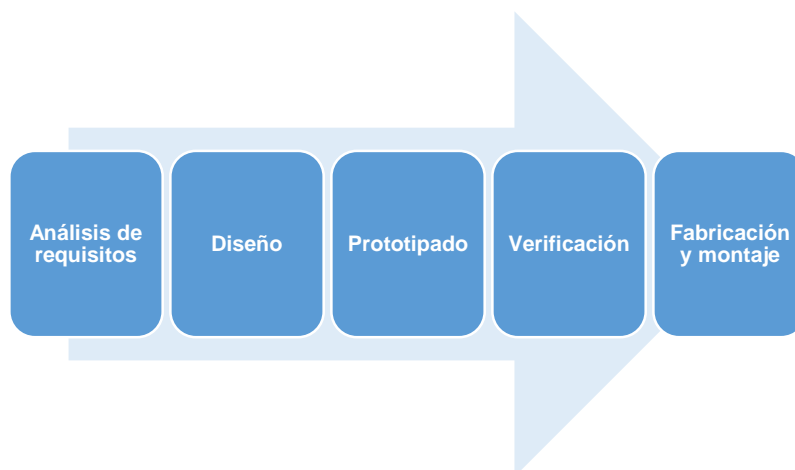
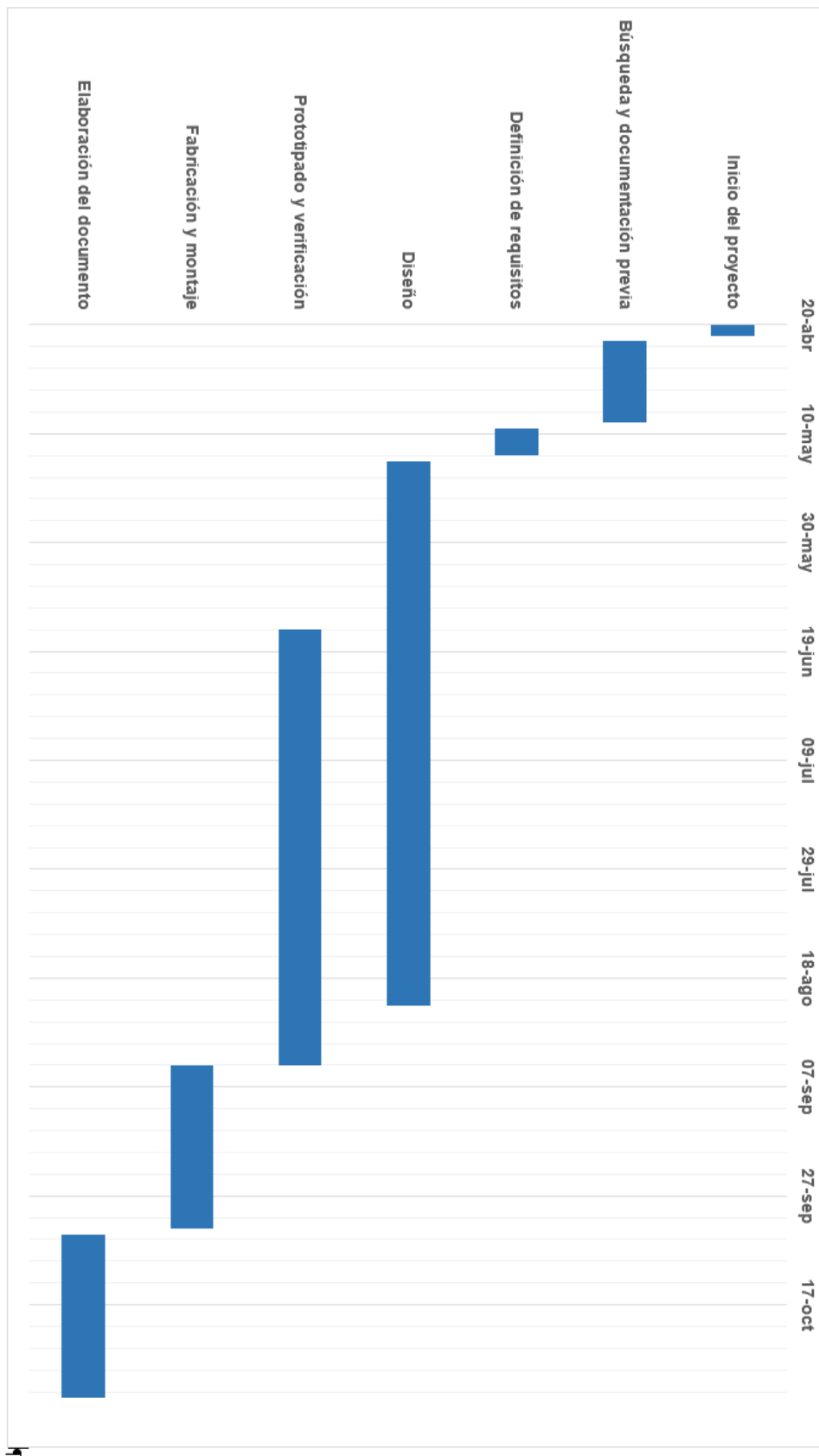


Ilustración 22: Planificación del proyecto.

Tabla 1: Distribución del tiempo en cada actividad.

Actividad	Fecha inicio	Duración en días	Fecha fin
<b>Inicio del proyecto</b>	20-abr	2	22-abr
<b>Búsqueda y documentación previa</b>	23-abr	15	08-may
<b>Definición de requisitos</b>	09-may	5	14-may
<b>Diseño</b>	15-may	100	23-ago
<b>Prototipado y verificación</b>	15-jun	80	03-sep
<b>Fabricación y montaje</b>	03-sep	30	03-oct
<b>Elaboración del documento</b>	04-oct	30	03-nov

Tabla 2: Diagrama de Gantt.



## 3.2. Desarrollo del diseño de la prótesis.

En este apartado se introduce el proceso de diseño que se ha seguido para desarrollar el rediseño de la mano cumpliendo con los objetivos marcados.

### 3.2.1. Análisis de requisitos.

A partir de las conclusiones desarrolladas en el estado del arte y en función a los objetivos del trabajo se definen los siguientes requisitos:

En cuanto a requisitos generales es importante que el diseño cumpla con un aspecto estético y funcional que le haga parecer lo máximo posible a una mano real. Para ello la mano deberá de tener el mismo peso y dimensiones que una mano de un niño de 8 a 12 años. De esta forma se trata de evitar el posible rechazo que puede generar la estética de la mano.[35], [36] El diseño previo ya cuenta con las medidas antropomórficas de la mano, por lo que este trabajo de rediseño deberá de mantener estas condiciones dimensionales.

El diseño debe de permitir realizar agarres básicos, mostrados en la ilustración 23. Los dedos deberán de tener al menos un actuador cada uno de ellos, para de esta forma atribuirle un grado de movilidad independiente. Con este requisito se trata de mejorar la funcionalidad de la mano. Luego para el pulgar se utilizará un actuador para realizar el movimiento de flexión-extensión y otro actuador para realizar abducción-aducción del pulgar. Estos actuadores permiten lograr dotar de movimiento de oposición al dedo pulgar, que permite a la mano poder realizar los agarres habituales.

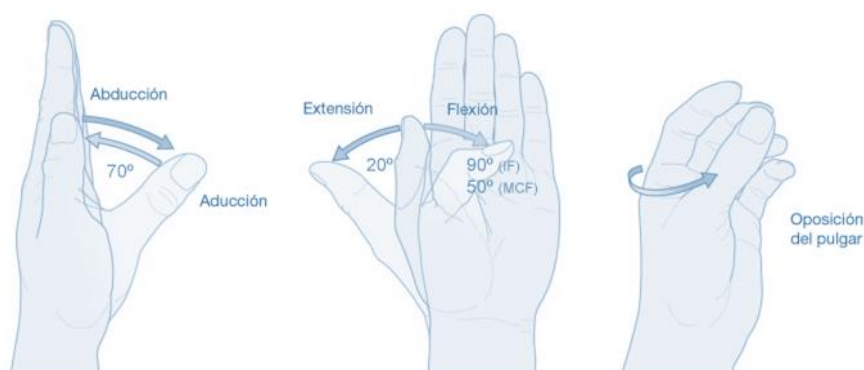


Ilustración 23: Movimiento del pulgar.[37]

Las piezas deberán de ser diseñadas siguiendo las metodologías de DFMA, que permiten desarrollar conceptos que se puedan fabricar y montar. Por lo que es evidente que, en el proceso de diseño, se deberá de tener presente cuál será el proceso de fabricación de cada pieza y cómo irá ensamblada con el resto. Para cumplir con este requisito previo a la fabricación de la mano se realizará un prototipo impreso en 3D para verificar que se cumple con este y el resto de los requisitos.

Para cumplir con los requisitos de peso es fundamental que se reduzca el peso de las piezas. Por lo que aquellas piezas que no se sometan a esfuerzos grandes serán fabricadas por fabricación aditiva, de esta forma se reducirá el peso y el coste. Además, el uso de la impresión 3D permite poder desarrollar piezas más complejas, luego las palmas de la mano serán fabricadas de esta forma para mejorar su aspecto estético.

### 3.2.2. Introducción al diseño previo.

En este apartado se introduce brevemente el diseño previo con el que se inicia este proyecto. El diseño previo nace de un trabajo de fin de grado que se fundamentó en desarrollar el diseño del mecanismo interno que genera el movimiento de los dedos para una mano robótica. Este diseño se basó en un mecanismo de barras internas que simulaba la trayectoria de un dedo real, a la hora de realizar el movimiento de flexión-extensión. En la siguiente ilustración se muestra una simulación de la trayectoria que recorre el dedo al realizar el movimiento de flexión-extensión, en el programa “Working Model 2D”.

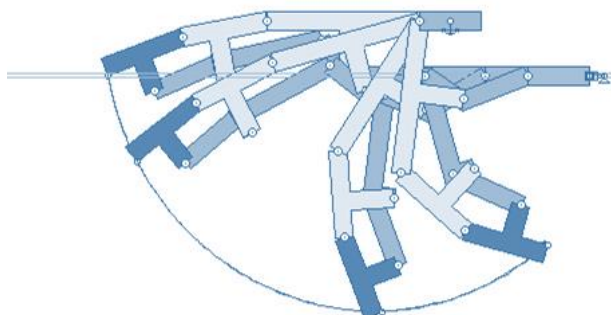


Ilustración 24: Simulación de la trayectoria del dedo diseñado.

El funcionamiento del dedo se basa en una barra acoplada a un actuador. Este actuador contiene un eje roscado y por medio de una tuerca se transmite el movimiento a la barra, de forma que cuanto el actuador gira la tuerca obliga a la barra a moverse de forma lineal. Las barras internas se encuentran conectadas entre ellas mismas y las falanges, de forma que cuando al mover la barra acoplada al actuador el resto de barras se mueven en sincronía siguiendo la trayectoria de un dedo.

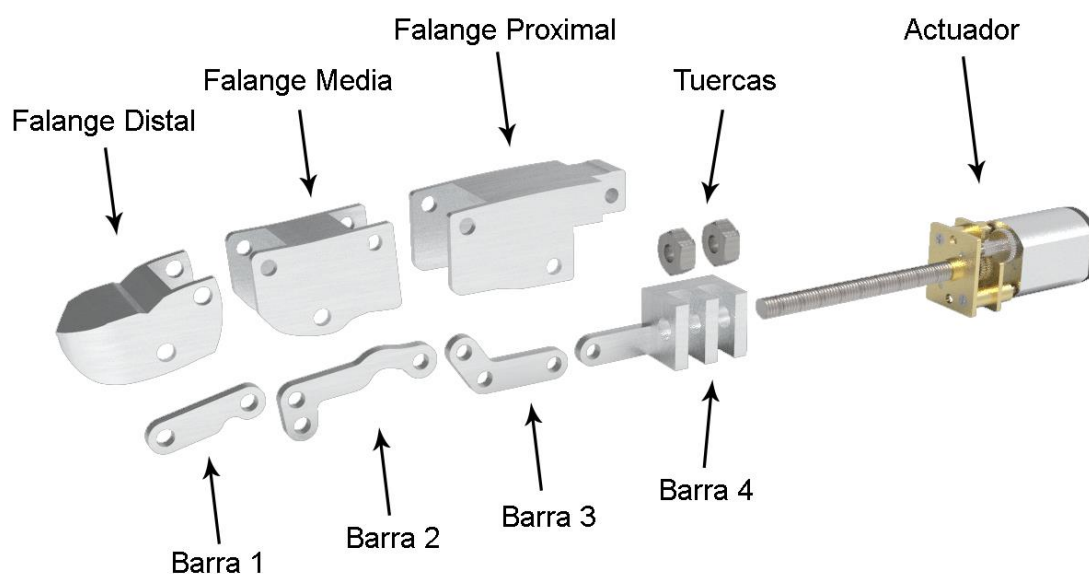


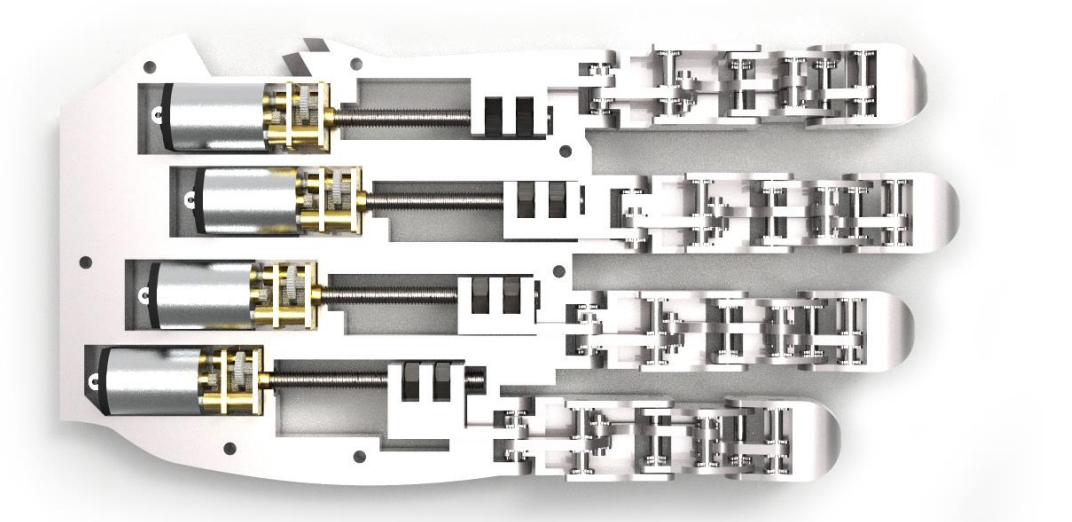
Ilustración 25: Explosionado de las barras que conforman el diseño del dedo.

Una vez desarrollado el diseño del mecanismo de las barras internas se pasó a mejorar la estética del dedo e implementarlo en una mano robótica. El diseño de los dedos se dividió en tres falanges y cuatro barras, tal y como se representa en la ilustración 26. Para el ensamblaje de los dedos se diseñaron ejes internos con arandelas de retención que permiten unir las falanges a las barras internas.



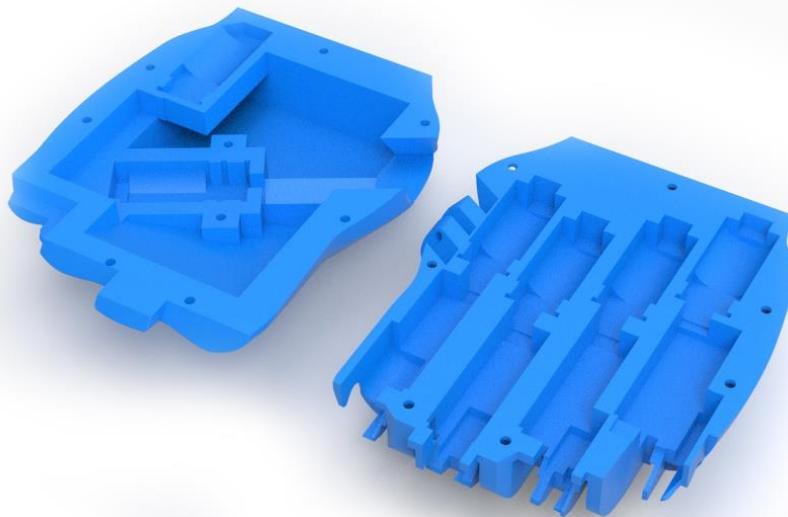
**Ilustración 26: Diseño del dedo.**

Tras desarrollar el diseño del dedo se pasó a su implementación en una mano robótica, para ello se desarrolló el diseño de la mano dividiéndola en tres partes: mano inferior, estructura media y mano superior. El diseño del dedo se decidió que fuera el mismo para todos los dedos para facilitar y optimizar su proceso de fabricación. De forma que cuando se colocan en la estructura media cada uno quede posicionado para que tenga la apariencia de la disposición de los dedos de una mano real.



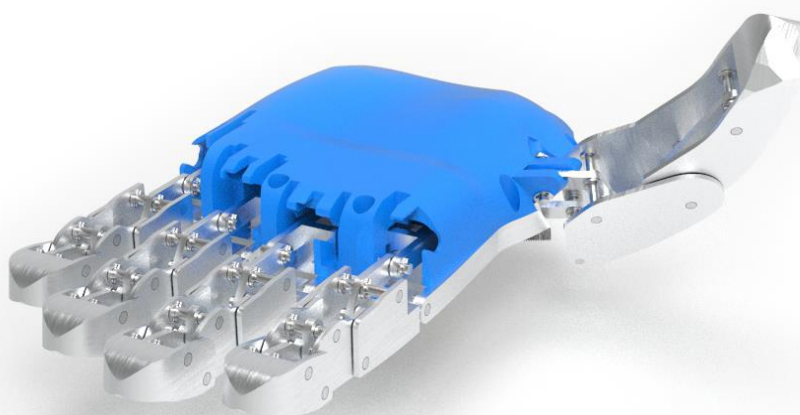
**Ilustración 27: Estructura media con los dedos ensamblados.**

Las piezas de la mano se diseñaron con las cavidades necesarias para ensamblar los actuadores de todos los dedos, además de los canales por los que se movían internamente las barras encargadas de sincronizar el movimiento de flexión-extensión de cada dedo.



**Ilustración 28: Diseño de la palma superior e inferior.**

En cuanto al diseño del dedo pulgar se basó en adaptar el mecanismo de barras internas desarrollado, pero simplificado a dos falanges únicamente. Por lo que solo tiene un grado de libertad, lo que limitaba el funcionamiento de la mano robótica. Para mejorar la funcionalidad se decidió ensamblar el pulgar a la palma inferior con un ángulo de inclinación de  $120^\circ$  con respecto al plano horizontal. Este grado de inclinación mejora la utilidad de la mano, de forma que permite realizar la mayoría de los agarres básicos.



**Ilustración 29: Colocación el ángulo de inclinación del dedo pulgar en la palma inferior.**

Finalmente, el diseño fue desarrollado e implementado en un prototipo fabricado por impresión 3D, se comprobó que el diseño cumplía con los requisitos de funcionalidad y estética establecidos. Por lo tanto, el diseño de la mano robótica cumplía con las dimensiones definidas y permitía realizar algunos de los agarres más básicos.

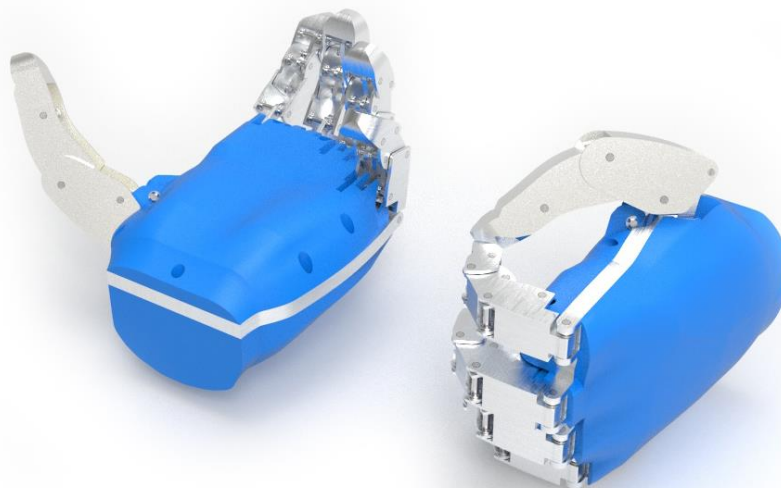


Ilustración 30: Diseño de la mano completa.

### 3.2.3. Fase de diseño.

En este apartado se presenta el rediseño que se le ha realizado a los dedos, las piezas de la mano y al dedo pulgar, introducidos en el apartado anterior. Es fundamental mencionar que a la hora de realizar este nuevo diseño se ha tenido en cuenta el concepto de DFMA, que no se contempló en el diseño anterior.

#### 3.2.3.1. Diseño de dedos

El diseño de las barras internas de los dedos es prácticamente similar al desarrollado en el trabajo anterior. Se ha realizado un cambio en la barra número cuatro, que es la que comunica el mecanismo de barras al actuador. El cambio se basa en utilizar una única tuerca, debido a que en el anterior diseño se utilizaban dos y en ocasiones se producían bloqueos en el mecanismo.

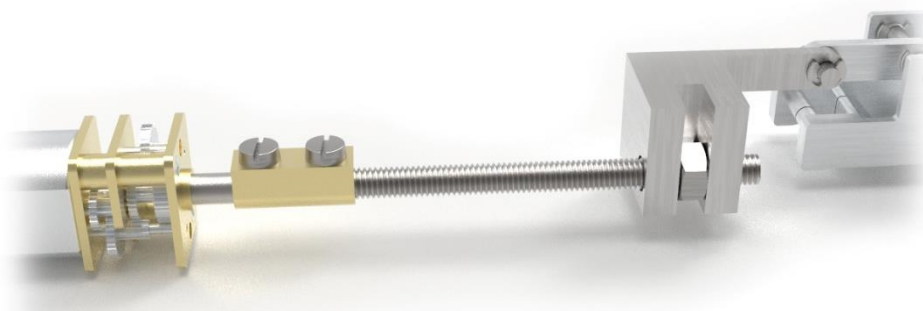
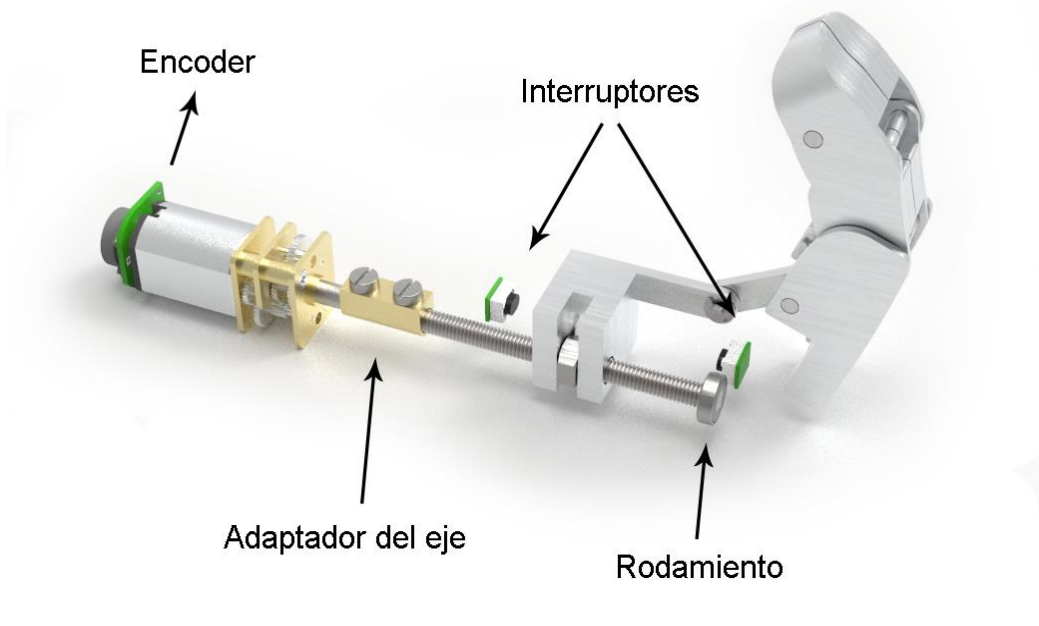


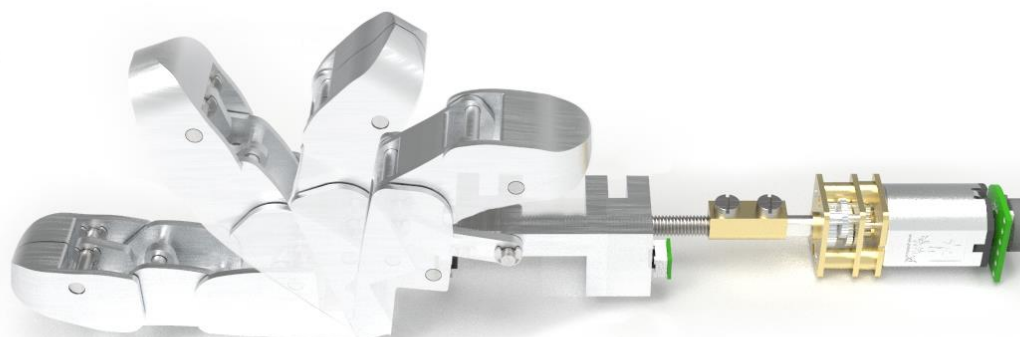
Ilustración 31: Pieza adaptadora del eje y rediseño de la barra cuatro del dedo.

Inicialmente el actuador era el motor Micrometal del fabricante Pololu, con un eje roscado M3. Para este diseño se decide utilizar el mismo actuador, pero con el eje simple y una caja reductora de 30:1. Se utiliza una pieza para adaptar el eje del motor que ofrece la oportunidad de utilizar un eje con el paso que se necesite. Además, al diseño del dedo se ha decidido añadirle: un rodamiento al eje para reducir la fricción, un encoder para controlar las vueltas del actuador y dos interruptores que hacen de límites de carrera.



**Ilustración 32: Modificaciones del diseño del dedo.**

De forma temporal se ha decidido utilizar un eje con rosca M3, debido a que al ser un paso métrico muy reducido (0,5mm) el actuador necesita de muchas vueltas para realizar el recorrido completo. Es por este motivo por el que se ha pasado a utilizar un actuador con eje simple y con un adaptador, para que como mejora futura tratar de solucionar este problema (Véase apartado 3.4.4).



**Ilustración 33: Recreación del movimiento del dedo.**

El principal cambio que se les ha realizado al diseño de los dedos es que se ha adaptado para que todas las barras y falanges sean completamente fabricables. De esta forma se ha dividido las barras correspondientes a las falanges por su eje de simetría, debido a que el anterior diseño no era posible de ser mecanizado en una CNC de tres ejes.

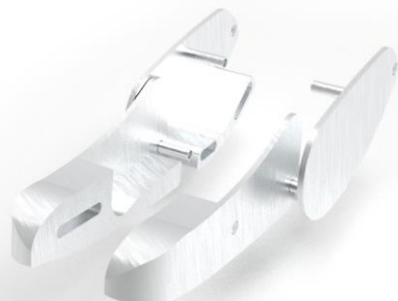
Además, durante el proceso de rediseño de estas piezas se ha tenido en cuenta su proceso de ensamblaje. Teniendo en cuenta el concepto de DFA se ha logrado obtener un diseño que facilita el proceso de montaje de las piezas y se han reducido el número de ejes que se necesitan. Se han añadido diferentes puntos de anclaje en las piezas para agilizar y facilitar su proceso de unión. En la ilustración 34 se muestran los cambios a los que se han sometido el diseño de una de las piezas del dedo, para facilitar su ensamblaje y fabricación.



**Ilustración 34: Rediseño de una de las piezas teniendo en cuenta el concepto de DFMA.**

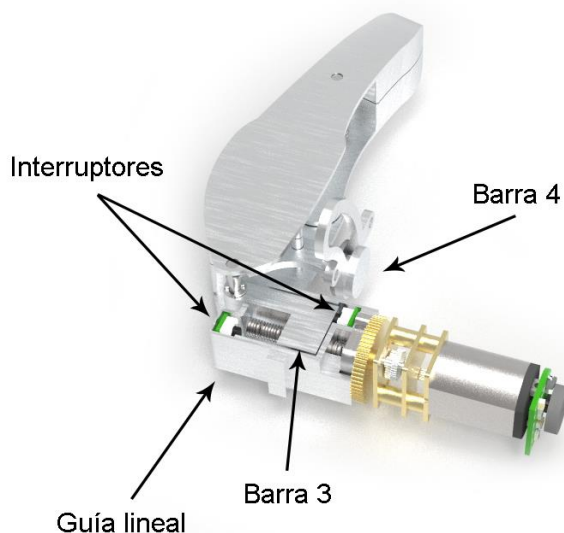
### **3.2.3.2. Diseño del dedo pulgar**

El concepto del diseño de las barras internas se ha mantenido para el dedo pulgar. En el proceso de rediseño se han cambiado las formas de las barras internas y las falanges, para que el rango de movimiento de la flexión-extensión sea lo más funcional posible. Los conceptos que se han aplicado para el proceso de rediseño de los dedos también se han aplicado a los dedos del pulgar, correspondientes al rediseño de las piezas para facilitar su proceso de fabricación y ensamblaje.



**Ilustración 35: Rediseño de las falanges del pulgar.**

Para el movimiento de flexión-extensión del dedo pulgar se mantiene el actuador Micrometal de Pololu con un eje roscado M3. La barra número tres se ha rediseñado para que se mueva por dentro de un nuevo diseño de guía lineal. Esta guía es la encargada de obligar que se mueva de forma lineal a la barra tres, en ella se colocan los dos interruptores de límites de carrera. Esta guía se encuentra bloqueada por la pieza de la mano superior para evitar que se pueda desplazar de forma lineal cuando se acciona el actuador, debido a que fue un detalle que se detectó en la fase de prototipo y verificación. (Véase apartado 3.3).



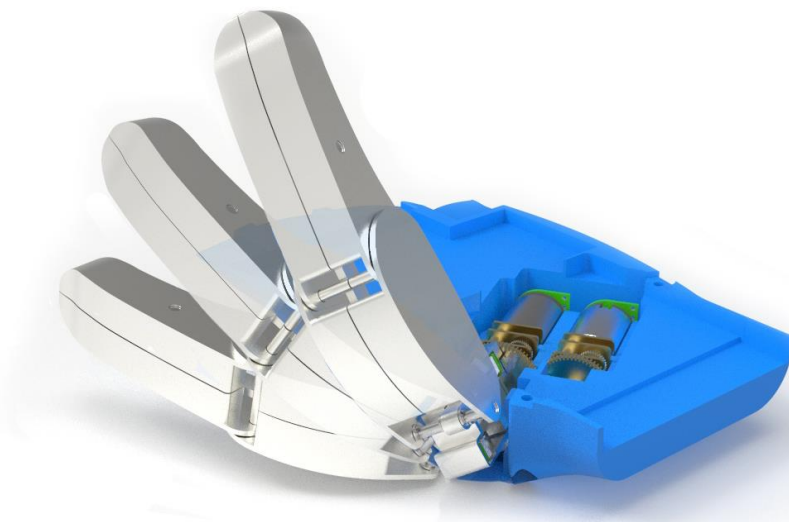
**Ilustración 36: Dedo pulgar con el actuador encargado del movimiento de flexión-extensión.**

Se ha dado un grado de movimiento más al diseño de dedo pulgar para ello se ha añadido otro actuador similar con una reductora de 30:1 y el eje simple que tiene un chaflán. Este actuador transmite su movimiento por medio de un engranaje acoplado a su eje. El movimiento del engranaje se transmite a la guía lineal por medio de otro engranaje y de esta forma la guía obliga a la barra tres a girar, por lo que se transmite el giro al dedo. Para transmitir el giro de un engranaje a otro se ha diseñado una pieza que encaja con la guía lineal y el engranaje (Véase apartado 3.4.2).



**Ilustración 37: Dedo pulgar con los dos actuadores.**

La barra cuatro del dedo pulgar es la encargada de ejercer la función de punto fijo a la hora de realizar el movimiento de flexión-extensión, debido a que la guía de giro se encuentra fijada a la pieza de la mano superior. Para el movimiento de giro esta barra es la encargada de moverse sobre la mencionada guía.

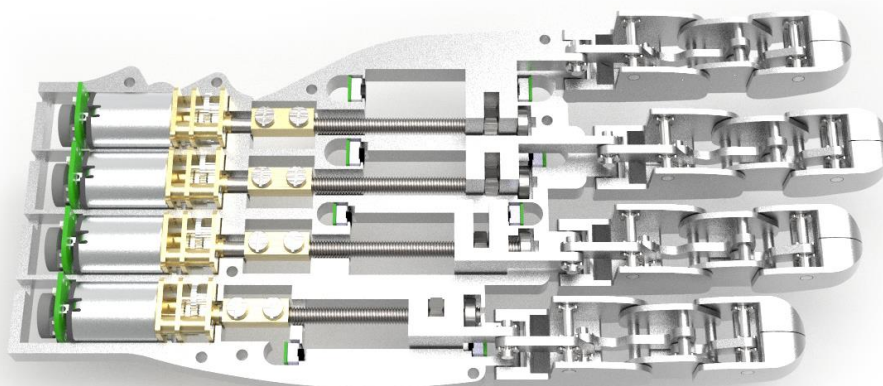


**Ilustración 38: Movimiento de abducción-aducción del pulgar.**

### 3.2.3.3. Diseño de la mano.

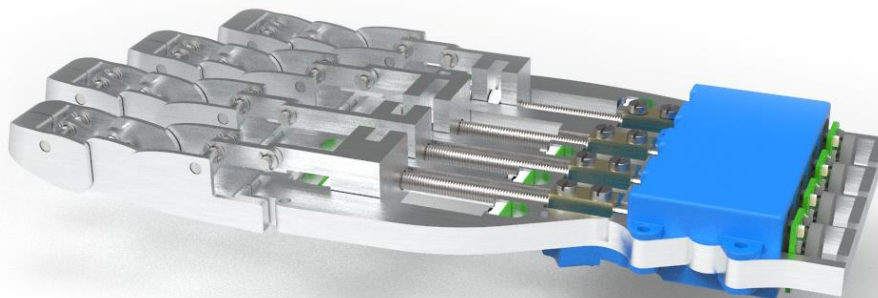
Las piezas de la mano han sido rediseñadas para poder albergar los cambios en los dedos y el dedo pulgar. Se ha mantenido la distribución de tres piezas basadas en palma superior, estructura media y parte inferior.

La parte media se ha rediseñado para albergar la distribución de los actuadores de los dedos. La estructura media ha sido rediseñada para albergar cada actuador y los componentes de control. Se le ha añadido puntos de anclaje para ensamblar los interruptores que tienen la función de inicio y final de carrera.



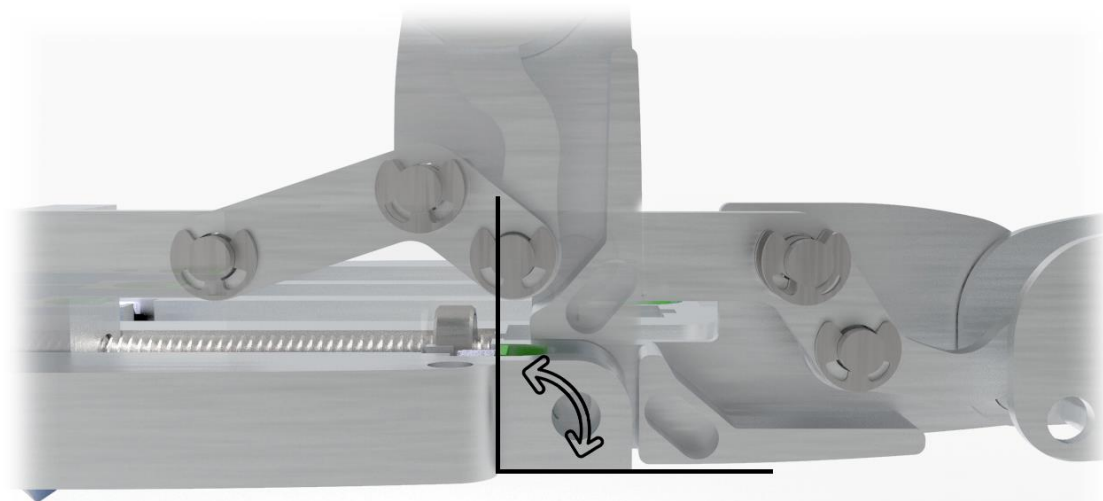
**Ilustración 39: Rediseño de la estructura media, con la redistribución de los actuadores.**

Se han diseñado dos piezas que sirven para anclar los actuadores a la estructura media, de esta forma se sujetan los actuadores. En una de estas piezas de sujeción se anclan los dos actuadores del dedo pulgar . Además en esta pieza se coloca uno de los límites de carrera que se utilizan para sensorizar el movimiento de giro. De esta forma se simplifica y facilita el proceso de fabricación y ensamblaje de estas piezas con las palmas.



**Ilustración 40: Piezas encargadas de anclar los actuadores a la estructura media.**

El punto de unión de la estructura a cada dedo se ha rediseñado, eliminando el eje que se utilizaba en el diseño anterior. Además se le ha dado un redondeado en la zona por la que debe de moverse el dedo y se ha dejado un ángulo recto para limitar el movimiento del dedo al extenderse, en la ilustración siguiente se muestra este cambio.



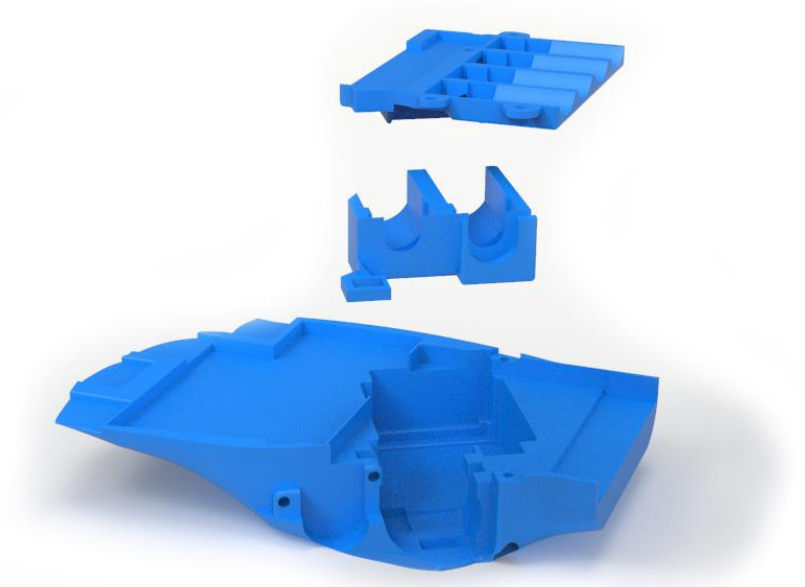
**Ilustración 41: Rediseño del punto de unión del dedo a la estructura media.**

Las palmas han sido rediseñadas completamente, debido a que el diseño anterior no era válido. En cuanto a la forma se ha mantenido las dimensiones antropométricas del diseño anterior. Estéticamente se ha tratado de diseñarlas aún más parecidas a la forma de la mano, para lograr una adaptabilidad de la mano al usuario y evitar el posible rechazo que puede suponer un diseño no parecido a una mano real.



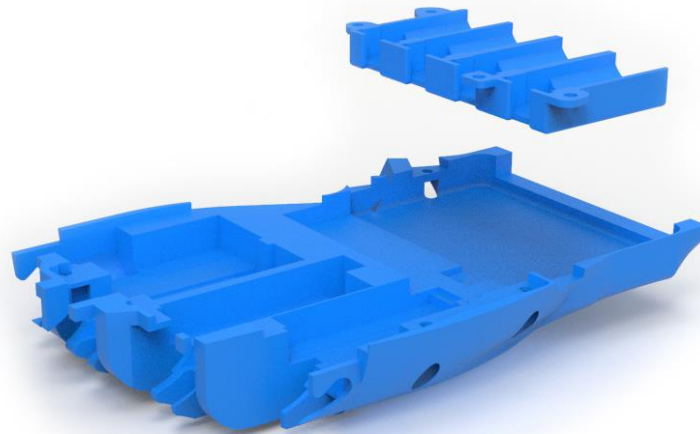
**Ilustración 42: Diseño de la palma superior e inferior.**

El dedo pulgar se ensambla a la palma superior, en el hueco que se ve en la siguiente ilustración. Se ha diseñado un espacio suficiente para albergar los actuadores y la guía rectilínea del pulgar. Además la guía de giro se ancla a esta pieza, de esta forma cuando el dedo pulgar tiende a realizar algún tipo de movimiento la guía se encuentra fijada para que se accione la barra cuatro.



**Ilustración 43: Piezas que se utilizan para ensamblar el dedo pulgar a la palma superior.**

La palma inferior ha sido modificada para poder albergar los cambios en la colocación de los actuadores y de la barra cuatro de cada dedo. Además se ha añadido una pieza que se ensambla a la palma. Esta pieza tiene la función de mantener a los interruptores de los dedos colocados en su posición y además hace de guía para el movimiento lineal de la barra cuatro de los dedos.

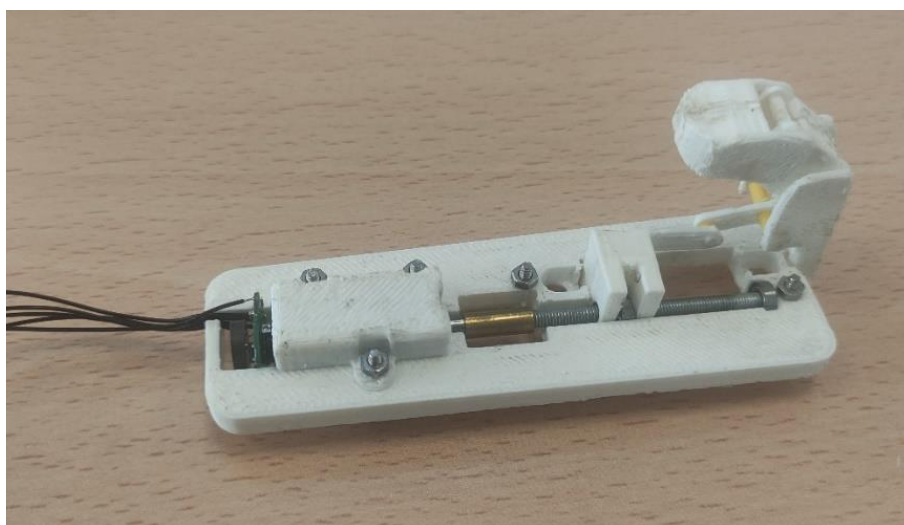


**Ilustración 44:** Diseño de la palma inferior, junto a la pieza que se ensambla para sujetar los actuadores de los dedos.

### 3.3. Prototipo y verificación.

Antes de pasar a la fabricación de las piezas se desarrollaron varios prototipos para verificar la funcionalidad del diseño y poder corregir errores básicos.

Primero se desarrolló un prototipo del dedo índice. Se fabricaron las piezas del dedo por impresión 3D y se ensamblaron para comprobar la funcionalidad del dedo. Como problema de este primer prototipo se vio que el tiempo de respuesta del dedo era lento. Luego se pasó a desarrollar un nuevo prototipo para encontrar una solución a este problema.

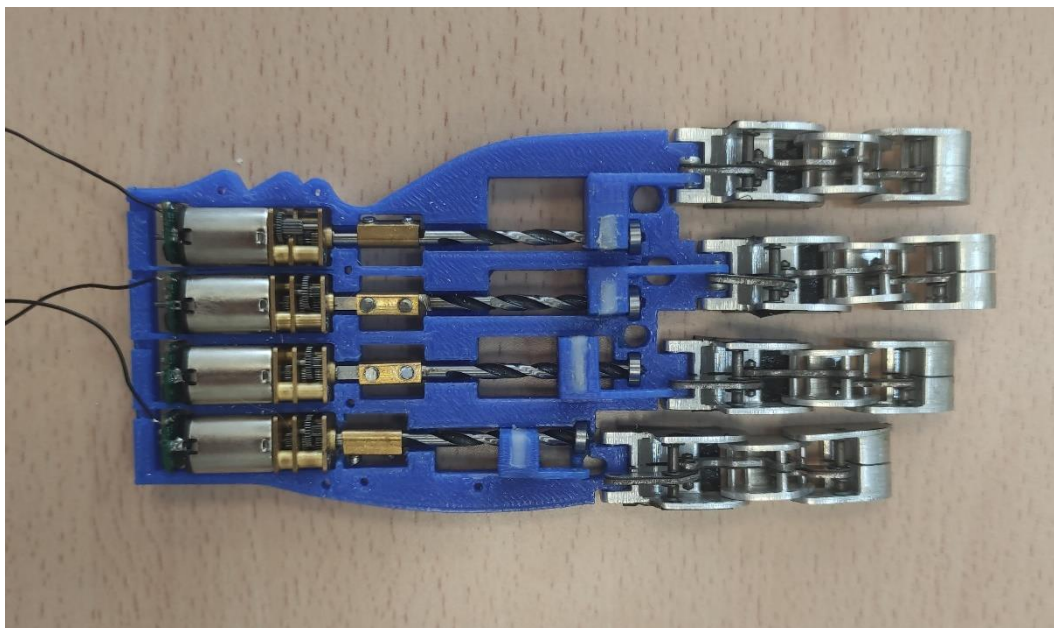


**Ilustración 45:** Primer prototipo.

Para el segundo prototipo se fabricaron las piezas del dedo y las barras internas en aluminio (Véase apartado 3.4.1), debido a que con el prototipo anterior se verificó que el diseño de las barras internas y las piezas del dedo funcionaban correctamente. Excepto la barra número cuatro, debido a que aún no se verificó que fuera el diseño definitivo ya que no se sabía si el actuador iba a ser sustituido. Por lo que se fabricaron por impresión 3D la barra cuatro de cada dedo y la estructura media.

Para tratar de solucionar el problema del tiempo de respuesta del dedo se decidió cambiar el eje del actuador, de forma que al utilizar un eje con un paso mayor el actuador necesita de menos vueltas para mover el dedo. Por lo que esta barra y el resto de piezas de la mano fueron impresas en 3D.

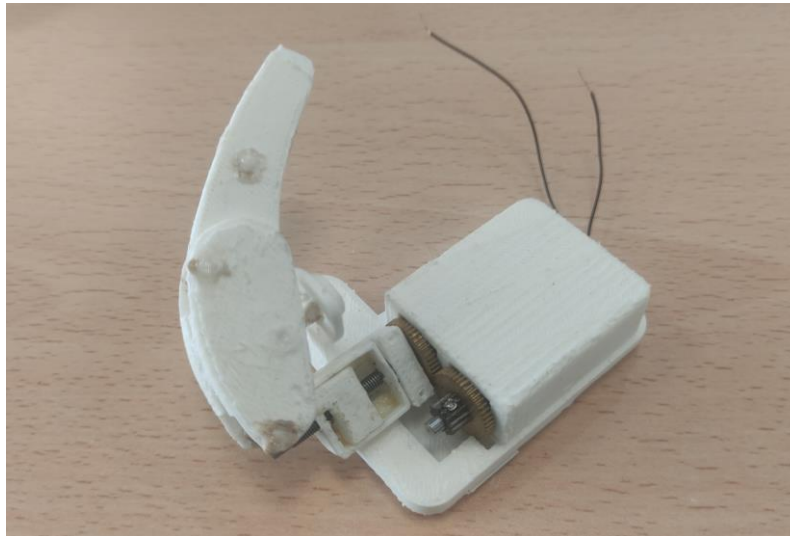
Se cambió el eje del actuador por una broca de madera que tenía un paso largo, la tuerca que se coloca en la barra cuatro se fabricó por medio de plástico polimérico (Véase apartado 3.4.4). Se ensambló el prototipo y se verificó el funcionamiento. Tras varias pruebas se comprobó que la solución estaba en aumentar el paso del eje. Pero el que se había colocado no era correcto, debido a que tenía un filo bastante vivo y se bloqueaba con la tuerca a veces.



**Ilustración 46: Segundo prototipo.**

Luego la solución al problema del tiempo de respuesta está en el eje del actuador, con lo que se verifica que el diseño del dedo funciona correctamente y se puede pasar a su fabricación (Véase apartado 3.4.1). Una vez fabricadas las piezas del dedo en aluminio se pasó a desarrollar el prototipo del dedo pulgar.

El primer prototipo del dedo pulgar se fabricó completamente por impresión 3D, para comprobar y verificar su funcionamiento. Tras su impresión y montaje, se comprobó que se debían de rediseñar varias piezas para mejorar la funcionalidad del dedo y evitar posibles fallos. El diseño del prototipo incorporaba varias piezas que no se utilizan en el diseño final, pero que servían para poder anclar los actuadores.

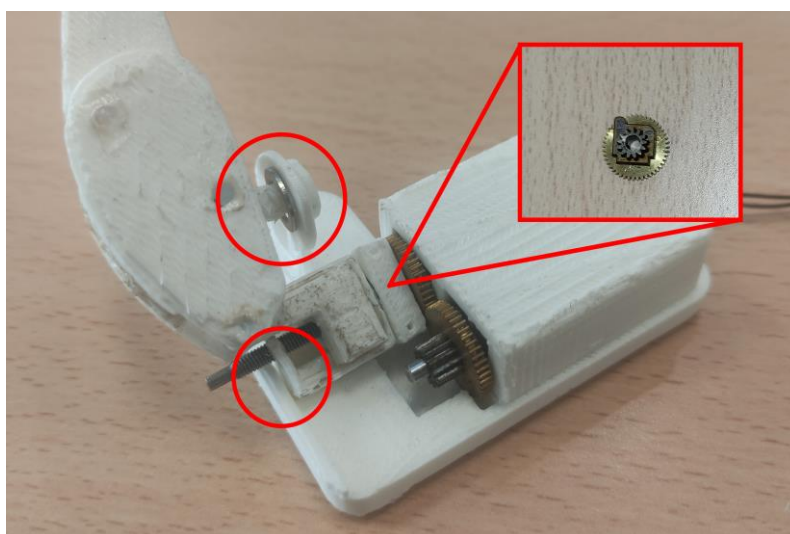


**Ilustración 47: Primer prototipo de dedo pulgar.**

El desarrollo del segundo prototipo del pulgar permitió poder verificar que el dedo funcionaba correctamente. Se añadieron varios cambios en el diseño de varias piezas entre un prototipo y otro. Se le añadió un borde a la pieza de anclaje de los actuadores para que la guía lineal se quedará bloqueada y de esta forma no tendiera a desplazarse cuando la barra tres llegará a su límite.

Otro cambio fue colocar una arandela en la barra cuatro, de esta forma se limita el movimiento lineal de esta barra y obliga su bloqueo cuando se acciona el movimiento de flexión-extensión. Al engranaje del motor de giro se le añadieron unos resaltes que bloquean su movimiento lineal y mejoran su funcionalidad.

La última modificación fue añadir una pieza sacada por la cortadora láser que permite adaptar el engranaje a la guía tal y como se muestra en la ilustración 48. Por lo que con este segundo prototipo se verificó que el diseño era correcto y funcionaba, así que se podía pasar a su fabricación.



**Ilustración 48: Segundo prototipo del pulgar, las marcas de color rojo son los cambios realizados en el diseño entre el primer y segundo prototipo.**

### 3.4. Fabricación y montaje de la mano.

En este apartado se introducen cuáles son los procesos que se han utilizado para desarrollar los prototipos y las piezas finales de la mano.

#### 3.4.1. Mecanizado por CNC.

Para el proceso de mecanizado de las piezas se utiliza una máquina CNC del fabricante Alarsis, modelo FRH170 ATC. Esta máquina permite realizar diferentes tipos de operaciones, para la fabricación de las piezas se han utilizado operaciones de fresado, corte y taladrado básicamente. Incorpora cambio automático de herramienta por lo que se utilizaron diferentes fresas para obtener las piezas.



Ilustración 49: Máquina CNC Alarsis FRH170 ATC.

Las fresas utilizadas son del mismo fabricante de la máquina, pertenecen a la serie FCR que son herramientas diseñadas para fresar aluminio. Tienen un único filo de corte y son fabricadas en metal duro. En la siguiente tabla se introducen las diferentes configuraciones de fresa que se han utilizado para la fabricación de las piezas.

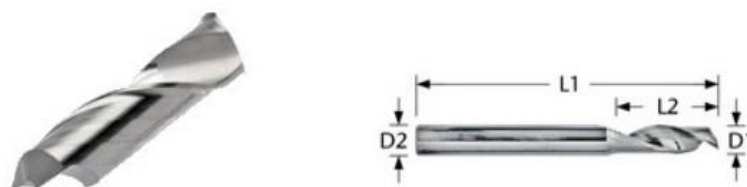


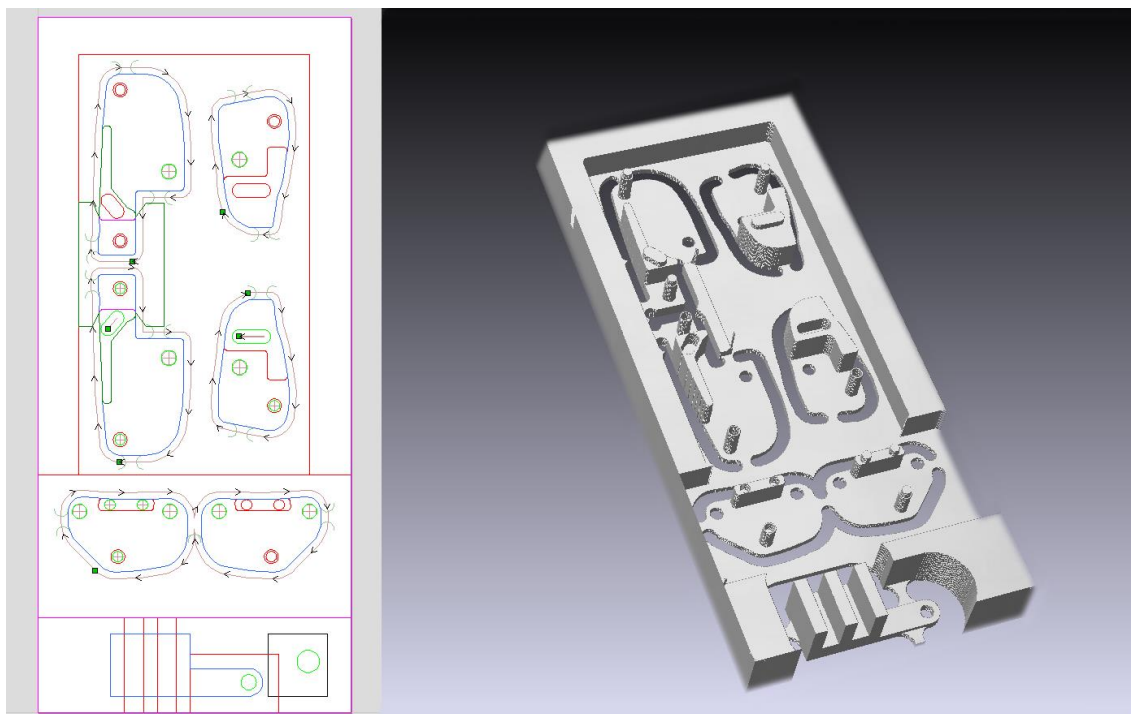
Ilustración 50: Fresa modelo FCR de Alarsis.

**Tabla 3: Especificaciones de los modelos de fresas que se han usado.**

Modelo	Longitud total L1	Longitud corte L2	Diámetro mango D2	Diámetro corte D1
<b>FCR1A3</b>	40	4	3	1
<b>FCR15A3</b>	40	6	3	1,5
<b>FCR2A</b>	50	8	6	2
<b>FCR3A</b>	50	10	6	3
<b>FCR4A</b>	50	12	6	4

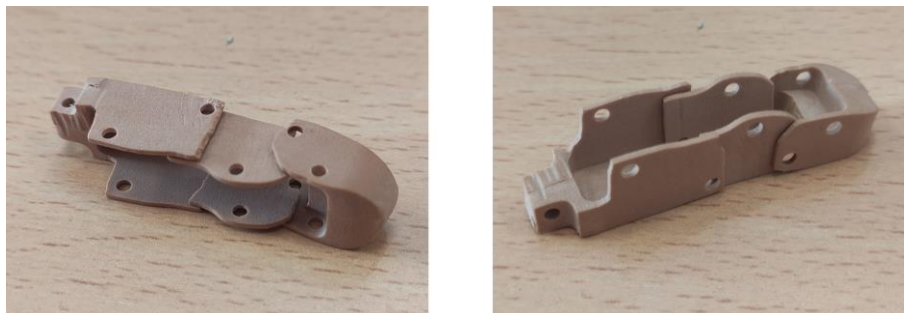
El software utilizado para generar el código G de la máquina es el Aspire. Este software ofrece una interfaz simple e intuitiva. Por medio de diseño 2D (vectores) y 3D (modelado) genera las trayectorias de corte de la herramienta. Se basa en ser un sistema CAD/CAM, es decir se puede crear el diseño desde el mismo software o importarlo desde otro. Posteriormente se introducen las operaciones de mecanizado a realizar para generar la geometría de la pieza diseñada.

Este software permite generar operaciones de fresado como perfilado, planeado y vaciado. Además de operaciones de grabado y taladrado. Una vez generadas las trayectorias de corte el programa incluye el post-procesador, por lo que se genera directamente el código de la máquina que se le asigne.



**Ilustración 51: Trayectoria de corte y simulación de las operaciones.**

Como primera toma de contacto con la máquina y para verificar que las piezas eran fabricables, se hicieron varias pruebas de fabricación con Prolab 65. Este material es una plancha mecanizable de poliuretano de media densidad que se utiliza para desarrollar maquetas y prototipos, debido a que es muy fácil de mecanizar y no genera desgaste en las herramientas. Se fabricaron las piezas de los dedos, tal y como se muestra en la siguiente ilustración.



**Ilustración 52: Piezas del dedo índice mecanizadas en Prolab 65.**

Una vez verificado se pasaron a fabricar las piezas en aluminio. Para optimizar la vida de la herramienta en el proceso de mecanizado se utilizaron los parámetros de corte que se muestran en la Tabla 4. Es fundamental utilizar unos parámetros de corte correctos para obtener un buen acabado y reducir el desgaste de la herramienta lo máximo posible (*Véase apartado 2.2.1*).

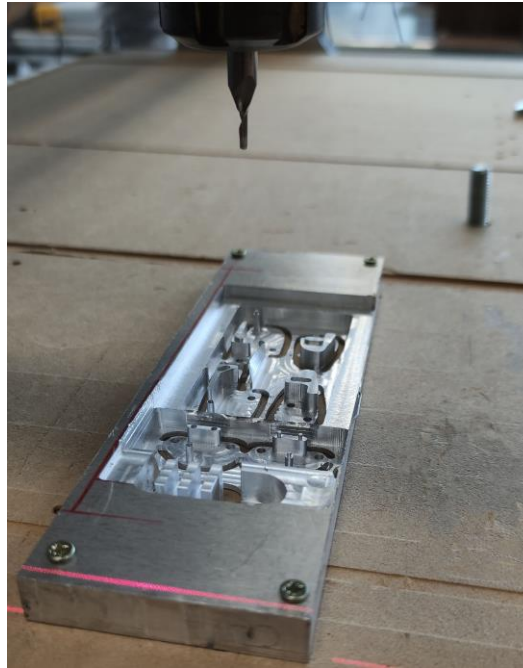
**Tabla 4: Parámetros de corte utilizados para las herramientas.**

Velocidad del husillo (r.p.m.)	Feed rate (mm/min)	Velocidad de bajad (mm/min)
40	4	3

Para realizar el mecanizado de las piezas de aluminio se siguió el siguiente proceso:

- Primero se realiza el diseño 3D de las piezas en el software CATIA, para posteriormente generar la vista 2D de estas piezas y exportarlas al formato DXF.
- Una vez tenemos el diseño de las piezas lo importamos en el software Aspire. En este programa se trabaja con los vectores de las piezas. A estos vectores se le va definiendo cada una de las operaciones de mecanizado y las herramientas a utilizar, para obtener la geometría de las piezas, tal y como se muestra en la ilustración 51. Una vez generadas todas las operaciones pasamos a generar el código máquina, se selecciona el modelo de máquina para post-procesar el código y generar el código específico de ese fabricante.
- Una vez tenemos el archivo del código pasamos a la máquina. Tras encender los equipos necesarios para el funcionamiento de la máquina, lo primero que se debe hacer es hacer *homing* para que los ejes vayan a la posición cero de referencia.

- Es importante revisar que las herramientas estén colocadas en las posiciones correctas y contengan las fresas que se van a utilizar. Posteriormente pasamos a anclar a la mesa de trabajo la plancha de aluminio.
- En la plancha anclada por medio del láser que incorpora la máquina se le define el punto de referencia y por medio del palpador la altura de la plancha.
- Por lo que una vez se tienen cumplidos los pasos previos se le introduce el código a la máquina y se pasa a mecanizar las piezas.



**Ilustración 53: Resultado del proceso de mecanizado de las piezas de los dedos.**

### **3.4.2. Mecanizado láser.**

Para realizar este tipo de mecanizado se utilizaron dos máquinas diferentes. Una de láser de fibra y otra de Co2.

El láser de fibra se utiliza para realizar el corte de varias piezas de metal. La máquina que se usó fue una Sisma EASY, que es una marcadora y grabadora láser de fibra. Es utilizada comúnmente en el sector de la joyería, debido a que tiene una gran capacidad de precisión y funciona con todo tipo de materiales.

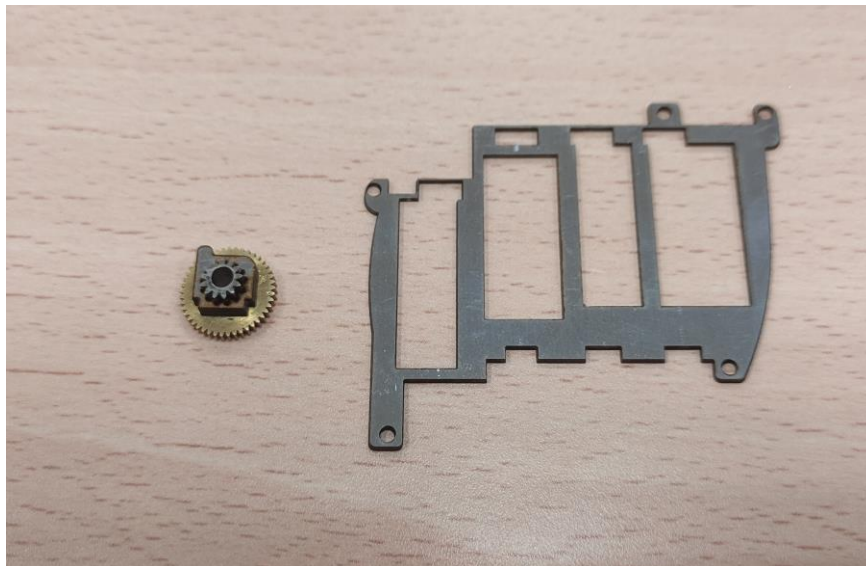
Por medio de un software de diseño 2D como Inkscape se desarrollan los vectores. Posteriormente los vectores son importados al software de la máquina que se encarga de interpretar y generar las trayectorias que seguirá la máquina para efectuar el corte.



**Ilustración 54: Máquina láser Sisma EASY.**

En cuanto a los parámetros de corte dependen del espesor de material que se va a mecanizar. Se realizan tres pasadas en la que en cada una de ellas se utilizan unos parámetros que son repetidos determinadas veces. Normalmente la primera pasada es un proceso de marcación, por lo que el láser trabaja con menos potencia. La segunda y la tercera son pasada para eliminar material por lo que el láser trabaja con una potencia mayor.

Por medio de este proceso se cortan en acero inoxidable la guía que se coloca para fijar los interruptores a la estructura media y la pieza del pulgar que permite adaptar el engranaje a la guía lineal, en la ilustración siguiente se muestra el resultado obtenido.



**Ilustración 55: Piezas cortadas en máquina laser.**

Para poder mecanizar las barras internas se ideó un mecanismo que simula la función de un torno, de esta forma se logra poder mecanizar las hendiduras en las que se encajan las arandelas de seguridad. Por lo que se diseñó un modelo de torno en el que encajar la barra de 2mm de acero, para que este mecanismo la girara a medida que el láser incidía en la zona de corte.

El diseño se basa en una base de metacrilato a la que se ensambla un motor de DC alimentado por un puerto USB y el contrapunto que sirve de apoyo para la pieza. El motor usado es el Miicrometal del fabricante Pololu con una reductora de 50:1 y un eje simple, al que se ha diseñado una pieza para adaptarlo y poder colocar la barra de 2mm a mecanizar. A la base de metacrilato se le añaden cuatro piezas en las esquinas que sirven de cogidas, ya que el láser dispone de una mordaza.

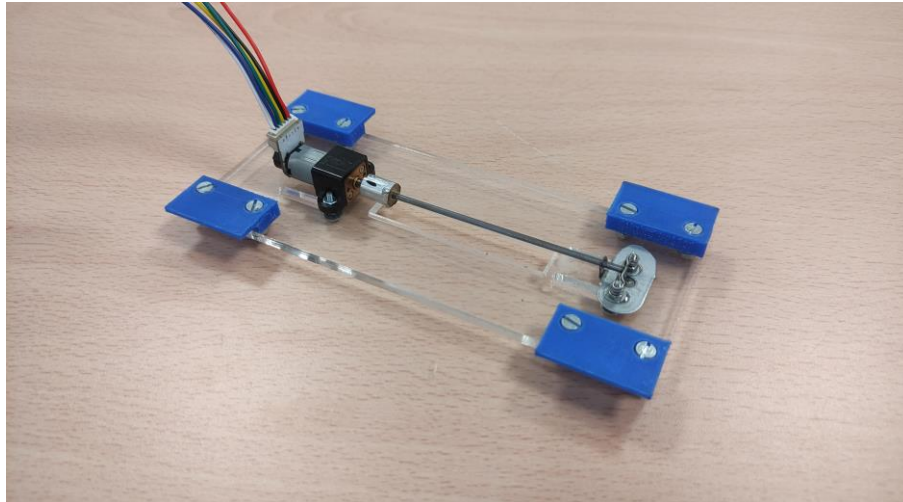


Ilustración 56: Diseño del torno.

Para fabricar el diseño de la barra se siguió el siguiente proceso:

- Primero se diseñaron las barras en el software CATIA. Una vez definido el diseño, en este mismo software generamos la vista 2D de la pieza, para guardarla en formato DXF.
- El archivo DXF es importado al software Inkscape, que permite generar los vectores y trayectorias que deben de seguir el láser. Luego se deben de marcar las líneas que debe de mecanizar el láser, en este caso son las hendiduras (en negro) y el corte de cada barra (en rojo) como se muestra en ilustración 57.

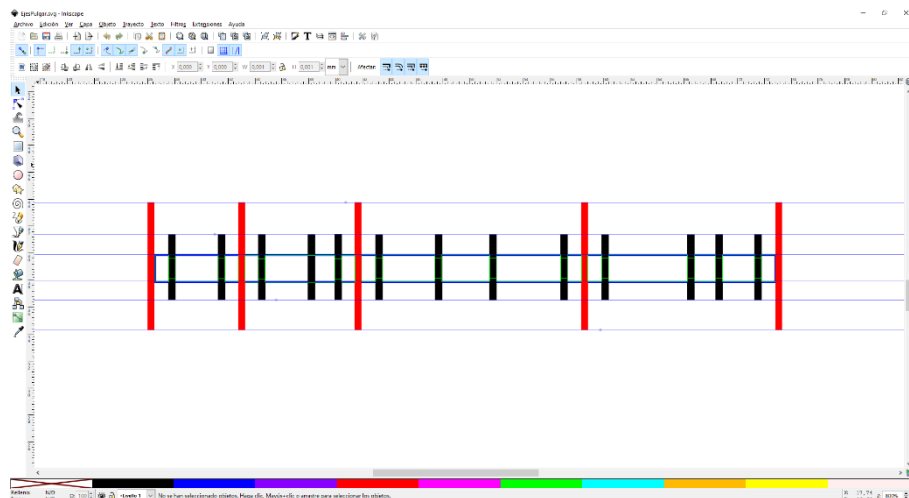
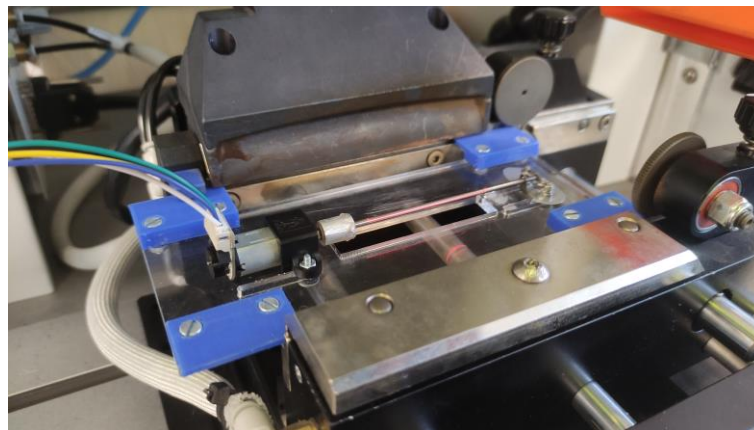


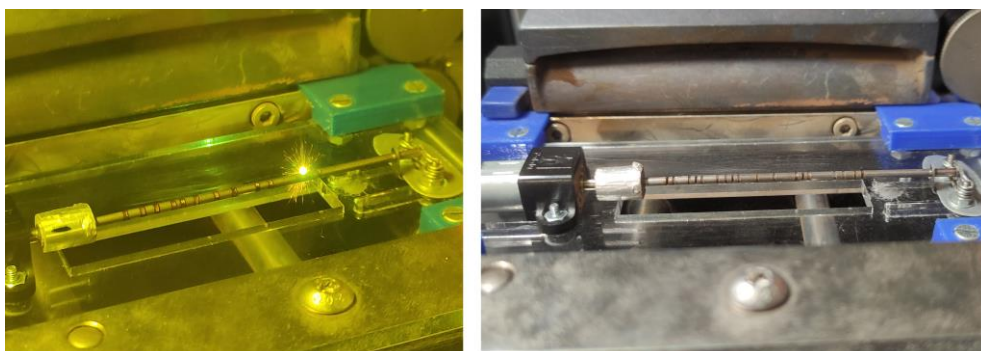
Ilustración 57: Diseño del mecanizado de las barras internas en el software Inkscape.

- El archivo DXF es importado al software que controla la máquina laser. Lo primero que se hace es colocar la pieza en la máquina, que dispone de unas mordazas. El torno se coloca en las mordazas y por medio del ordenador se le define que cierren para fijarlo.
- Posteriormente pasamos a seleccionar los parámetros de corte. La máquina permite definir parámetros por colores, luego el color negro será un rebajado de 0,5 mm y el rojo será el corte de la barra.
- Una vez definido los parámetros de corte pasamos a posiciones el láser. Una ventaja de esta máquina es que permite visualizar por medio de un láser marcador el área del trabajo que se va a realizar. De esta forma se posiciona por coordenadas X-Y la ubicación de la barra, como se muestra en la ilustración 58. Un aspecto fundamental a tener en cuenta es la altura del láser correspondiente a la coordenada Z, debido a que de esta depende el enfoque de láser.



**Ilustración 58: Colocación del torno en la máquina y marcado láser de posicionamiento.**

- Por lo que se pasa a realizar el mecanizado una vez se tiene colocado el torno, posicionado el láser y definido los parámetros. Como se muestra en la ilustración 59, las hendiduras quedan perfectamente marcadas y el corte de cada eje no se hace completo, debido a que si se hace completo la barra caería y una parte quedaría sin mecanizar. Luego el corte profundiza dejando poca cantidad de material, que con un alicate y sin ejercer apenas fuerzas se obtiene cada eje.



**Ilustración 59: Resultado del proceso de mecanizado de los ejes.**

El láser de CO2 utilizado fue el modelo Epilog Mini Helix, que dispone de 20W de potencia y es utilizado para cortar normalmente materiales como: metacrilato y madera. En este proyecto se utilizó para mecanizar la base del torno. Para generar esta pieza se siguieron estos pasos:



**Ilustración 60: Máquina láser Epilog Mini Helix.**

- Se diseñó la pieza a través de CATIA para generar el modelado 3D, posteriormente se generó la vista 2D de la pieza para exportarla en formato DXF.
- El formato DXF es importado al software llamado Inkscape. En este programa lo que se hace es unificar los vectores y añadirle un tamaño de línea concreto. Debido a que este equipo interpreta diferenciando el ancho de línea para realizar una operación de corte o grabado. De forma que para un ancho de línea mayor de 0.152 mm lo interpretará como un proceso de grabado y para anchos de línea menores a ese valor realiza cortes.
- Es fundamental definir los parámetros de corte, para este equipo se trabaja con los de velocidad y potencia, estos parámetros son diferentes para operaciones de corte y grabado.
- Una vez definida correctamente la trayectoria con su espesor de línea y los parámetros de corte, se pasa a enviarlo a la máquina.
- Otro parámetro que se suele activar es el *Auto focus*, que se basa en realizar el proceso de enfoque del láser de forma automática, aunque también se puede realizar de forma manual. Para realizar el proceso de *Auto focus* lo que utiliza es un palpador que toca al material para que de forma automática se determine la altura que se debe de poner el material.
- Luego una vez se ha enviado el archivo a la impresora, se pasa a mecanizar la pieza. En la ilustración 61 se muestra el resultado obtenido.



Ilustración 61: Resultado del proceso de mecanizado láser de la base del torno.

### 3.4.3. Impresión 3D.

Este proceso de fabricación se ha utilizado para desarrollar los prototipos (Véase apartado 3.3) y algunas piezas de la mano. Las piezas que se han fabricado por impresión 3D: son ambas palmas y las de sujeción de los actuadores. Debido a que son piezas que sirven para el ensamblaje y no requieren de unas altas propiedades mecánicas. Además, al ser fabricadas en plástico se reduce el peso, que es un requisito fundamental a la hora del rechazo que puede suponer una prótesis pesada.[35]

La impresora que se utilizó fue la Makerbot Z18, es de tecnología FDM y utiliza PLA. Este equipo permite desarrollar piezas de gran volumen y con una óptima relación precio-rendimiento.

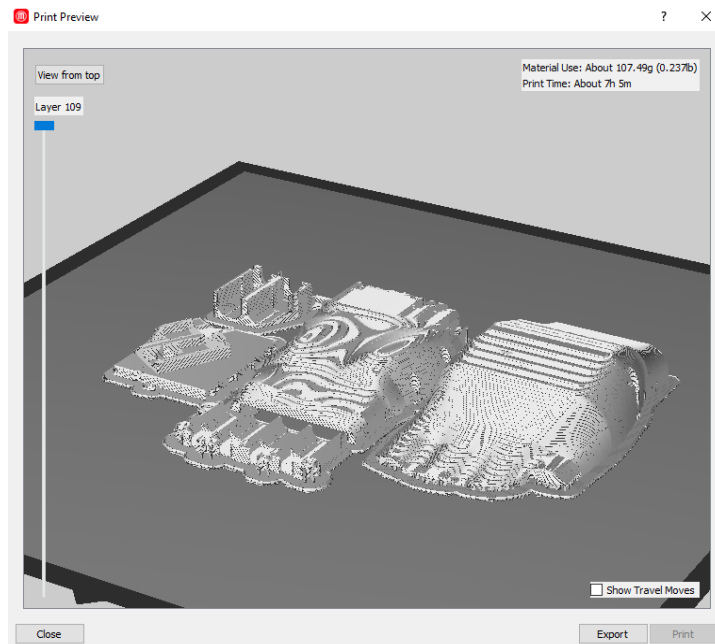


Ilustración 62: Impresora 3D Makerbot Z18.

Para fabricar las piezas se ha seguido el siguiente proceso:

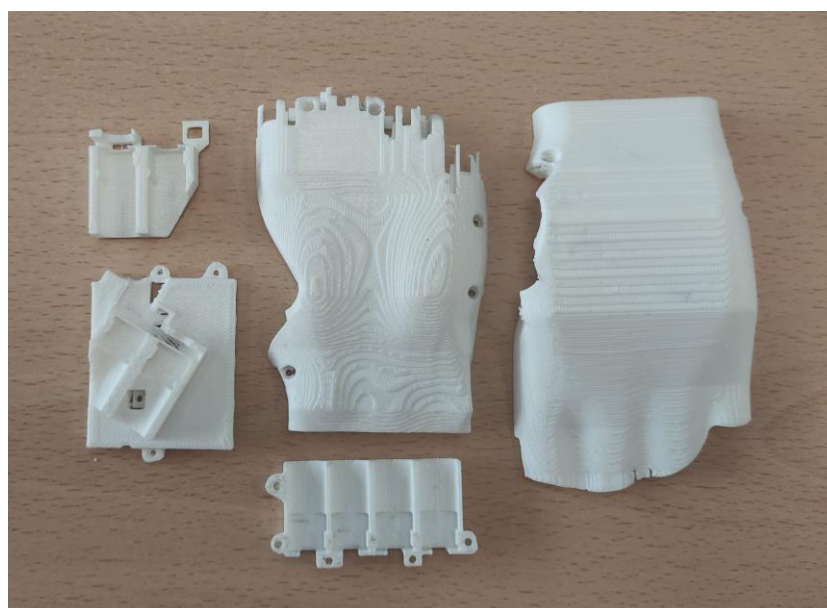
- A través del software CATIA se desarrolla el diseño 3D de las piezas, para posteriormente exportarlo en formato STL.

- Este archivo STL se introduce en el software Makerbot Desktop, que es en el que se define la posición y los parámetros de impresión. Además, se podrá previsualizar cómo será el proceso de impresión, tal y como se muestra en la ilustración 63.



**Ilustración 63: Previsualización de las piezas que se van a imprimir.**

- Una vez configurado se pasa el archivo a la máquina, por medio de un USB, conexión Wifi o Ethernet.
- En la bandeja de impresión se aplica laca para evitar que la primera capa de impresión se despegue. Por lo que para finalizar se pasa a imprimir la pieza.



**Ilustración 64: Piezas de la mano impresas en PLA.**

#### 3.4.4. Moldeo de plástico polimórfico.

Este proceso de fabricación fue utilizado para tratar de solucionar el problema del tiempo de respuesta de los dedos. Por medio del moldeo de plástico polimórfico se trató de crear una pieza que hiciera la función de una tuerca para un eje determinado. El plástico polimórfico es un poliéster biodegradable con una temperatura de fusión baja, aproximadamente de 60 °C.[38]

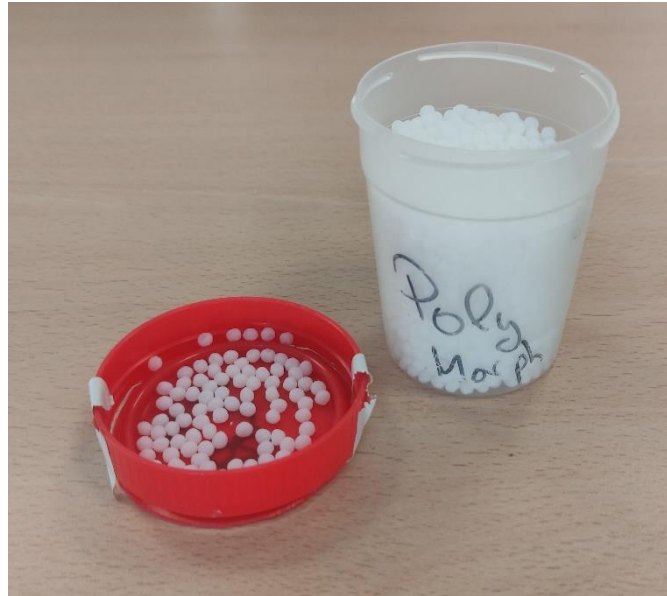
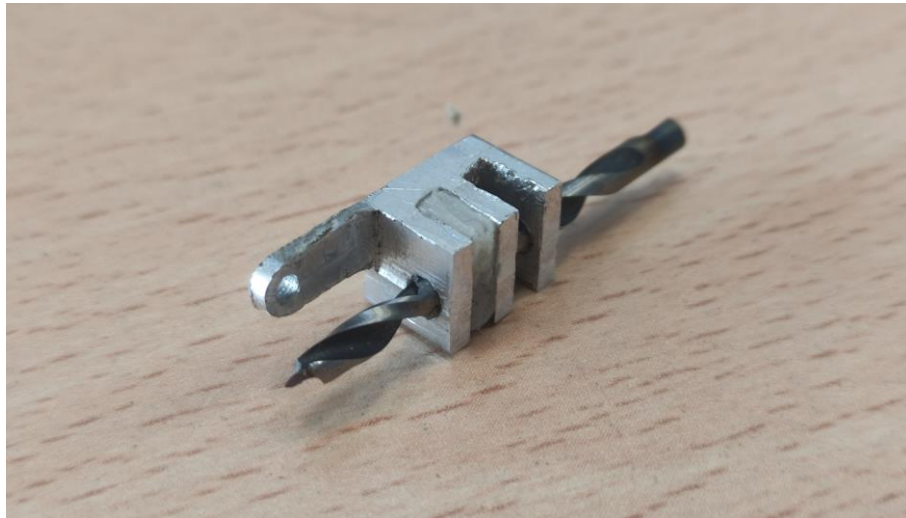


Ilustración 65: Pellets de plástico polimórfico.

El proceso que se siguió para su fabricación fue el siguiente:

- El plástico polimórfico viene en forma de pellets, es introducido en agua que se encuentra a unos 80-90 °C. El material es sólido y de color blanco, pero cuando se vuelve transparente se vuelve moldeable.
- Luego cuando se comprueba que se ha vuelto transparente se debe sacar del recipiente y comenzar a moldear con la forma que se desea. En este caso lo que se hizo fue introducir en la barra cuatro el material para que adaptara la forma de la barra.
- Posteriormente se introduce el eje, que en este caso era una broca de madera, para que el plástico tome la forma interna del eje y se deja secar.
- Una vez el material este de color blanco significa que ya ha solidificado y está listo para ser utilizado.



**Ilustración 66:** Barra cuatro con la pieza de plástico polimórfico que adapta el eje.

## 4. Resultados finales.

En el proceso de montaje de los dedos se ha verificado que el diseño se puede ensamblar y fabricar correctamente. A continuación, se introducen imágenes del proceso de montaje de las diferentes partes de la mano.

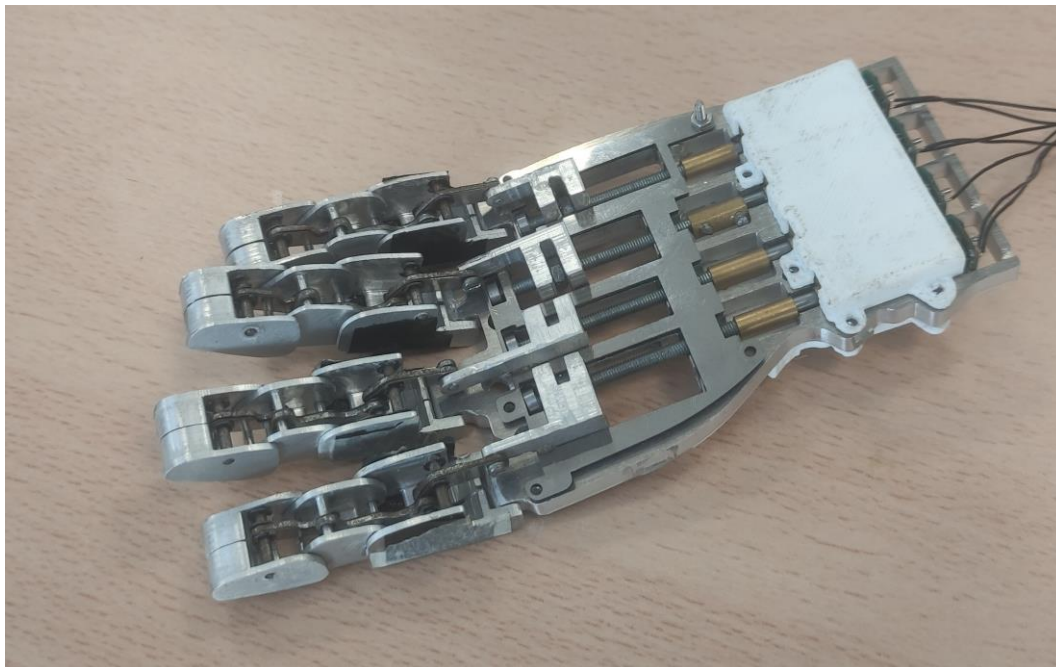


Ilustración 67: Montaje de los dedos en la estructura media.

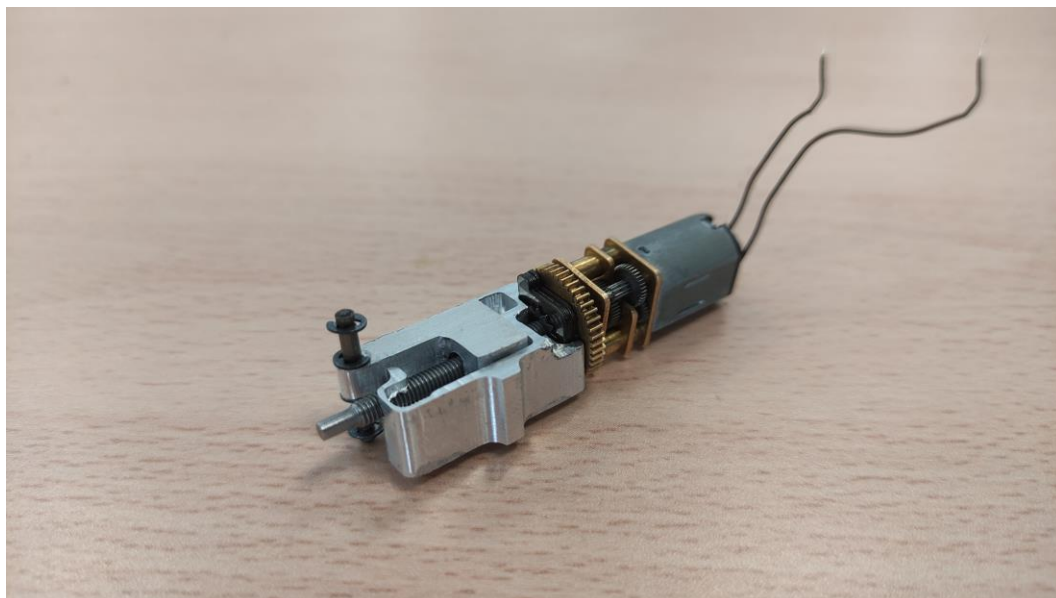
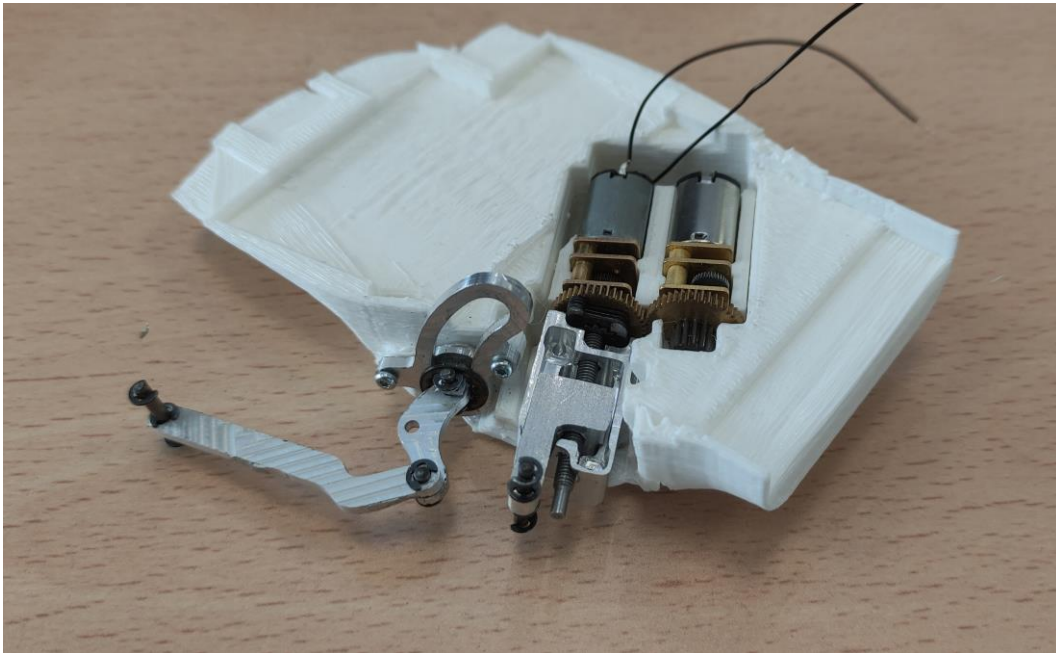
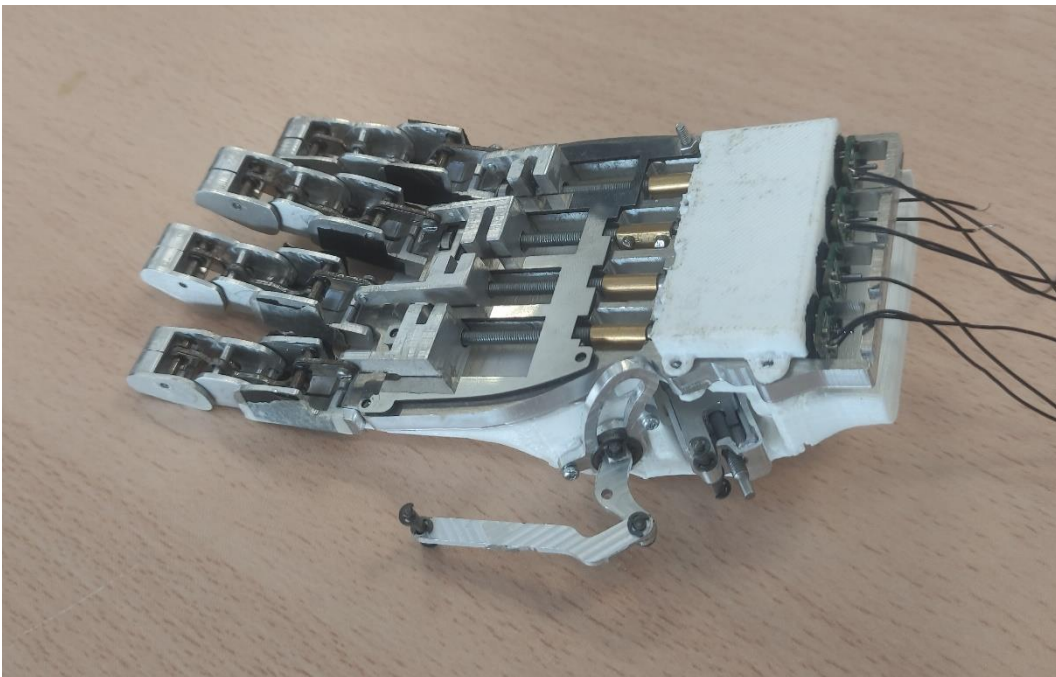


Ilustración 68: Montaje del actuador encargado del movimiento flexión-extensión del dedo pulgar.

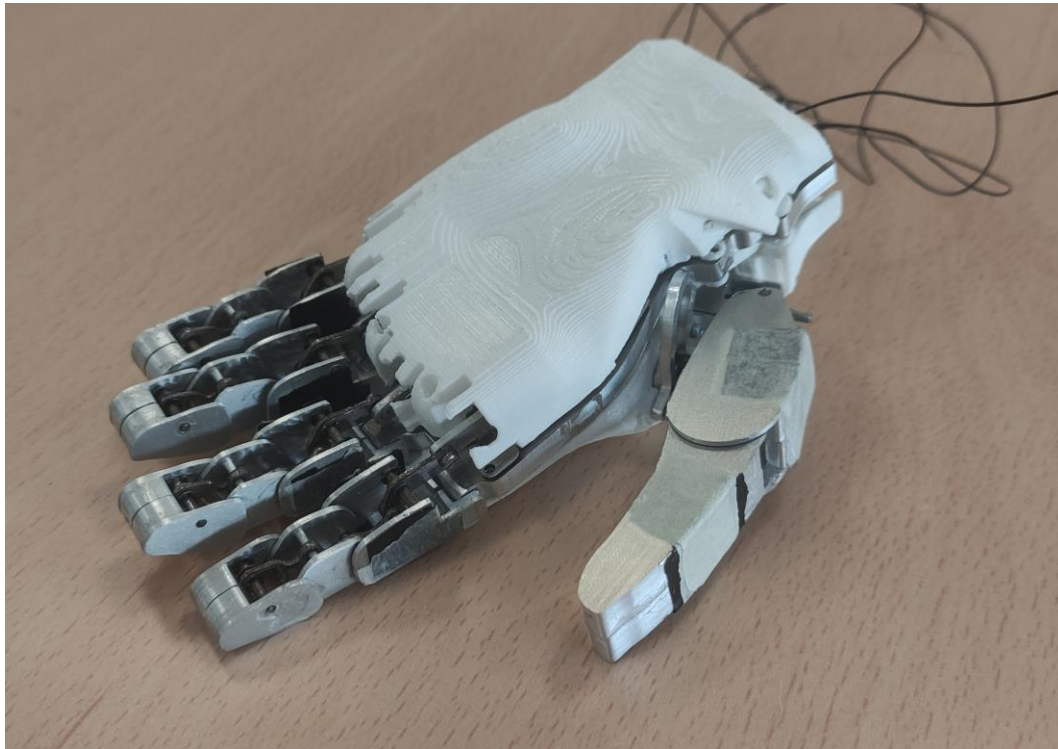


**Ilustración 69: Montaje de los dos actuadores y las barras internas del dedo pulgar en la palma superior.**



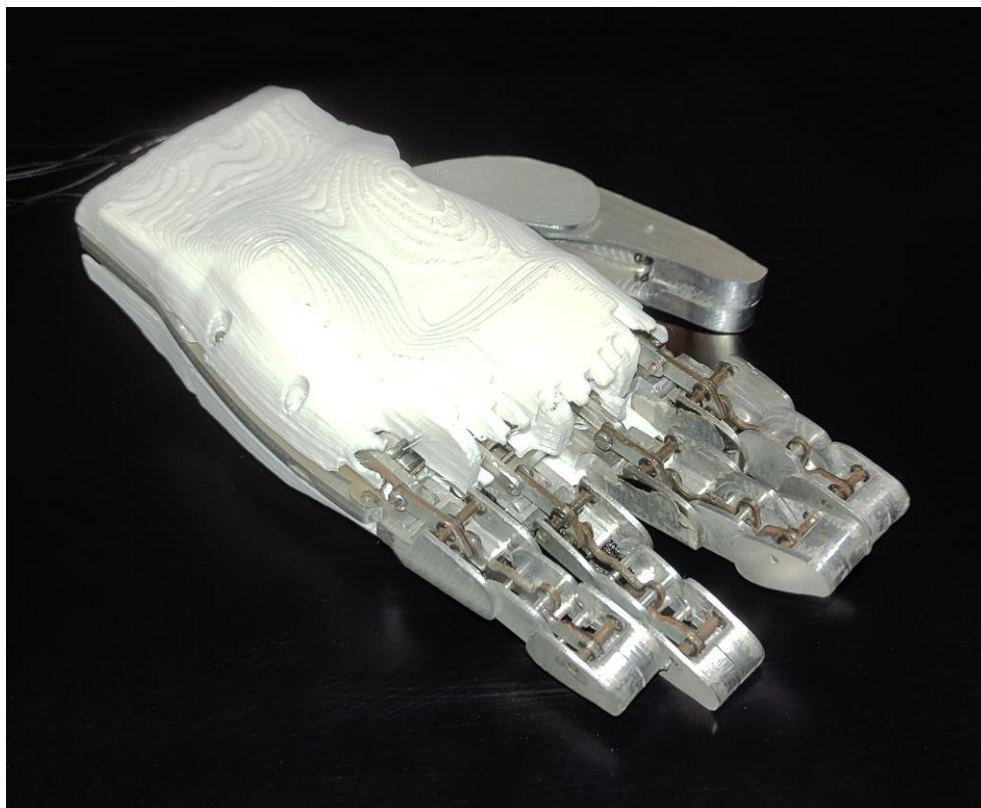
**Ilustración 70: Montaje de la estructura media sobre la palma superior con los dedos ensamblados.**

Para unir las distintas piezas de las falanges, tanto de los dedos como del pulgar, se utilizó cinta aislante en el proceso de montaje. Finalmente se ha utilizado Pattex Nural 27 para fijar y soldar las piezas, de esta forma se evita que puedan desunirse cuando la mano robótica entra en funcionamiento.



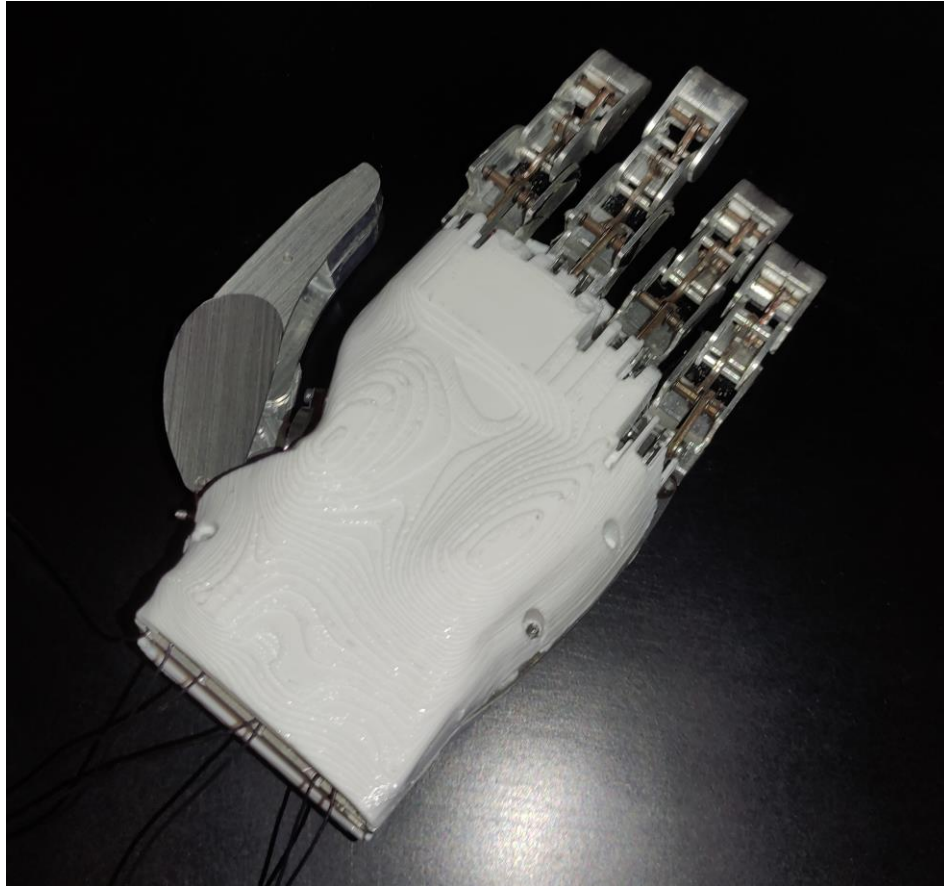
**Ilustración 71: Montaje final del pulgar y la palma inferior.**

El resultado final del proyecto ha sido el desarrollo del prototipo de mano robótica en sus materiales correspondientes. Se comprueba que el diseño del prototipo final se puede fabricar y ensamblar, tal y como se ha demostrado en el desarrollo del proyecto.



**Ilustración 72: Prototipo final del diseño de la mano robótica.**

El diseño del pulgar aumenta la funcionalidad de la mano y le otorga la posibilidad de poder realizar diferentes tipos de agarre. Es fundamental que la mano tenga estos rangos de movimiento, debido a que de esta forma los niños podrán agarrar diferentes geometrías de objetos, que a priori para una prótesis comercial no es posible realizar ese tipo de agarres.



**Ilustración 73: Prototipo funcional con el dedo pulgar realizando el movimiento de abducción.**

## 5. Presupuestos.

### 5.1. Coste del personal.

Tabla 5: Coste del personal.

Categoría	Tiempo proyecto (horas)	Coste (€/hora)	Coste final (€)
Personal Tecnico	375	15	5.625
<b>Coste total:</b>			<b>5.625 €</b>

### 5.2. Coste de software.

Tabla 6: Coste de software.

Descripción	Precio de licencia (€/año)	Tiempo en el proyecto (días)	Coste final (€)
Catia V5	1.200	120	394,52
Aspire 9.5	1.800	30	147,95
Keyshot 10 Pro	1.721,31	19	89,60
<b>Coste total:</b>			<b>632,07 €</b>

### 5.3. Coste de material adquirido.

Tabla 7: Coste de material adquirido.

Categoría	Cantidad (unidad)	Precio Unitario (€)	Coste final (€)
Barra de Acero 2mm	2	2,58	5,16
Anillo clip DIN-6799 1,5 mik	200	0,02	4
Fresa FCR15A3	3	19	57
Fresa FCR2A	3	24	72
Fresa FCR1A3	3	19	57
Fresa FCR15A3	3	19	57
Fresa FCR2A	3	24	72
Fresa FCR3A	3	24	72
Fresa FCR4A	2	24	48
Chapa Aluminio de 5mm	1	17,85	17,85
Chapa Aluminio de 10mm	1	52,6	52,6
Prolab 65 de 6mm	2	15	30
Bobina de PLA	2	17,6	35,2
Pololu 30:1 MicroMetal	5	13,2	66
Polulu MicroMetal eje tornillo M3	1	15,79	15,79
Encoder para motores	6	8,5	51
Rodamiento MZ PN 3mm	1	12	12
<b>Coste total:</b>			<b>724,60 €</b>

## 5.4. Costes totales

Tabla 8: Costes totales con IVA.

Nombre del coste	Importe (€)
<b>Personal</b>	5.625,00
<b>Software</b>	724,60
<b>Material adquirido</b>	632,07
<b>Coste total:</b>	<b>6.981,67 €</b>

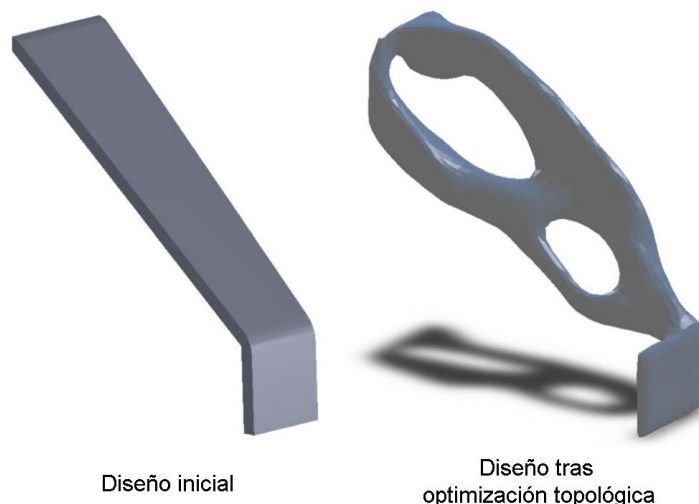
## 6. Futuras líneas de trabajo.

El objetivo principal del proyecto era adaptar el diseño de un concepto de mano robótica para niños de entre 8 y 12 años a que se pudiera fabricar y montar, cumpliendo con los requisitos definidos. En el desarrollo del trabajo se han abierto unas líneas de futuro con las que mejorar el diseño de la mano robótica.

En cuanto al tiempo de respuesta de los dedos se ha visto que solucionando el paso del eje este tiempo se reduce, debido a que el motor necesita de menos vueltas para que las barras realicen el recorrido. Por lo que la solución futura será buscar algún fabricante que suministre barras de 3mm con un paso mayor. Se prevé que con un paso de 2 mm o superior el problema se solucionaría, debido a que el eje actual tiene un paso de 0.5 mm.

El diseño de la mano robótica solo se ha concebido para el funcionamiento de los dedos. Se podría avanzar a que fuera un antebrazo o brazo y dotar de mayor funcionalidad al diseño, añadiendo actuadores a las articulaciones de la muñeca o el codo.

Una cuestión fundamental es el peso, ya que si la mano robótica tiene un peso menor o mayor el usuario puede generar rechazo, debido a que no se siente cómodo. Luego una futura línea sería aplicar la técnica de optimización topológica. Esta técnica se basa en realizar un análisis mecánico de una pieza y reducir su peso estructural manteniendo las propiedades mecánicas.[39], [40]



**Ilustración 74: Ejemplo de aplicación de la técnica de optimización topológica en una pieza del tren de aterrizaje de una aeronave.[39]**

El tamaño de la mano se ajusta en cuanto a las dimensiones antropométricas de una mano real, pero el ancho de las palmas es un poco superior. Luego una futura línea sería tratar de cambiar la distribución de los actuadores para reducir el espacio que ocupan estos en las piezas de las palmas.

## 7. Conclusiones.

Las siguientes conclusiones que se exponen en este apartado se han extraído durante el desarrollo del proyecto:

En el desarrollo del proyecto se ha realizado un proceso de investigación de los conceptos de prótesis y manos robóticas dirigidas a niños comerciales existentes. Se ha podido analizar que estas prótesis y manos tienen un precio elevado para la funcionalidad que otorgan. En cuanto a las prótesis y manos robóticas para niños desarrolladas en proyectos de investigación es cierto que otorgan mayor funcionalidad que las comerciales, pero no llegan a tener suficiente funcionalidad como para poder realizar los agarres básicos.

Se ha comprobado que el rediseño de la mano robótica desarrollado se puede fabricar y montar totalmente, además de ser funcional y cumplir con los requisitos definidos. El diseño del mecanismo del dedo con dos actuadores permite poder realizar los movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión.

Los prototipos desarrollados por impresión 3D han servido para verificar que el rediseño cumplía con las dimensiones antropométricas. Además de poder verificar la funcionalidad de los dedos y de esta forma solucionar problemas leves.

El diseño final ha sido fabricado por los diferentes métodos de fabricación definidos. Se ha comprobado que todas las piezas se pueden fabricar con los medios disponibles. Además, el montaje de la mano ha servido para comprobar la funcionalidad de la mano completa.

Tras la fabricación y montaje tanto de la mano como de los prototipos, se ha observado distintos fallos que por medio de las líneas de futuro se tratarán de solucionar.

## 8. Referencias.

- [1] G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. A. Knight, "Product Design for Manufacture and Assembly, Third Edition (Manufacturing Engineering and Ma...," 2010.
- [2] G. F. Barbosa and J. Carvalho, "Design for Manufacturing and Assembly methodology applied to aircrafts design and manufacturing," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, no. 7, pp. 116–121, May 2013, doi: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00044.
- [3] East West Manufacturing, "What is Design for Manufacturing or DFM?," Mar. 24, 2020. <https://news.ewmfg.com/blog/manufacturing/dfm-design-for-manufacturing>.
- [4] H. Chang, S. Li, and R. Shi, "Design and Manufacturing Technology of High Speed Milling Cutter for Aluminum Alloy," *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 630–637, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROENG.2017.01.200.
- [5] C. Author's Address and H. Gökkaya, "The Effects of Machining Parameters on Cutting Forces, Surface Roughness, Built-Up Edge (BUE) and Built-Up Layer (BUL) During Machining AA2014 (T4) Alloy," *Strojniški vestnik-Journal Mech. Eng.*, vol. 56, pp. 584–593, 2010.
- [6] J. M. Sánchez-Sola, M. A. Sebastián, M. S. Carrillero, J. M. González, and M. Marcos, "Caracterización de la capa y el filo adherido en el mecanizado de la aleación AA7050," *Rev. Metal.*, vol. 41, no. Extra, pp. 365–368, Dec. 2005, doi: 10.3989/REVMETALM.2005.V41.IEXTRA.1057.
- [7] A. Wetzig *et al.*, "Fast Laser Cutting of Thin Metal," *Procedia Manuf.*, vol. 29, pp. 369–374, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.150.
- [8] G. C. Rodrigues, V. Vorkov, and J. R. Dufloy, "Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 714–718, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.PROCIR.2018.08.026.
- [9] D. Pramanik, A. . Kuar, S. Sarkar, and S. Mitra, "Optimisation of edge quality on stainless steel 316L using low power fibre laser beam machining," *Adv. Mater. Process. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 42–53, 2020, doi: 10.1080/2374068X.2020.1745734.
- [10] L. H. Shah, F. Khodabakhshi, and A. Gerlich, "Effect of beam wobbling on laser welding of aluminum and magnesium alloy with nickel interlayer," *J. Manuf. Process.*, vol. 37, pp. 212–219, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2018.11.028.
- [11] A. Manero *et al.*, "Implementation of 3D Printing Technology in the Field of Prosthetics: Past, Present, and Future," *Int. J. Environ. Res. Public Heal. 2019, Vol. 16, Page 1641*, vol. 16, no. 9, p. 1641, May 2019, doi: 10.3390/IJERPH16091641.
- [12] J. M. Zuniga, A. M. Carson, J. M. Peck, T. Kalina, R. M. Srivastava, and K. Peck, "The development of a low-cost three-dimensional printed shoulder, arm, and hand prostheses for children," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 41, no. 2, pp. 205–209, Apr. 2017, doi: 10.1177/0309364616640947.

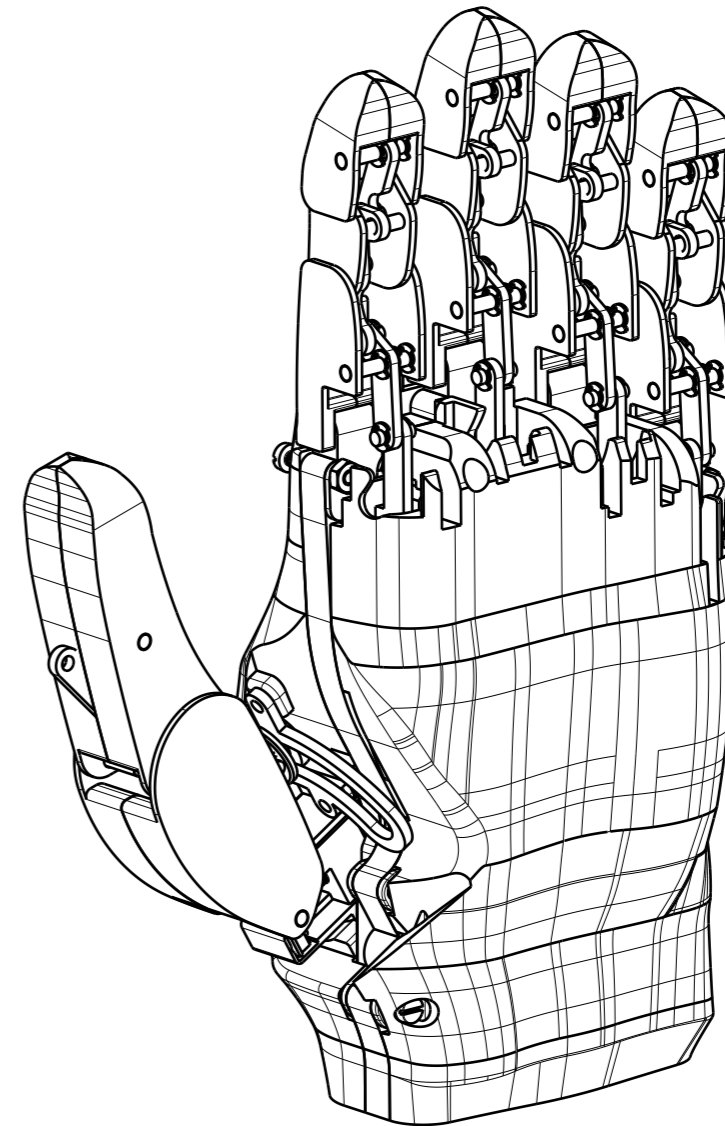
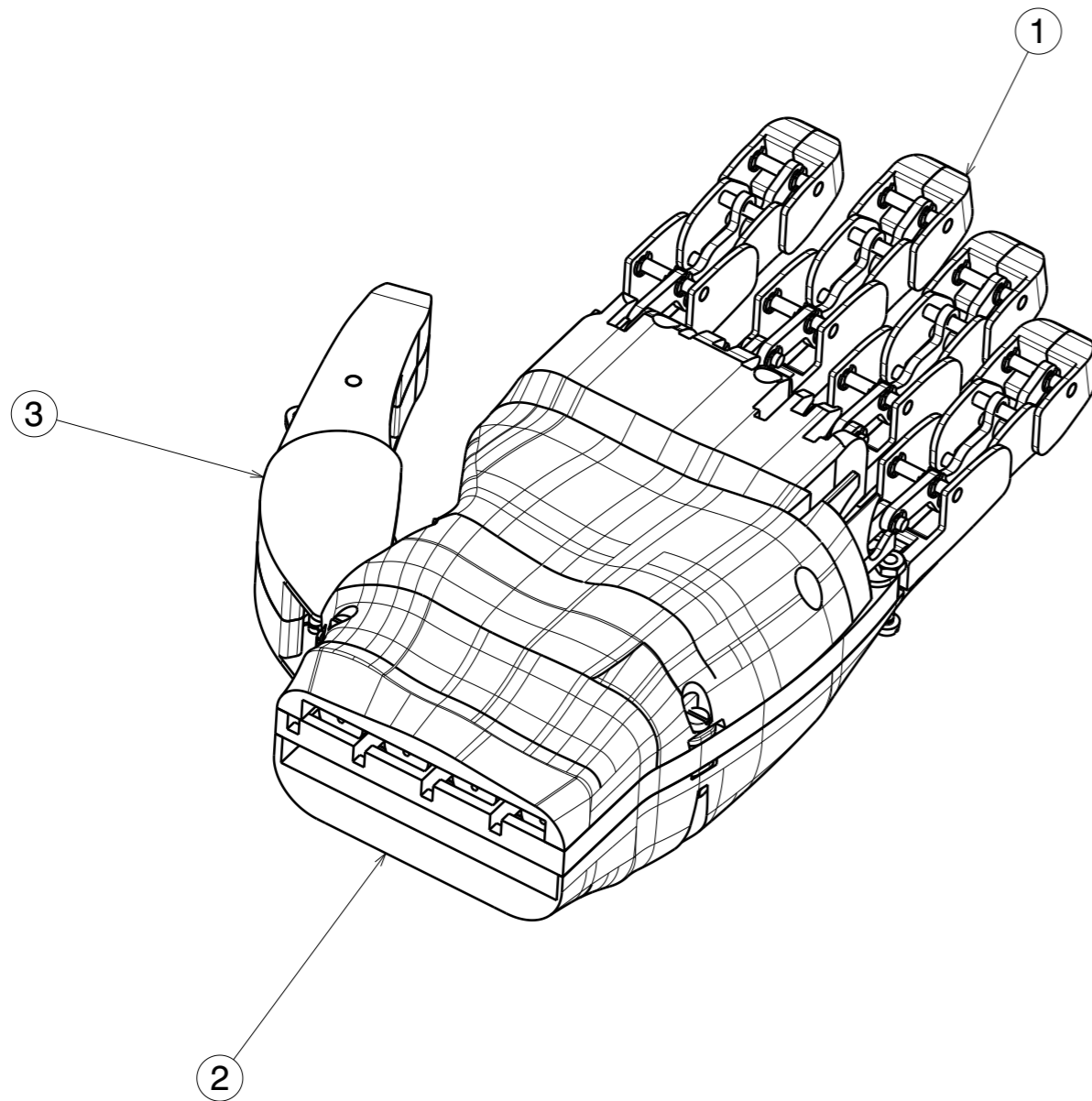
- [13] L. MT, B. JT, G. KD, and D. AM, "Lightweight custom composite prosthetic components using an additive manufacturing-based molding technique," *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Int. Conf.*, vol. 2015, pp. 4797–4802, Nov. 2015, doi: 10.1109/EMBC.2015.7319467.
- [14] A. K. Matta, D. Ranga Raju, and K. N. S. Suman, "The Integration of CAD/CAM and Rapid Prototyping in Product Development: A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 3438–3445, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.MATPR.2015.07.319.
- [15] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROMFG.2017.07.148.
- [16] T. Mikolajczyk, T. Malinowski, L. Moldovan, H. Fuwen, T. Paczkowski, and I. Ciobanu, "CAD CAM System for Manufacturing Innovative Hybrid Design Using 3D Printing," *Procedia Manuf.*, vol. 32, pp. 22–28, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.178.
- [17] J. S. Cuellar, D. Plettenburg, A. A. Zadpoor, P. Breedveld, and G. Smit, "Design of a 3D-printed hand prosthesis featuring articulated bio-inspired fingers," *Eng. Med.*, vol. 235, no. 3, pp. 336–345, Dec. 2020, doi: 10.1177/0954411920980889.
- [18] M. S. Wong, B. H. Beygi, and Y. Zheng, "Materials for Exoskeletal Orthotic and Prosthetic Systems," *Encycl. Biomed. Eng.*, vol. 1–3, pp. 352–367, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-801238-3.11040-2.
- [19] R. Brack and E. H. Amalu, "A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability," *J. Orthop.*, vol. 23, pp. 88–96, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JOR.2020.12.009.
- [20] T. Mangera, G. Govender, and M. Conning, "Light Metals for the Functional Requirements of Developing World Lower Extremity Paediatric Prosthetics: A Review of Current Material & Technology Trends," *Mater. Sci. Forum*, vol. 828–829, pp. 499–505, 2015, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.828-829.499.
- [21] A. Mota, "Materials of Prosthetic Limbs." 2017, Accessed: Oct. 02, 2021. [Online]. Available: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/theses/6m311r66q?locale=en>.
- [22] D. Estay, A. Basoalto, J. Ardila, M. Cerda, and R. Barraza, "Development and Implementation of an Anthropomorphic Underactuated Prosthesis with Adaptive Grip," *Mach. 2021, Vol. 9, Page 209*, vol. 9, no. 10, p. 209, Sep. 2021, doi: 10.3390/MACHINES9100209.
- [23] W. HH, F. JK, C. J, G. RR, and G. K, "Examining the viability of carbon fiber reinforced three-dimensionally printed prosthetic feet created by composite filament fabrication," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 42, no. 6, pp. 644–651, Dec. 2018, doi: 10.1177/0309364618785726.
- [24] N. W. Y. Omar, N. A. Shuaib, M. H. J. A. Hadi, and A. I. Azmi, "Mechanical properties of carbon and glass fibre reinforced composites produced by additive manufacturing: A short review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 670, no. 1, p. 012020, Nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/670/1/012020.

- [25] S. Kuschmitz, A. Schirp, J. Busse, H. Watschke, C. Schirp, and T. Vietor, "Development and processing of continuous flax and carbon fiber-reinforced thermoplastic composites by a modified material extrusion process," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 9, May 2021, doi: 10.3390/MA14092332.
- [26] M. E. Gebel and M. Ermurat, "Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 36, no. 1, pp. 57–67, 2020, doi: 10.17341/GAZIMMFD.606618.
- [27] J. T. Belter and A. M. Dollar, "Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, 2011, doi: 10.1109/ICORR.2011.5975476.
- [28] N. Dechev, W. L. Cleghorn, and S. Naumann, "Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand," *Mech. Mach. Theory*, vol. 36, no. 10, pp. 1157–1173, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0094-114X(01)00035-0.
- [29] B. Massa, S. Roccella, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Design and development of an underactuated prosthetic hand," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002, vol. 4, pp. 3374–3379, doi: 10.1109/robot.2002.1014232.
- [30] Y. Kamikawa and T. Maeno, "Underactuated five-finger prosthetic hand inspired by grasping force distribution of humans," *2008 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS*, pp. 717–722, 2008, doi: 10.1109/IROS.2008.4650628.
- [31] M. Controzzi, C. Cipriani, and M. C. Carrozza, "Mechatronic design of a transradial cybernetic hand," *2008 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst. IROS*, pp. 576–581, 2008, doi: 10.1109/IROS.2008.4650987.
- [32] S. A. Dalley, D. A. Bennett, and M. Goldfarb, "Functional Assessment of the Vanderbilt Multigrasp Myoelectric Hand: A Continuing Case Study," *Conf. Proc. ... Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf.*, vol. 2014, p. 6195, Nov. 2014, doi: 10.1109/EMBC.2014.6945044.
- [33] L. Resnik, F. Acluche, and M. Borgia, "The DEKA hand: A multifunction prosthetic terminal device—patterns of grip usage at home," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 42, no. 4, pp. 446–454, Aug. 2018, doi: 10.1177/0309364617728117.
- [34] M. Laffranchi *et al.*, "The Hannes hand prosthesis replicates the key biological properties of the human hand," *Sci. Robot.*, vol. 5, no. 46, Sep. 2020, doi: 10.1126/SCIROBOTICS.ABB0467.
- [35] Q. A. Boser, M. R. Dawson, J. S. Schofield, G. Y. Dziwenko, and J. S. Hebert, "Defining the design requirements for an assistive powered hand exoskeleton: A pilot explorative interview study and case series," *Prosthet. Orthot. Int.*, 2020, doi: 10.1177/0309364620963943.
- [36] A. Eshraghi *et al.*, "A custom, functional and lifelike passive prosthetic hand for infants and small toddlers: Clinical note," *Prosthet. Orthot. Int.*, vol. 44, no. 3, pp. 180–184, Jun. 2020, doi: 10.1177/0309364620909276.
- [37] R. L. (Richard L. Drake, W. Vogl, and A. W. M. R. P. Mitchell, *Gray. Anatomía para estudiantes*. Elsevier, 2020.

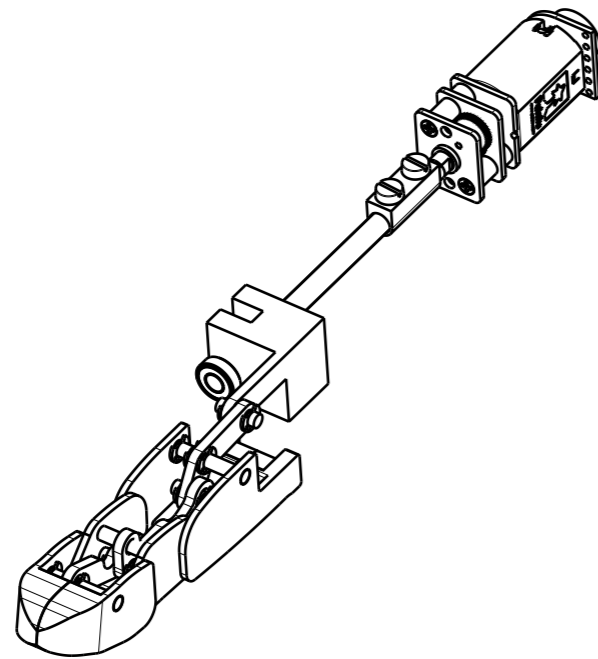
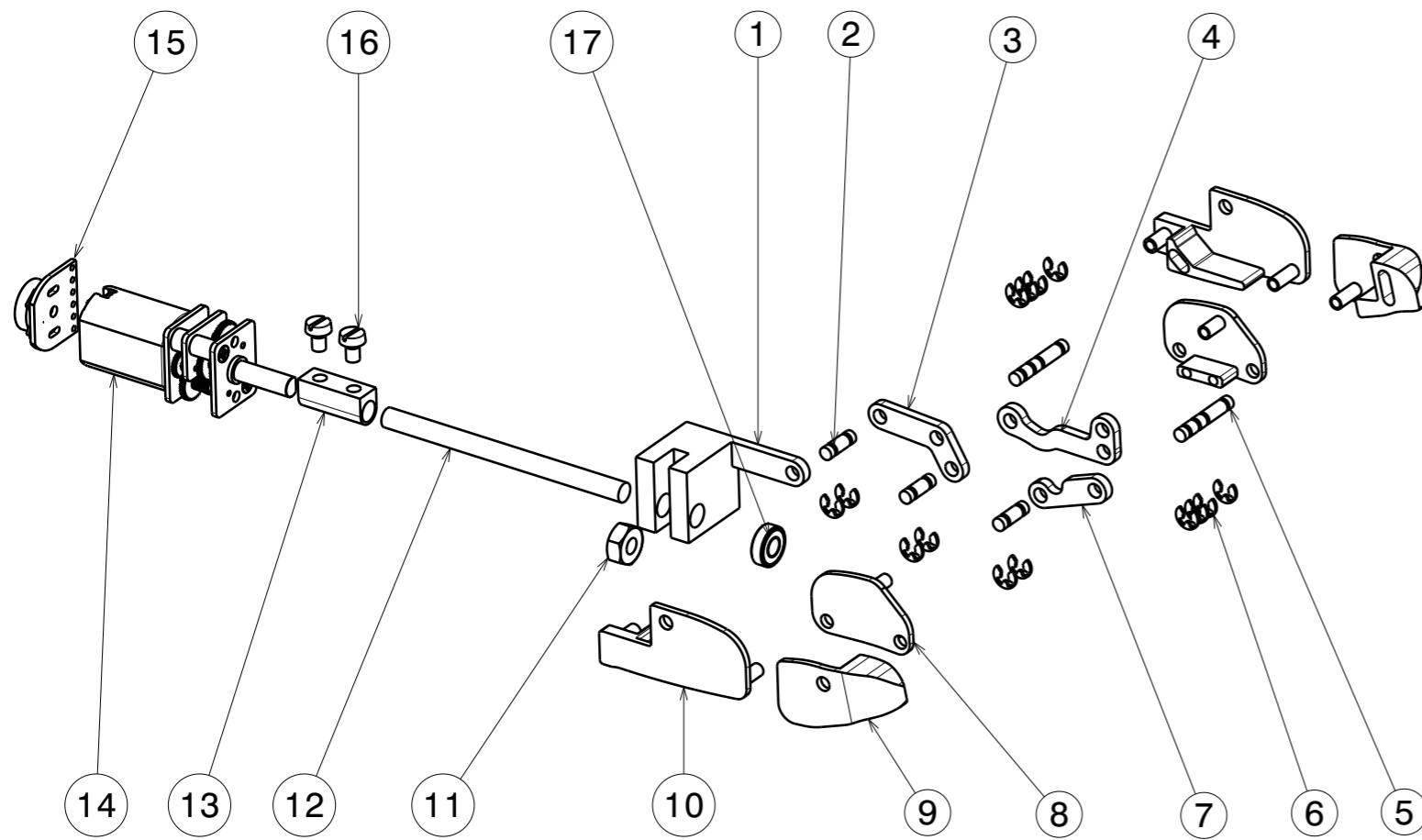
- 
- [38] Z. Meng *et al.*, “Comparative Analysis of Lipid Composition and Thermal, Polymorphic, and Crystallization Behaviors of Granular Crystals Formed in Beef Tallow and Palm Oil,” *J. Agric. Food Chem.*, vol. 59, no. 4, pp. 1432–1441, Feb. 2011, doi: 10.1021/JF103875F.
- [39] D. J. Munk, D. J. Auld, G. P. Steven, and G. A. Vio, “On the benefits of applying topology optimization to structural design of aircraft components,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 60, no. 3, pp. 1245–1266, Sep. 2019, doi: 10.1007/S00158-019-02250-6/FIGURES/17.
- [40] J. Liu *et al.*, “Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing,” *Struct. Multidiscip. Optim.* 2018 576, vol. 57, no. 6, pp. 2457–2483, May 2018, doi: 10.1007/S00158-018-1994-3.

## 9. Planos.

A continuación, se presentan los planos de las piezas utilizadas para el montaje de la mano. Las piezas que han sido fabricadas por impresión 3D no se representaran en los planos.

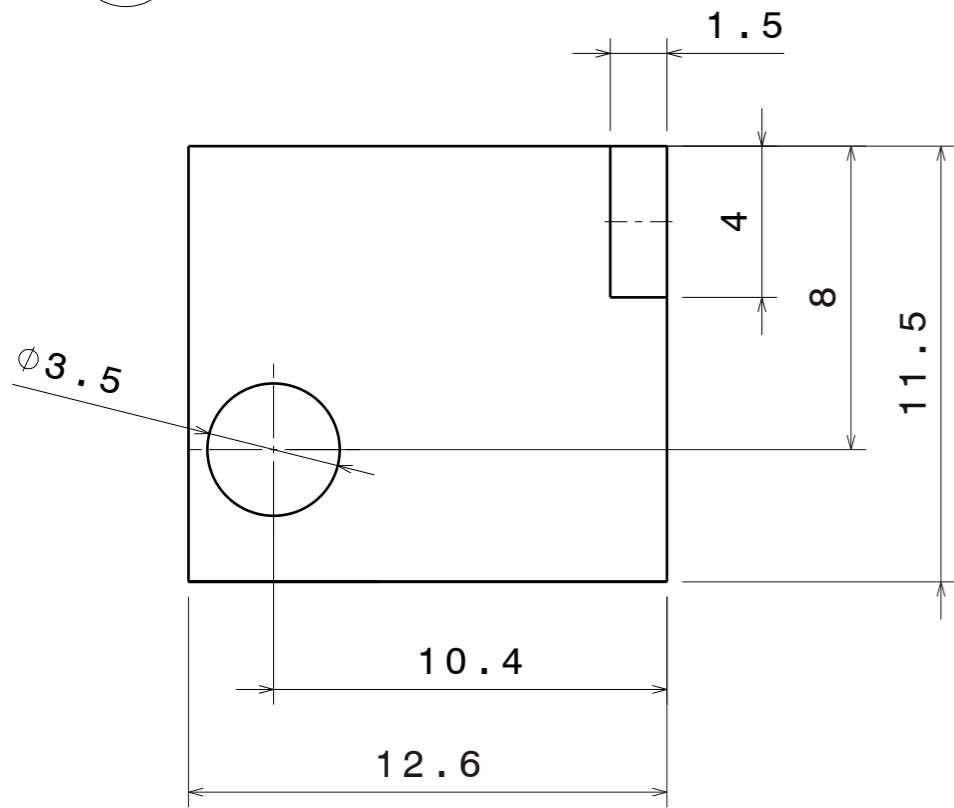


3	Dedo Pulgar	1	-	
2	Mano	1	-	
1	Dedo	4	-	
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación	
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE CONJUNTO- ENSAMBLAJE DE LA PRÓTESIS DE MANO ROBÓTICA	
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	11/09/21		
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21		
	Sistema de proyección:			
	Plano N°:	Escala 1:1	Formato: A3	Hoja 1 de 17
	1			

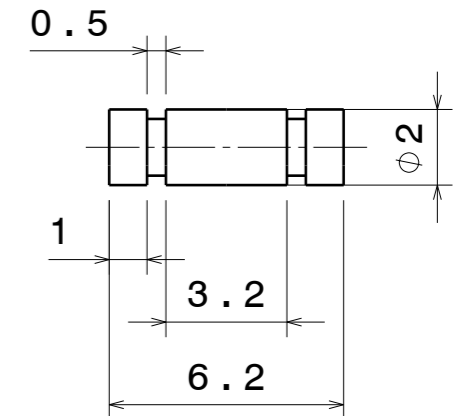
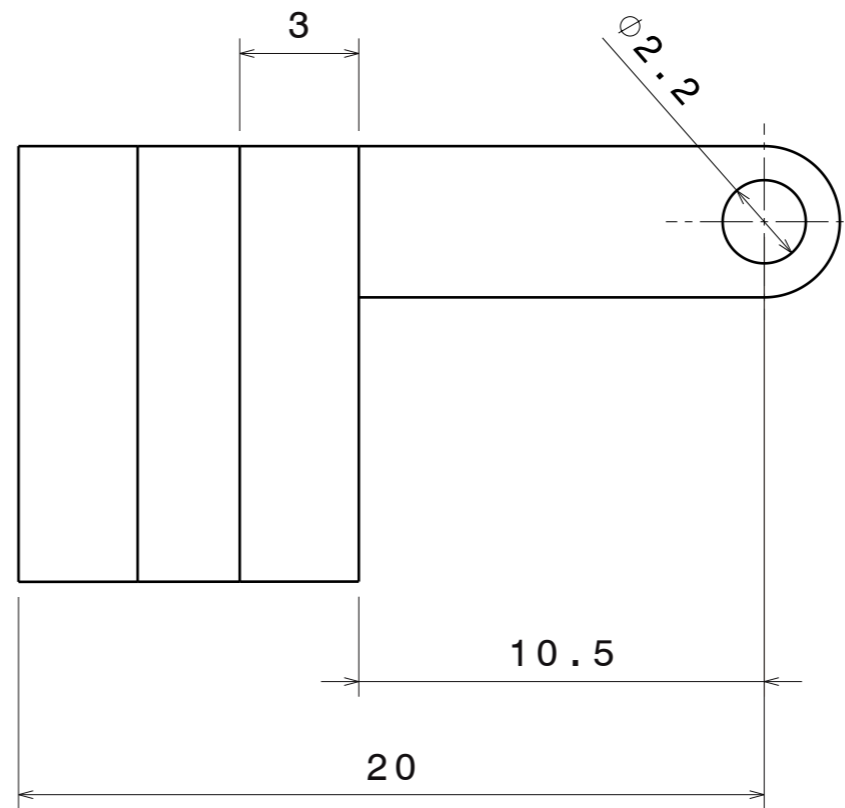


17	Rodamiento de bolas de 3mm	1	693ZZ
16	Tornillo M2,5x3	1	DIN-84
15	Encoder	1	-
14	Polulu Micrometal 30:1	1	-
13	Adaptador	1	Latón
12	Eje roscado	1	Acero cincado
11	Tuerca M2	1	DIN-934
10	Falange Proximal	1	Aluminio 5083
9	Falange Distal	1	Aluminio 5083
8	Falange Media	1	Aluminio 5083
7	Barra 1	1	Aluminio 5083
6	Anillo Clip 1,5 mm	14	DIN-6799
5	Eje 2	2	Acero Plata
4	Barra 2	1	Aluminio 5083
3	Barra 3	1	Aluminio 5083
2	Eje 1	3	Acero Plata
1	Barra 4	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Norma
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE SUBCONJUNTO- EXPLOSIONADO DEL ENSAMBLAJE DEL DEDO
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	11/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
	Sistema de proyección:		Formato: A3
	Plano N°:	1.01	
			Hoja 2 de 17

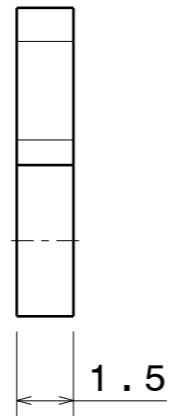
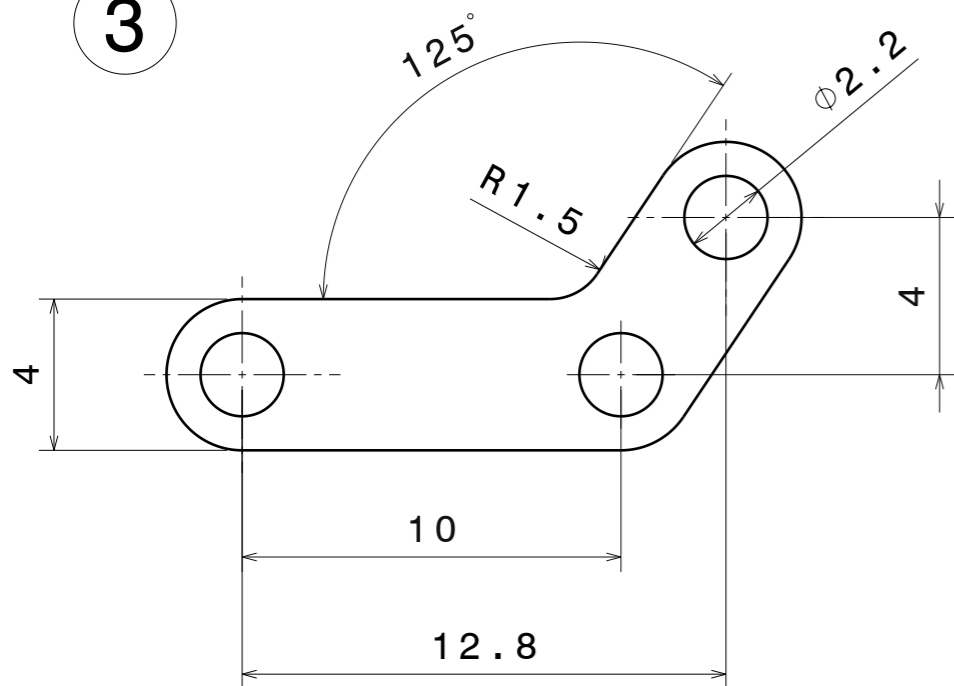
1


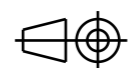


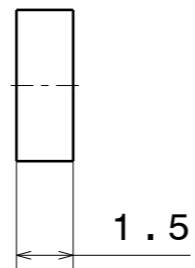
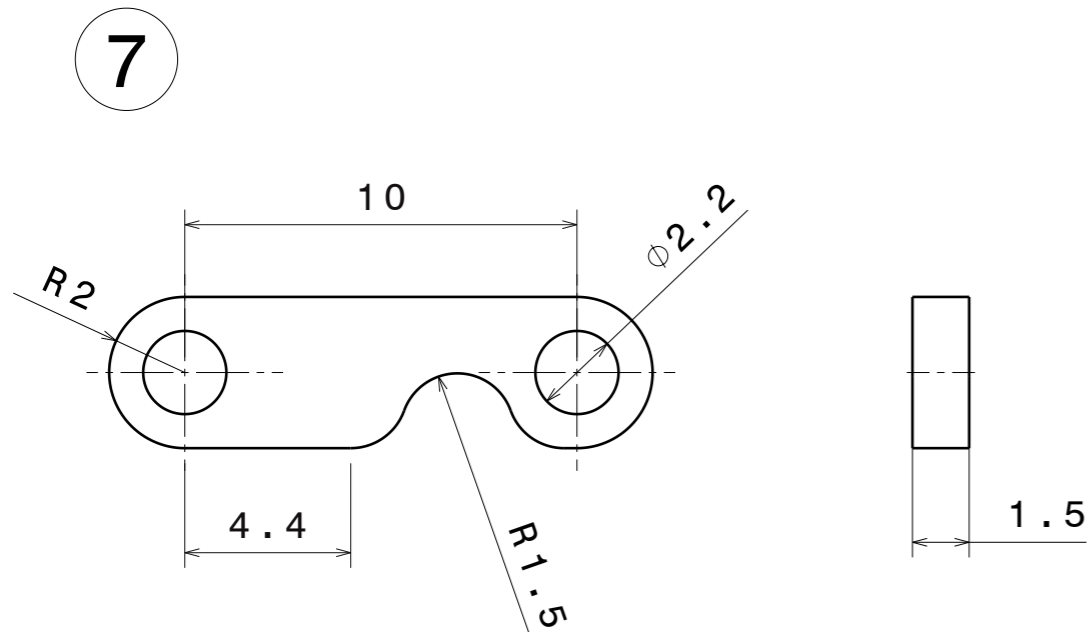
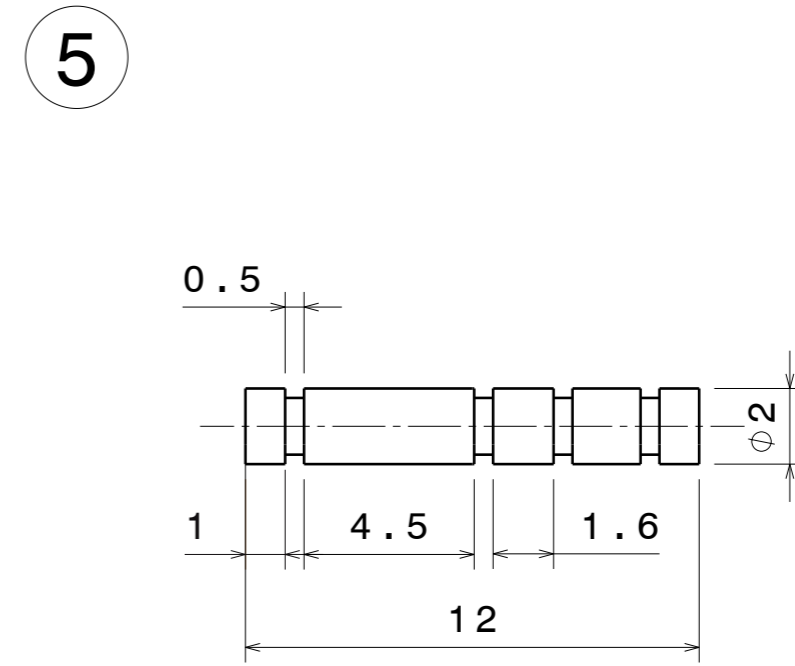
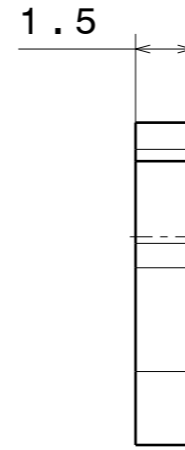
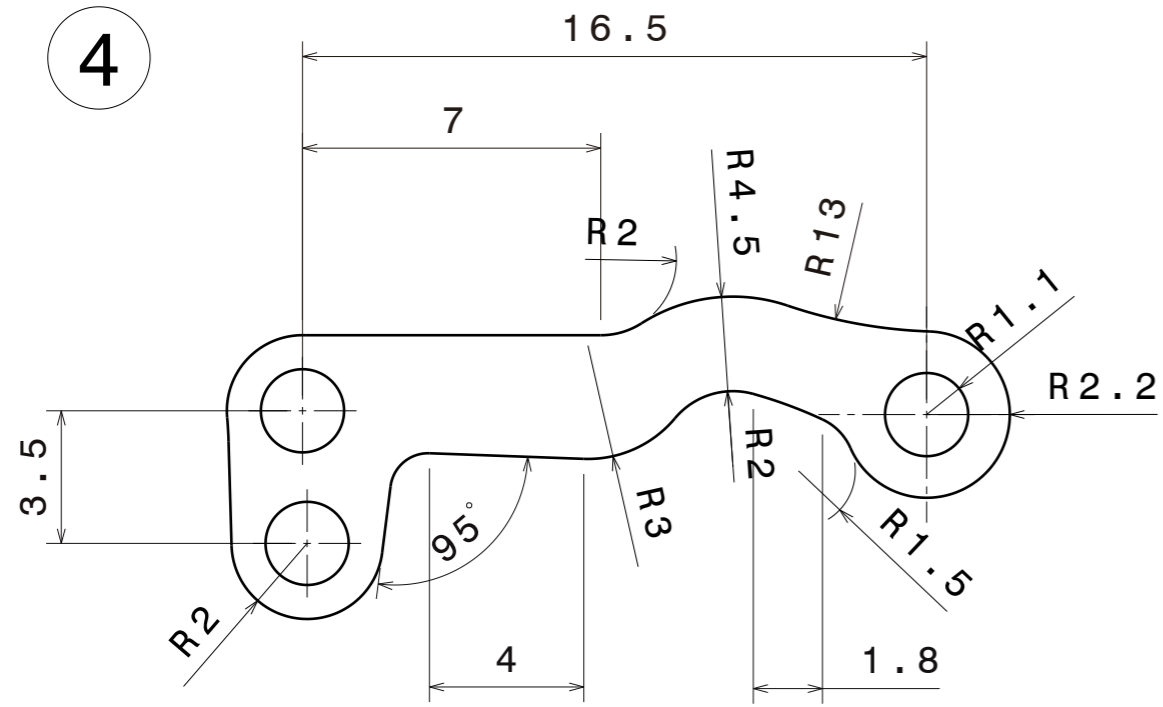
2





3

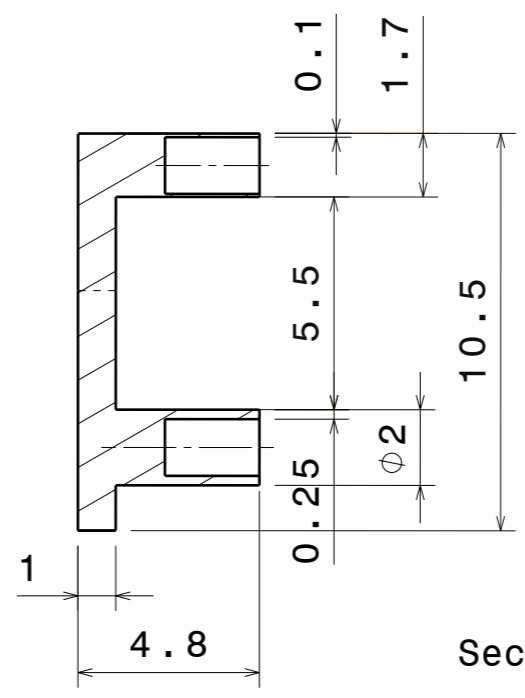
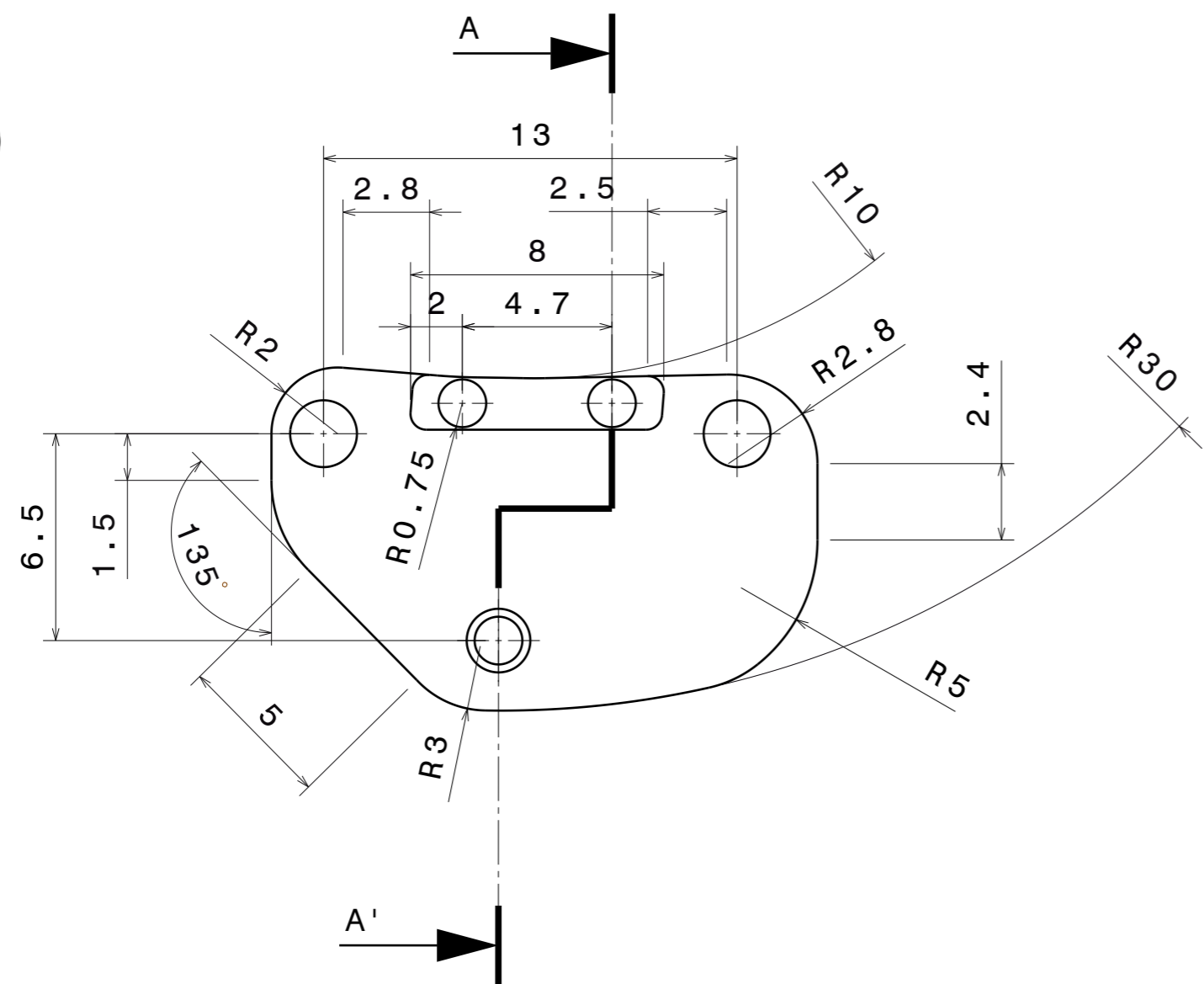


3	Barra 3	1	Aluminio 5083
2	Eje 1	3	Acero Plata
1	Barra 4	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	11/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
 UCA Universidad de Cádiz	Sistema de proyección:		Formato: A3
	Plano N°:	1.01.01	
			Hoja 3 de 17

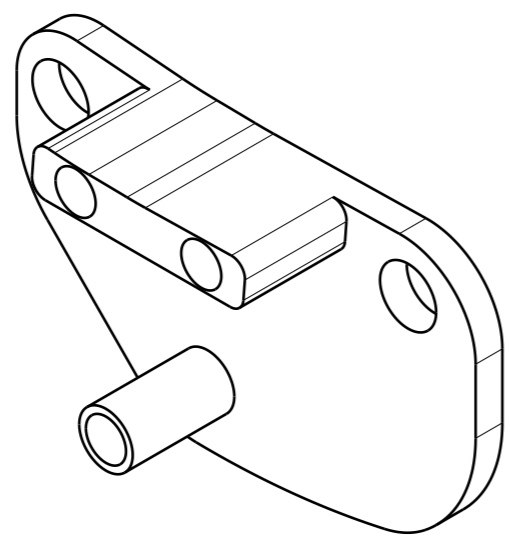


7	Barra 1	1	Aluminio 5083		
5	Eje 2	2	Acero Plata		
4	Barra 2	1	Aluminio 5083		
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación		
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano		
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	11/09/21	PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO		
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21			
Sistema de proyección: 					
		Plano N°: 1.01.02	Escala 5:1	Formato: A3	Hoja 4 de 17

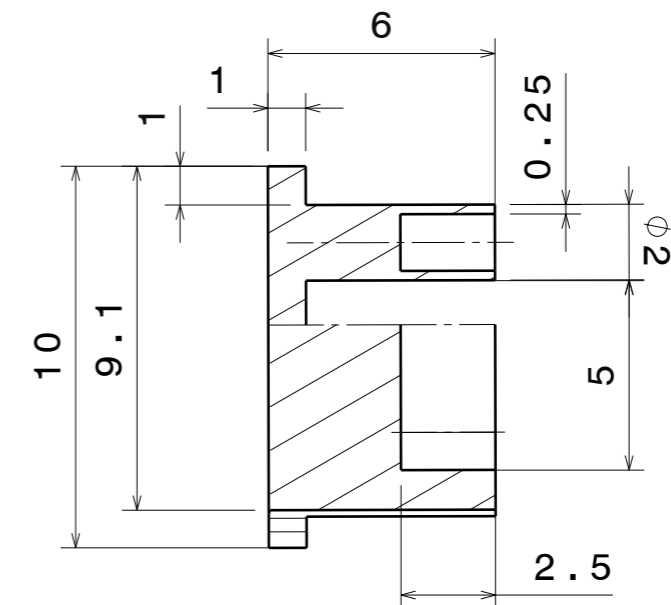
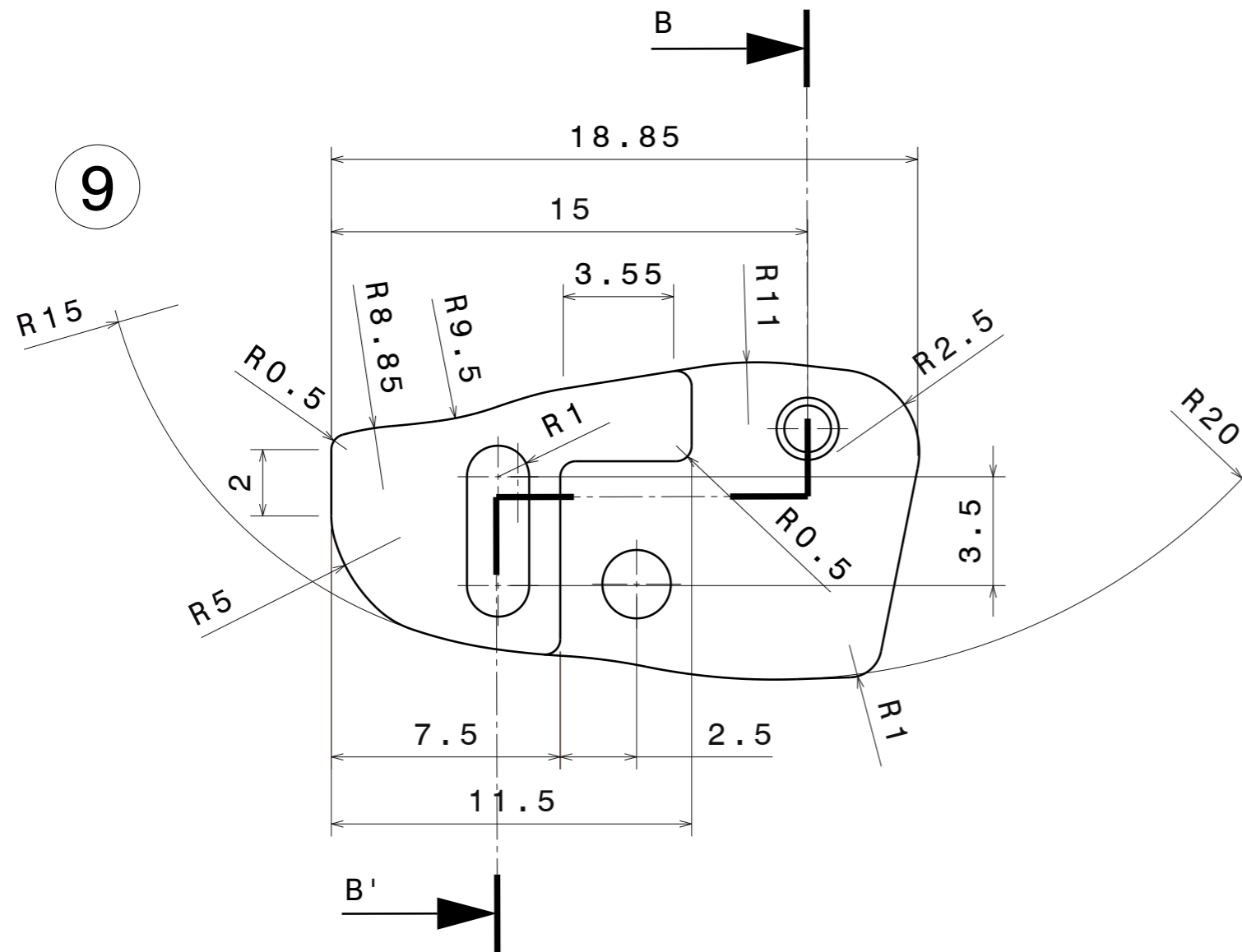
8



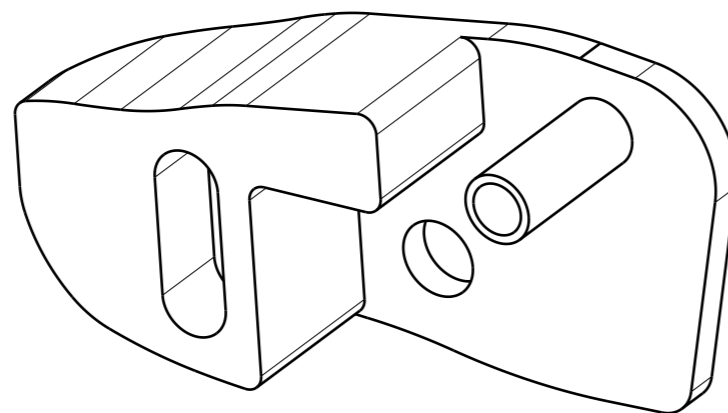
Sección A-A'

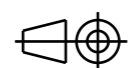



8	Falange Media	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	12/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
UCA Universidad de Cádiz	Sistema de proyección:		Formato: A3
	Plano N°:	1.01.03	
			Hoja 5 de 17

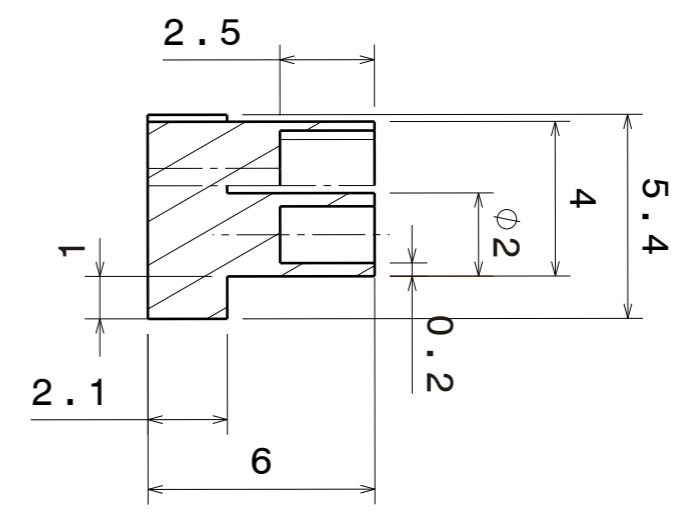
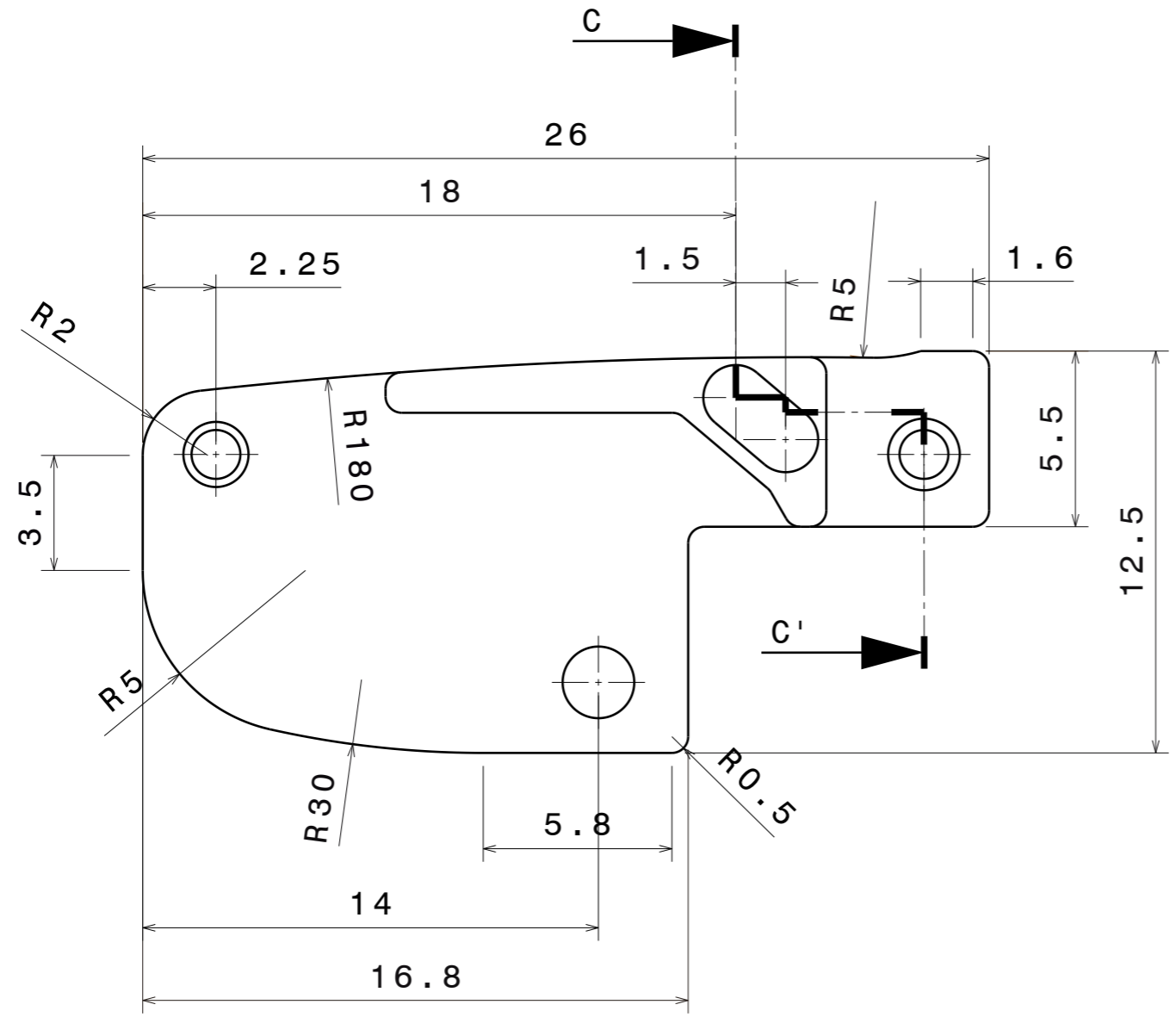


Sección B-B'

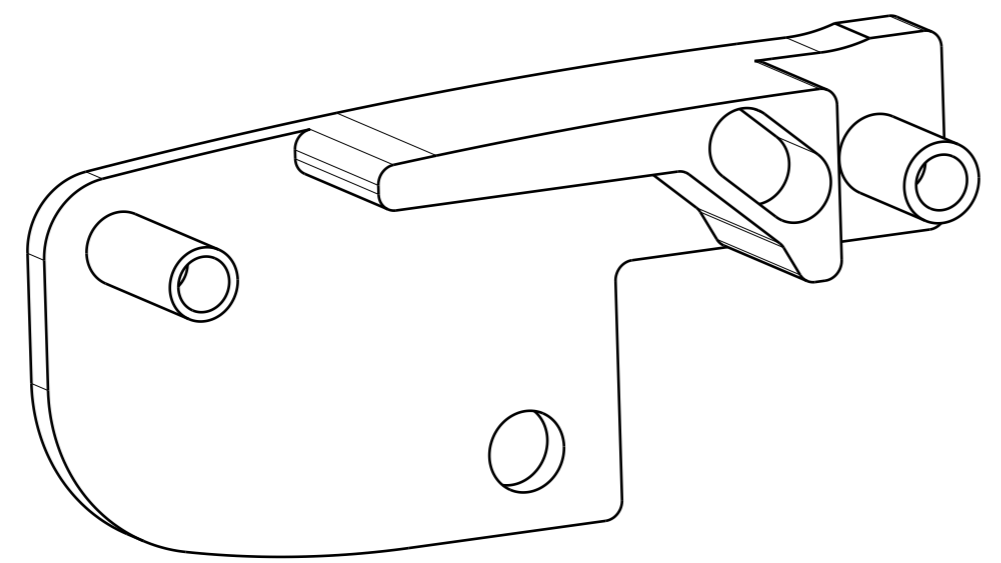


9	Falange Distal	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	12/09/21	PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
Sistema de proyección: 			
		Plano N°: 1.01.04	Escala 5:1
		Formato: A3	Hoja 6 de 17

10

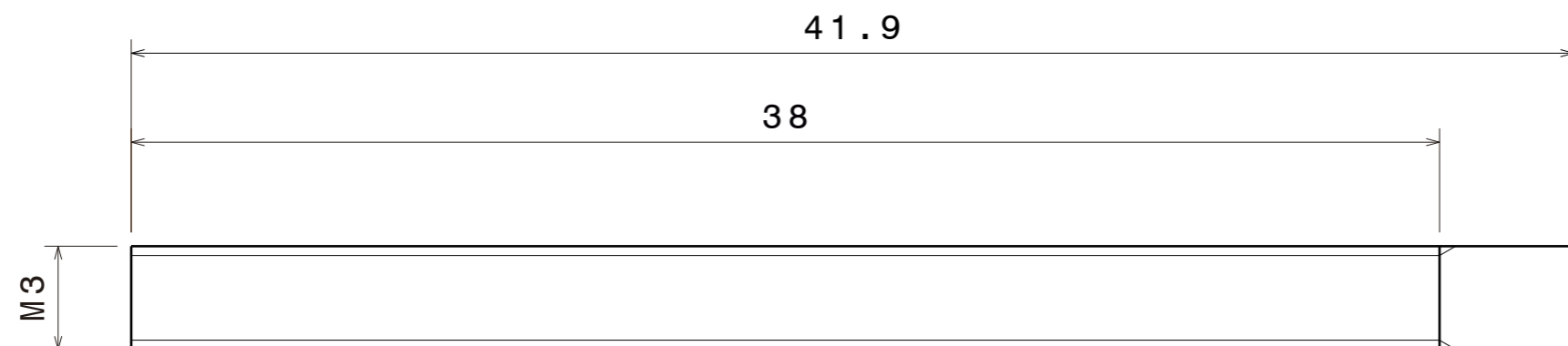


Sección C-C'

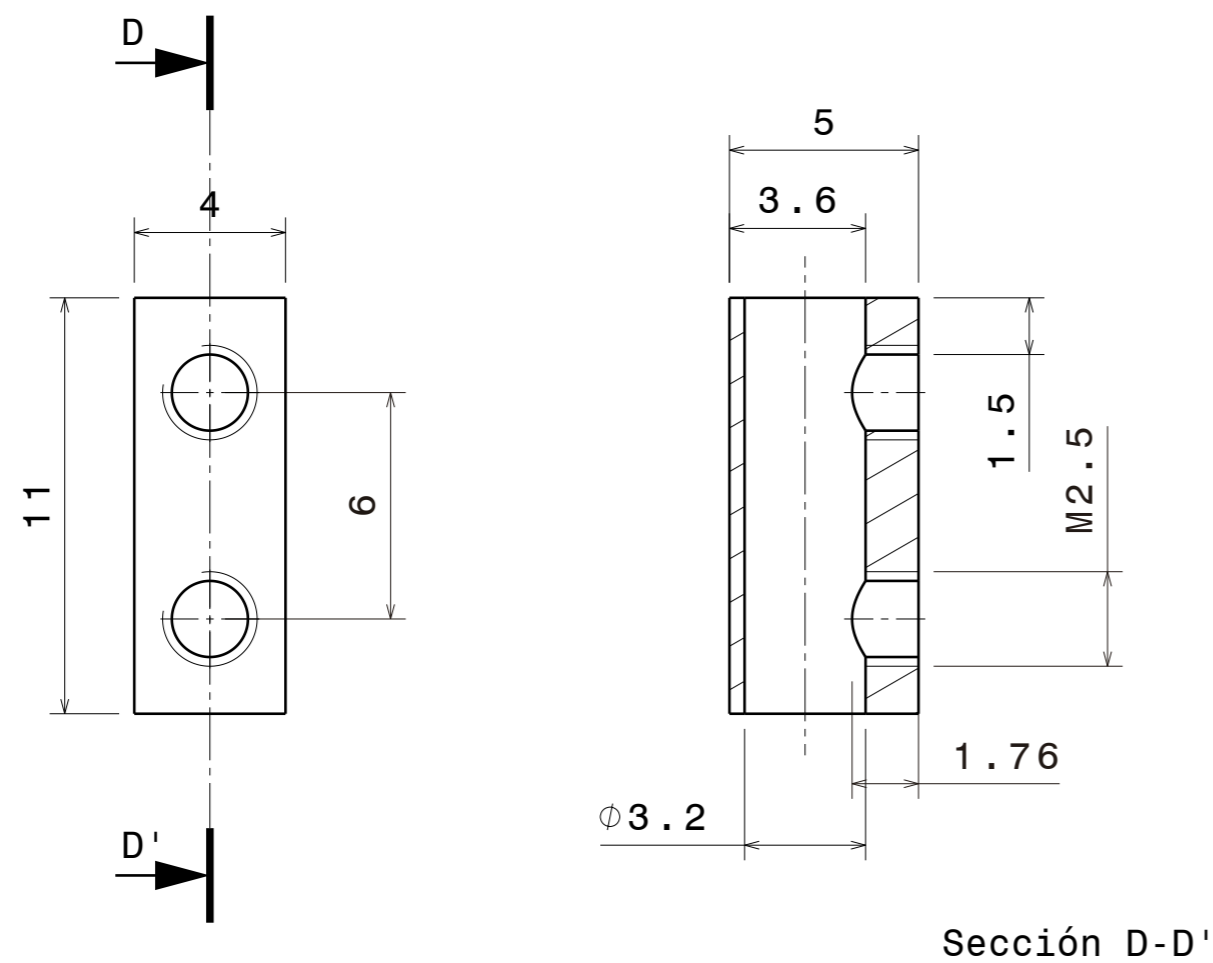



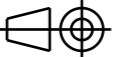
10	Falange Proximal		1	Aluminio 5083
Marca	Nombre		Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO	
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	12/09/21		
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21		
UCA Universidad de Cádiz	Sistema de proyección:		Formato: A3	Hoja 7 de 17
	Plano N°:	1.01.05	Escala 5:1	

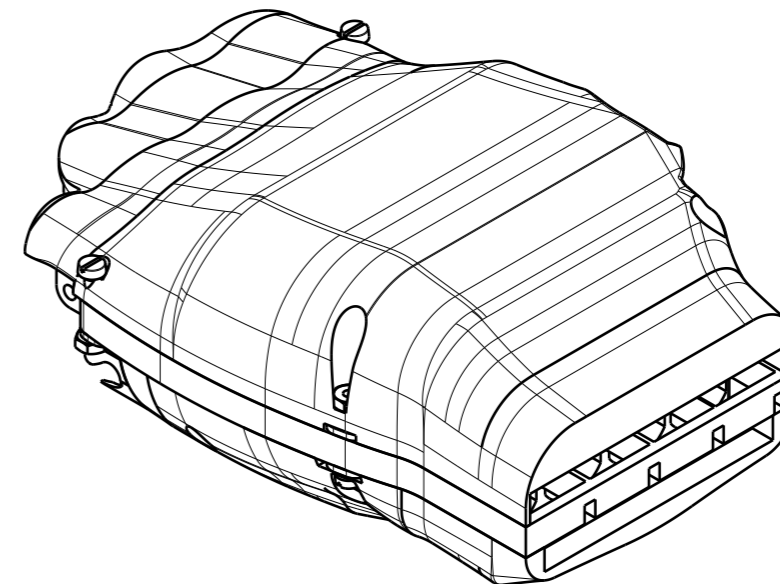
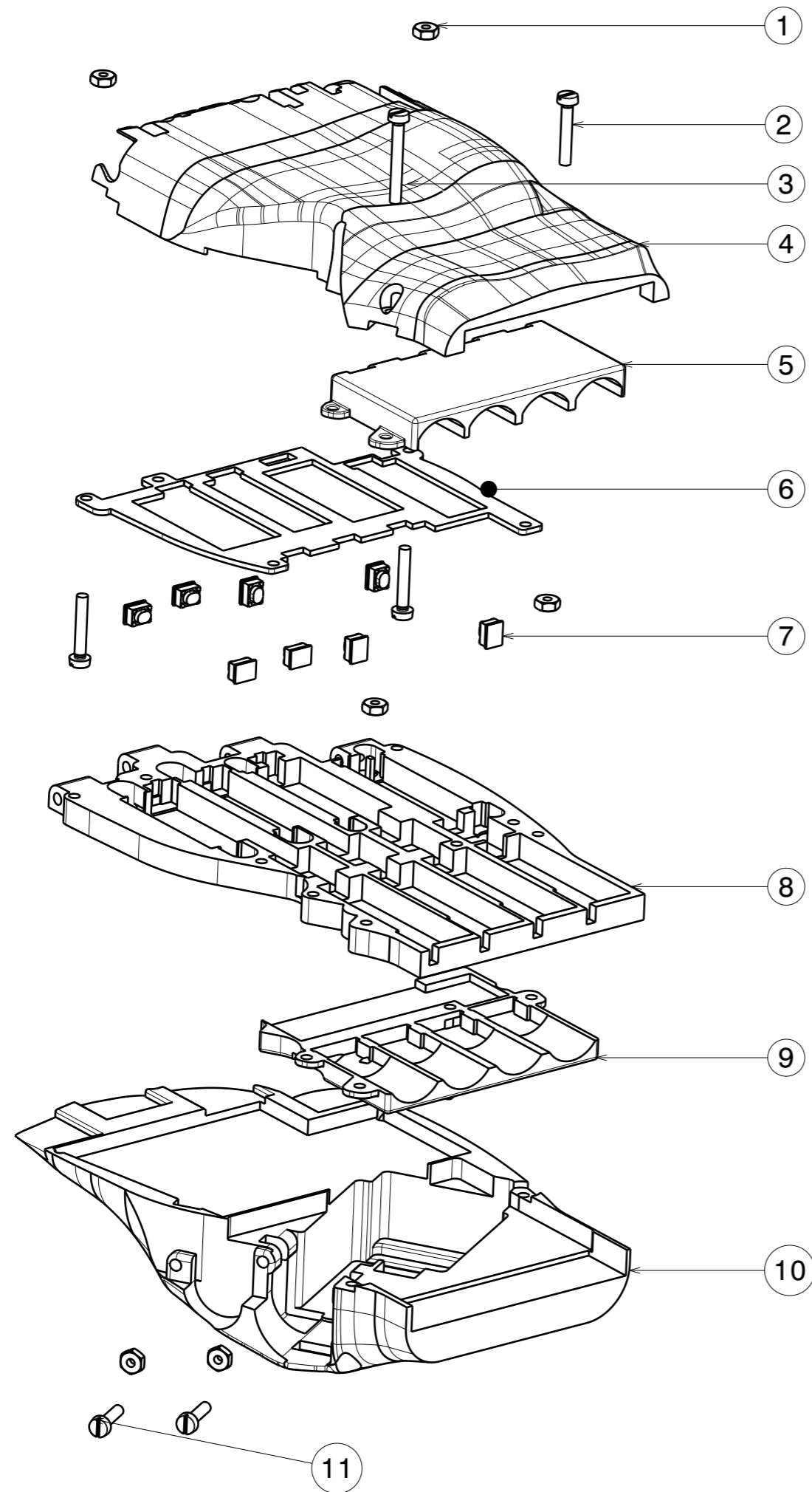
12



13

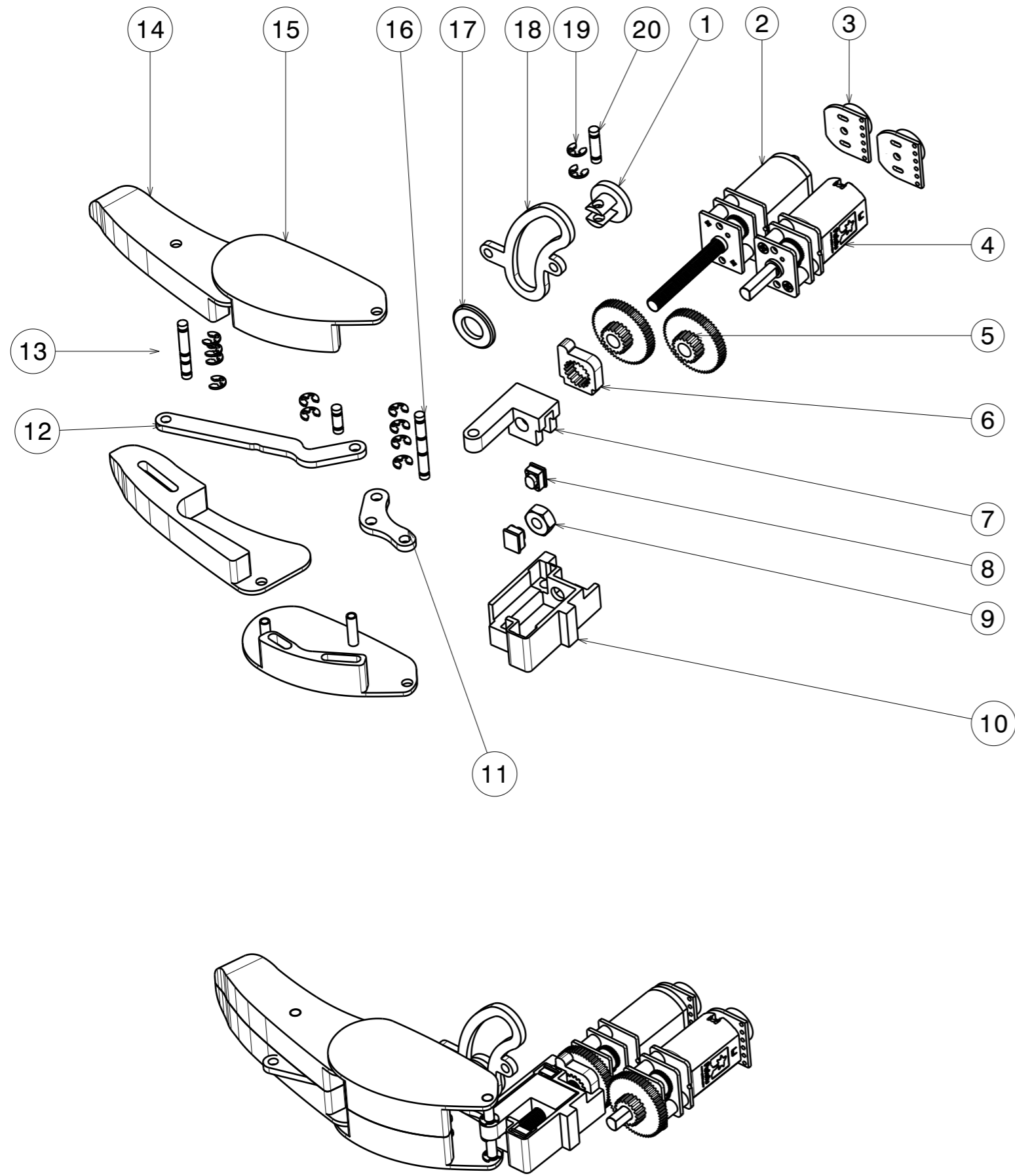


13	Adaptador	1	Latón
12	Eje roscado	1	Acero cincado
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	12/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
	Sistema de proyección:		
	Plano N°:	1.01.06	Escala 5:1
		Formato: A3	Hoja 8 de 17


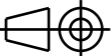


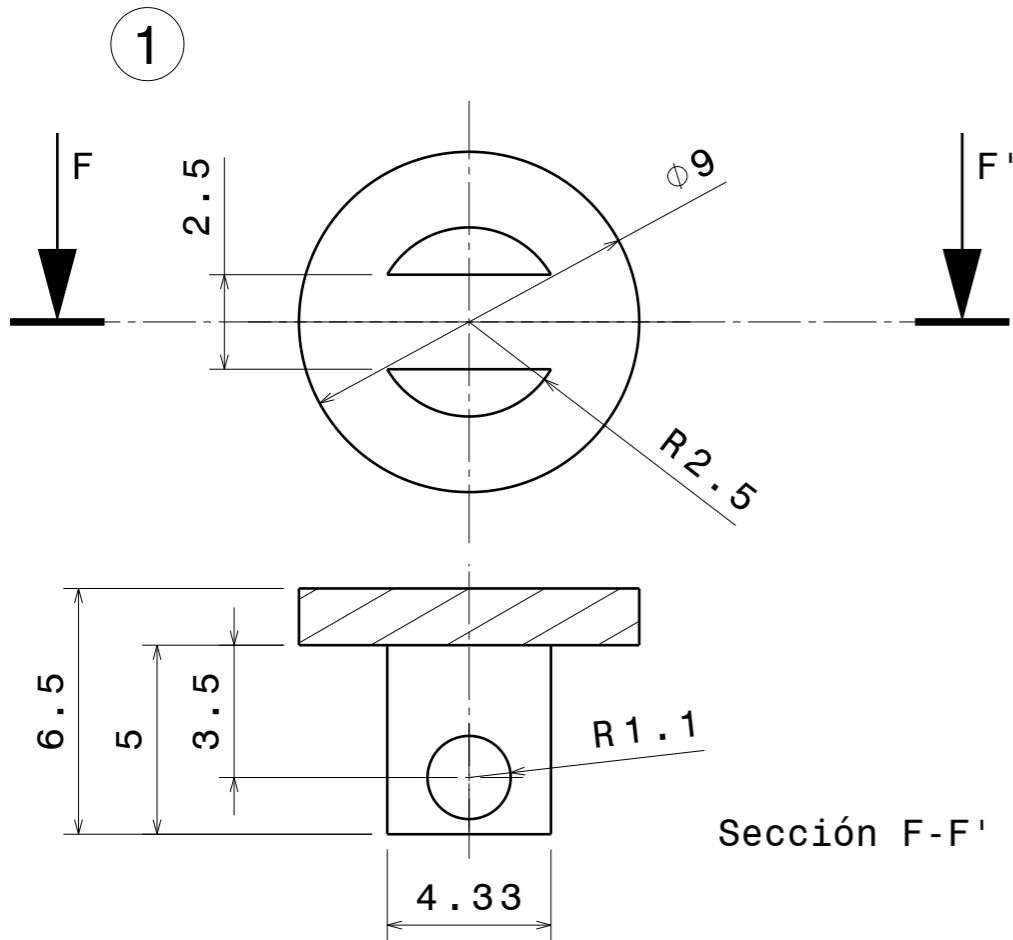
11	Tornillo M2x8	2	DIN-84
10	Mano Superior	1	PLA
9	Pieza sujeccion motores 2	1	PLA
8	Estructura Media	1	Aluminio 5083
7	Interruptor	8	-
6	Guía	1	Acero Inoxidable
5	Pieza sujeccion motores 1	1	PLA
4	Mano Inferior	1	PLA
3	Tornillo M2x16	1	DIN-84
2	Tornillo M2x12	3	DIN-84
1	Tuerca M2	6	DIN-934
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE SUBCONJUNTO- EXPLOSIONADO DEL ENSAMBLAJE DE LAS PIEZAS DE LA MANO
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	13/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
	Sistema de proyección:		
	Plano N°:	1.02	Escala 1:1
		Formato: A3	Hoja 9 de 17



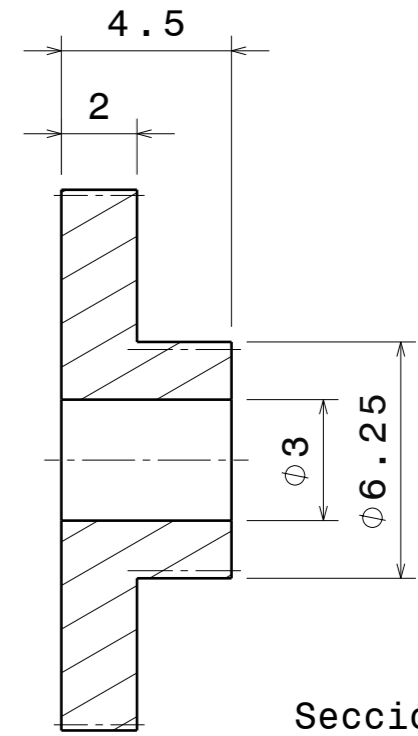
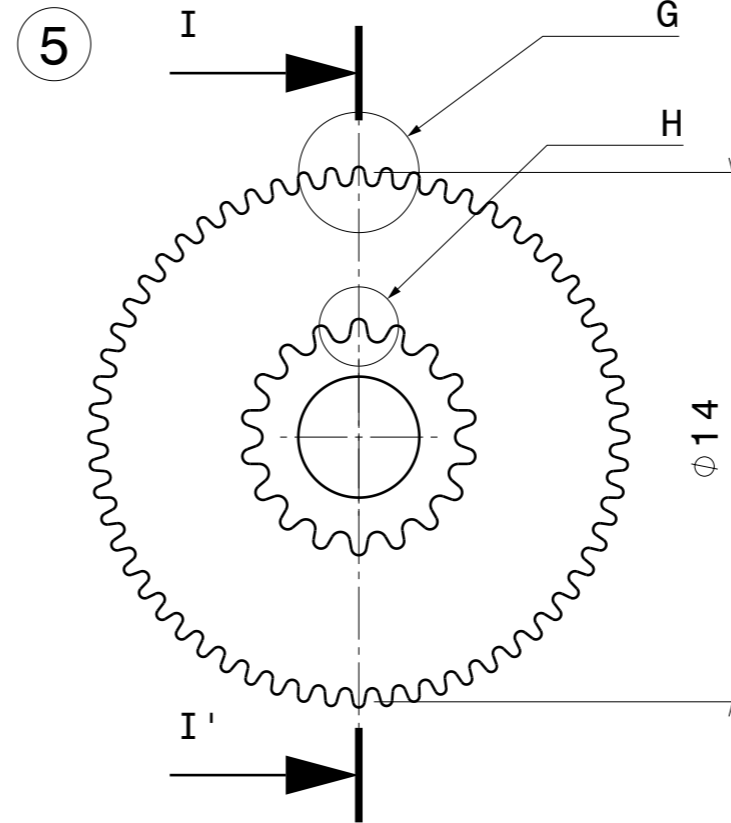


20	Eje 1	2	Acero Plata
19	Anillo Clip 1,5 mm	12	DIN-6799
18	Guía de Giro	1	Aluminio 5083
17	Arandela M5	1	DIN-125
16	Eje 3	1	Acero Plata
15	Falange Proximal	1	Aluminio 5083
14	Falange Distal	1	Aluminio 5083
13	Eje 2	1	Acero Plata
12	Barra 1	1	Aluminio 5083
11	Barra 2	1	Aluminio 5083
10	Guía Lineal	1	Aluminio 5083
9	Tuerca M2	1	DIN-934
8	Interruptor	4	-
7	Barra 3	1	Aluminio 5083
6	Adaptador del engranaje	1	Acero Inoxidable
5	Engranaje	2	Latón
4	Polulu Micrometal 30:1	1	-
3	Encoder	2	-
2	Polulu Micrometal Eje M3	1	-
1	Barra 4	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación

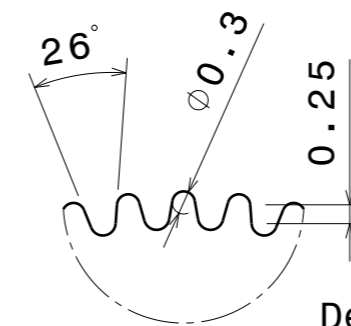
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE SUBCONJUNTO- EXPLOSIONADO DEL ENSAMBLAJE DEL DEDO PULGAR	
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	13/09/21		
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21		
	Sistema de proyección: 		Formato: A3	Hoja 11 de 17
	Plano N°:	1.03		



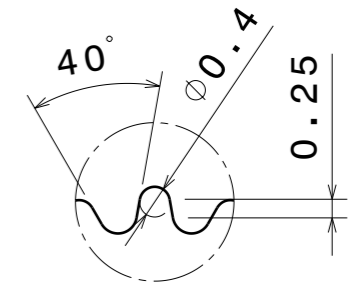
Sección F-F'



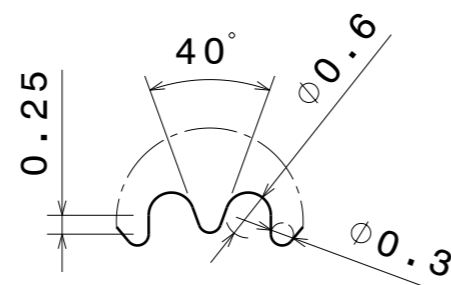
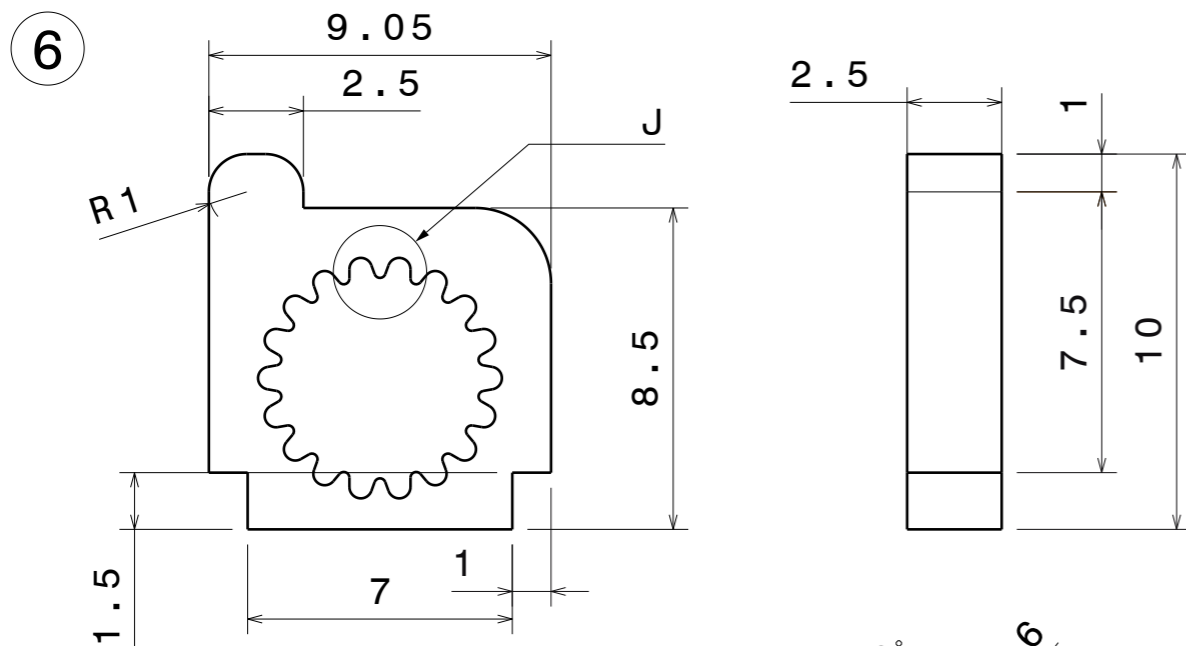
Sección I-I'



Detalle G  
Escala: 10:1

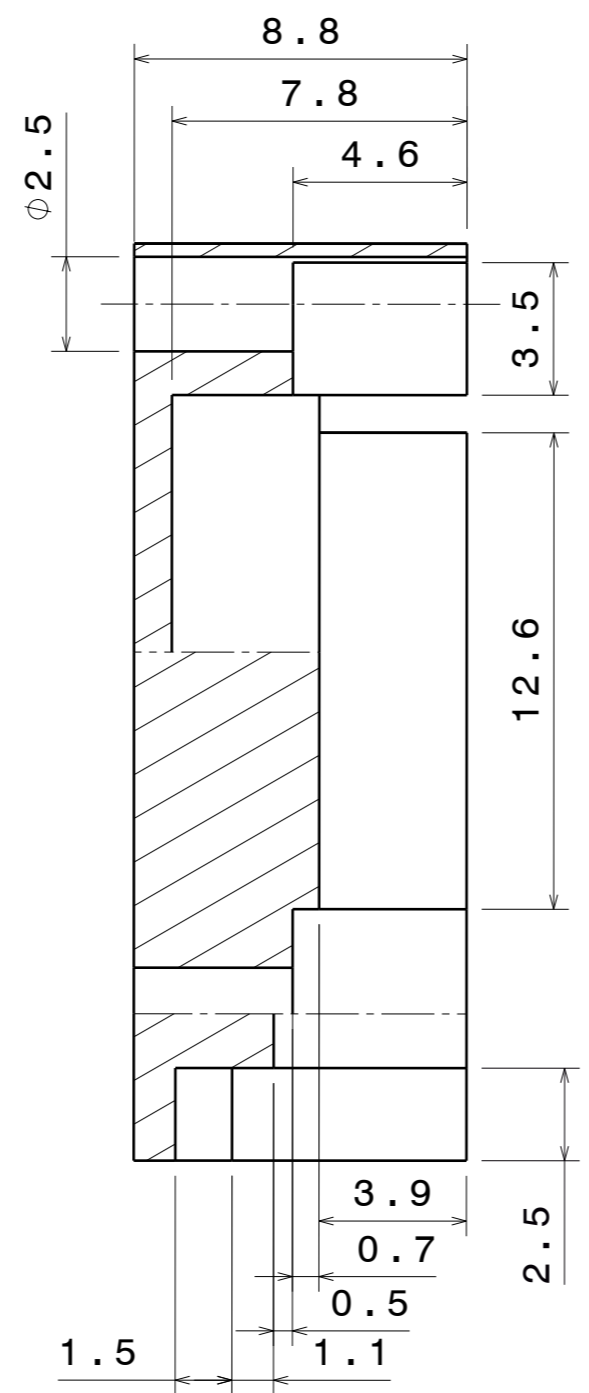
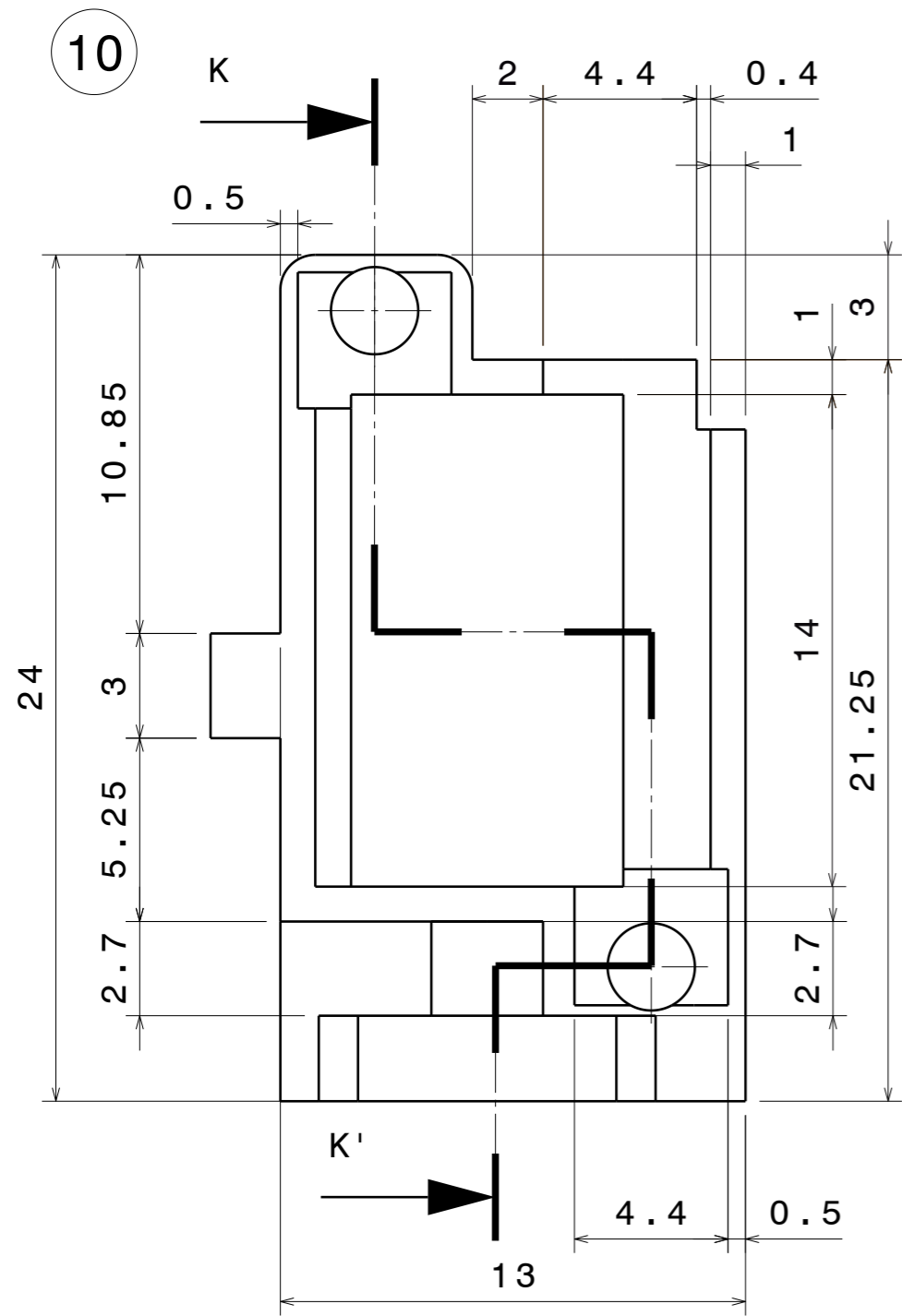


Detalle H  
Escala: 10:1

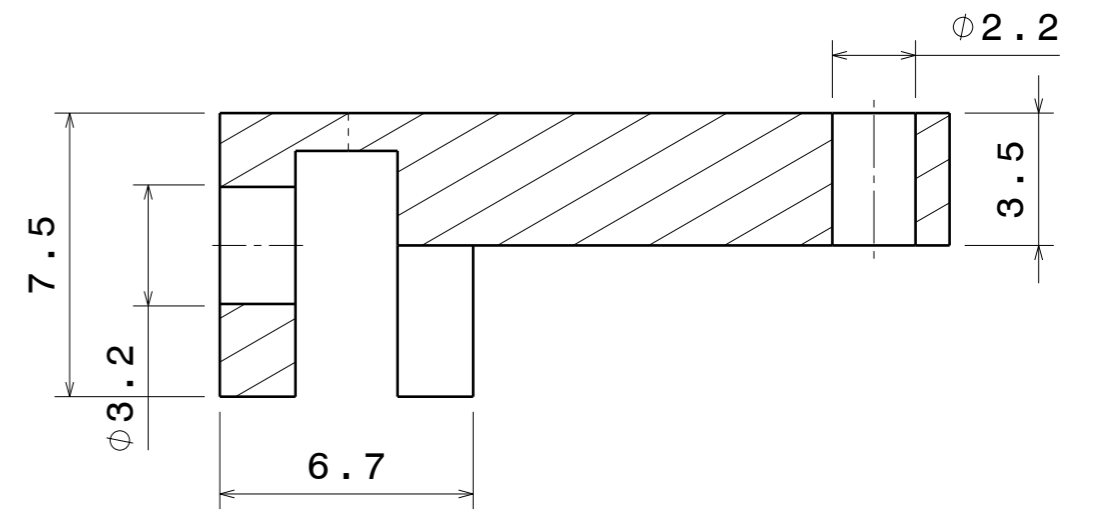
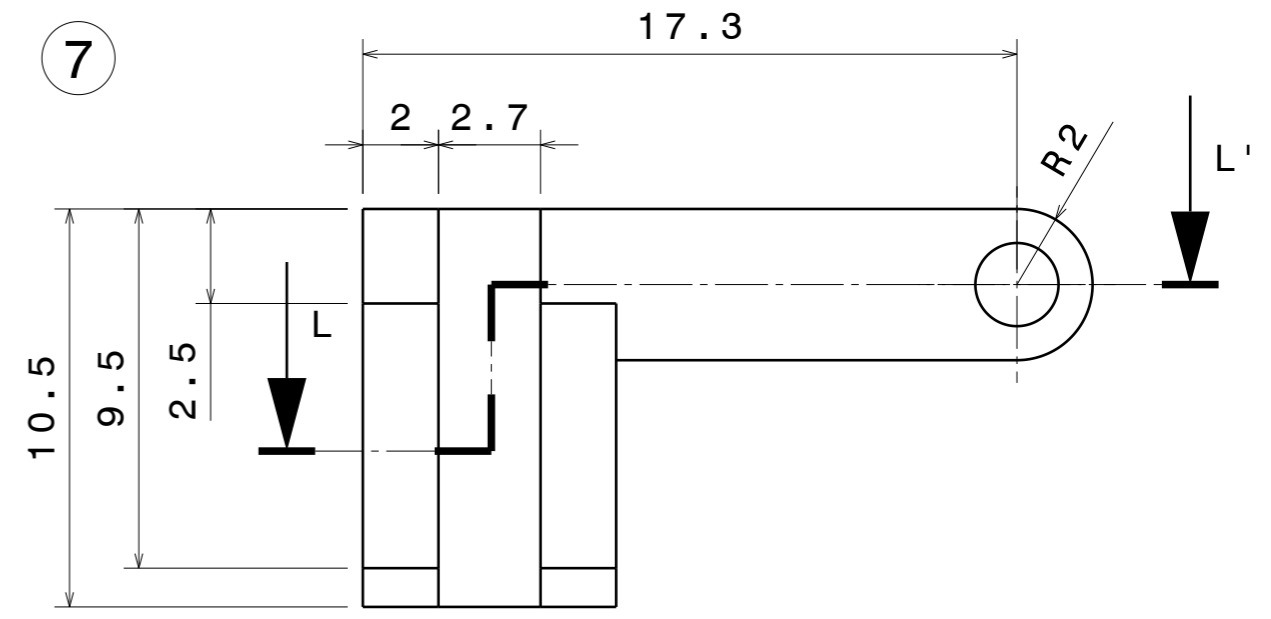


Detalle J  
Escala: 10:1



6	Adaptador del engranaje	1	Acero Inoxidable
5	Engranaje	2	Latón
1	Barra 4	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	13/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
	Sistema de proyección:		
	Plano N°:	Escala 5:1	Formato: A3
	1.03.01		Hoja 12 de 17



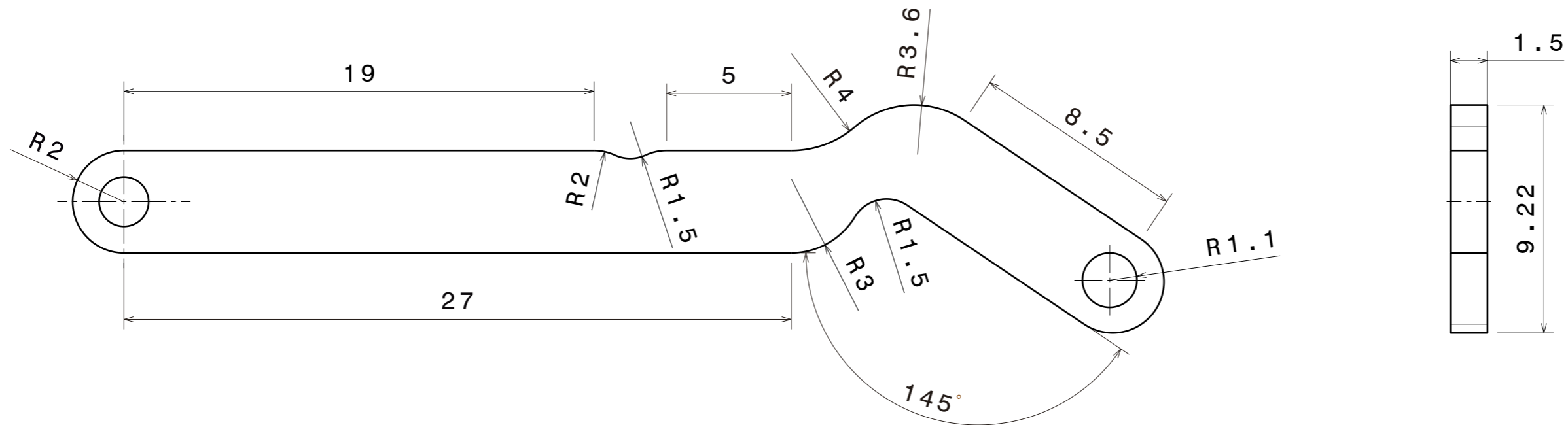
Sección K-K'



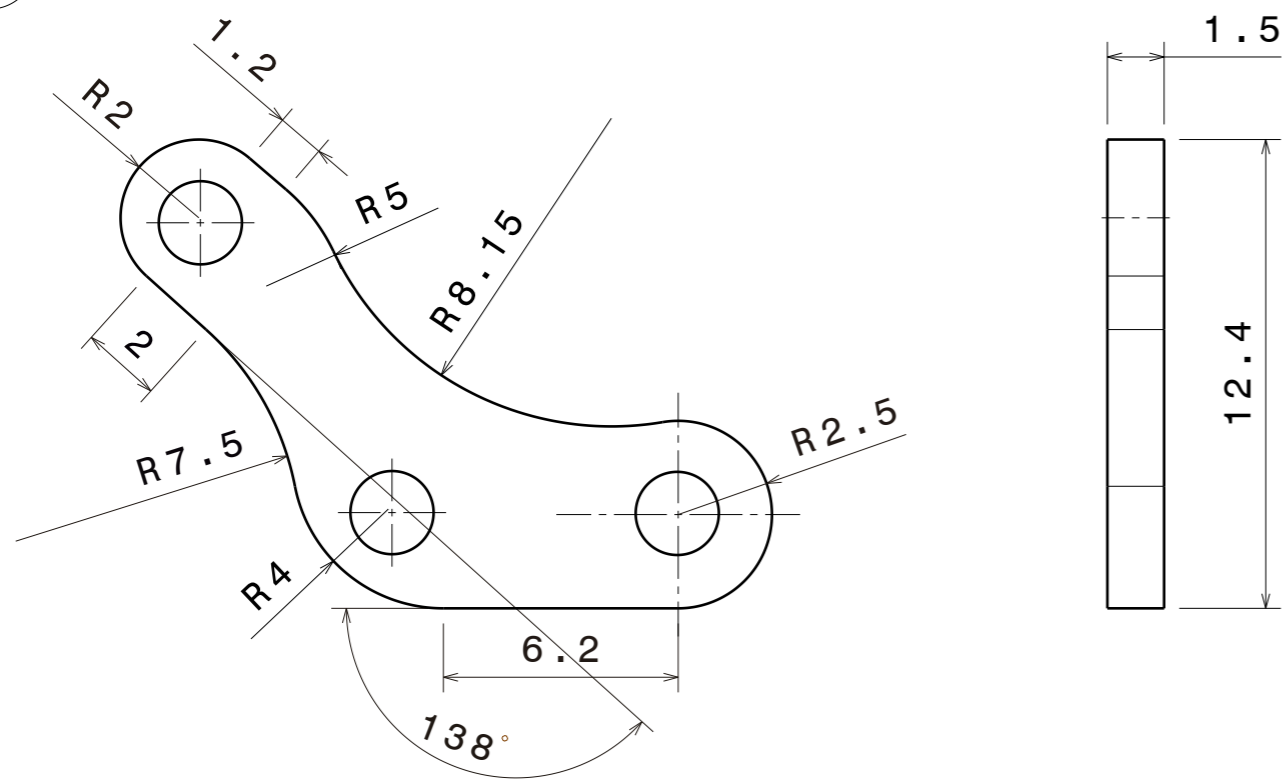
Sección L-L'

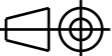

10	Guía Lineal	1	Aluminio 5083
7	Barra 3	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	14/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
 UCA Universidad de Cádiz	Sistema de proyección: 		Formato: A3
	Plano N°:	1.03.02	
			Hoja 13 de 17

12

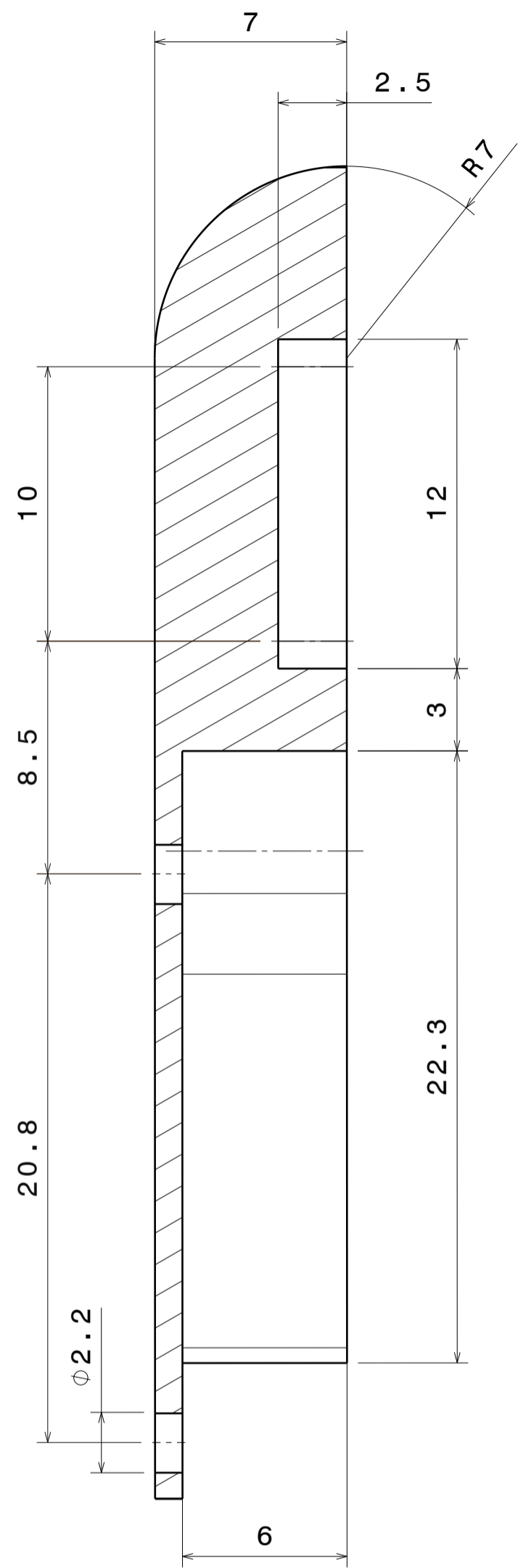
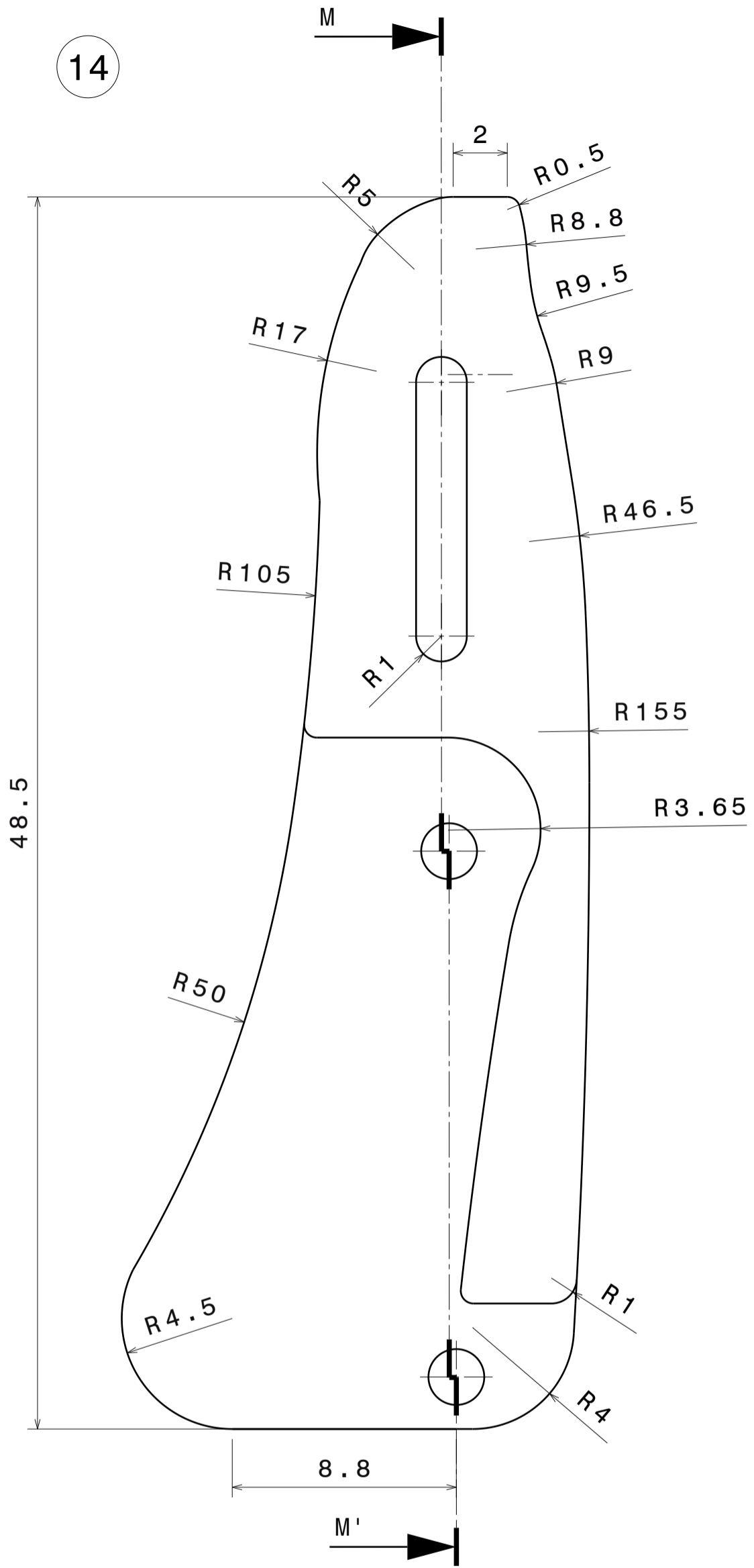


11



12	Barra 1	1	Aluminio 5083
11	Barra 2	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	14/09/21	PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
Sistema de proyección: 			
		Plano N°: 1.03.03	Escala 5:1
		Formato: A3	Hoja 14 de 17

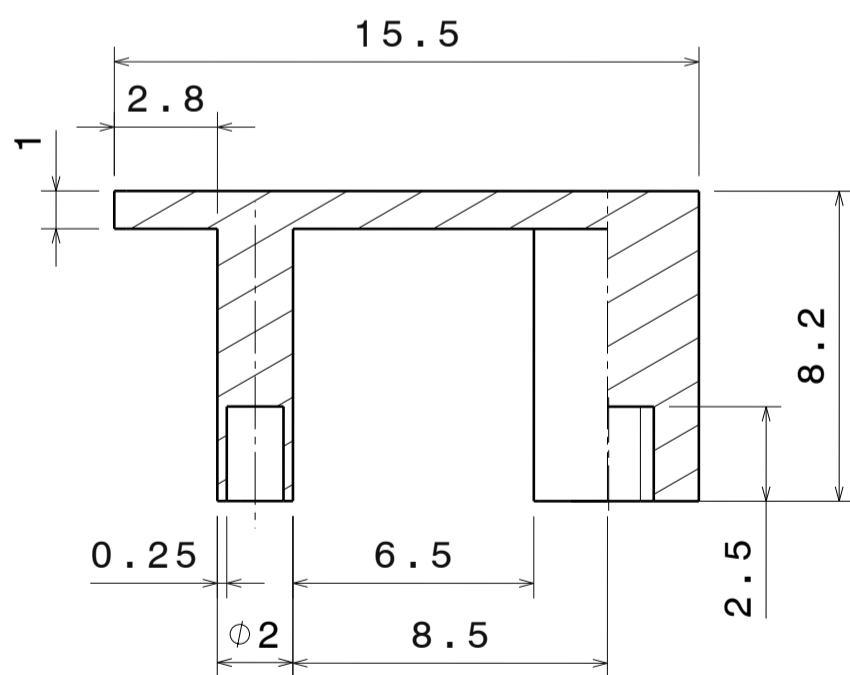
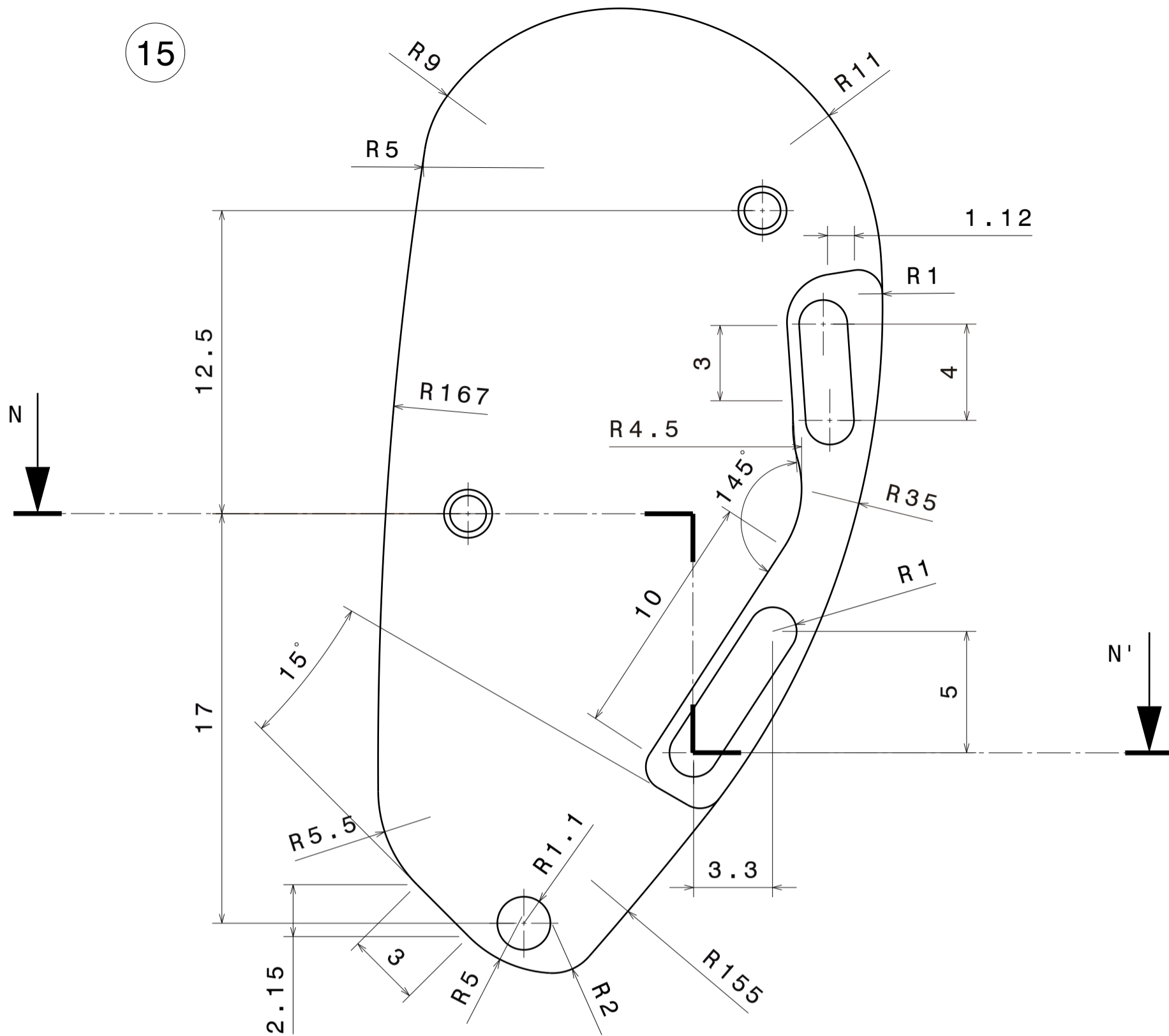
14




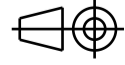
Sección M-M'

14	Falange Distal		1	Aluminio 5083
Marca	Nombre		Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR	
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	14/09/21		
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21		
UCA Universidad de Cádiz	Sistema de proyección:		Formato: A3	Hoja 15 de 17
	Plano N°:	1.03.04	Escala 5:1	

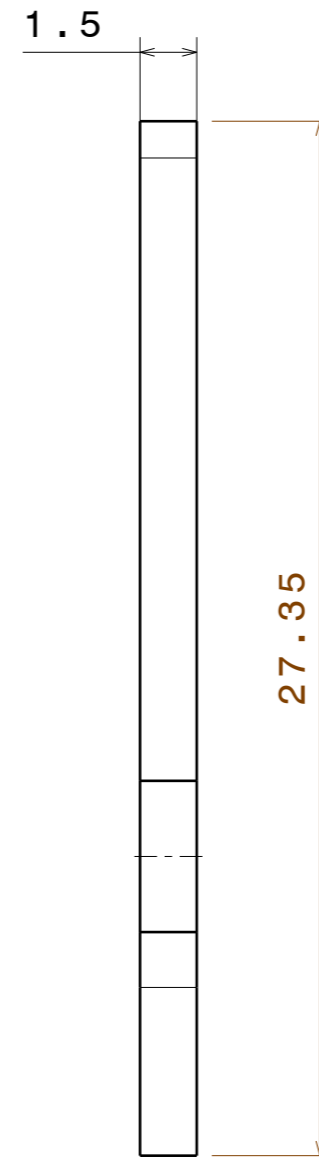
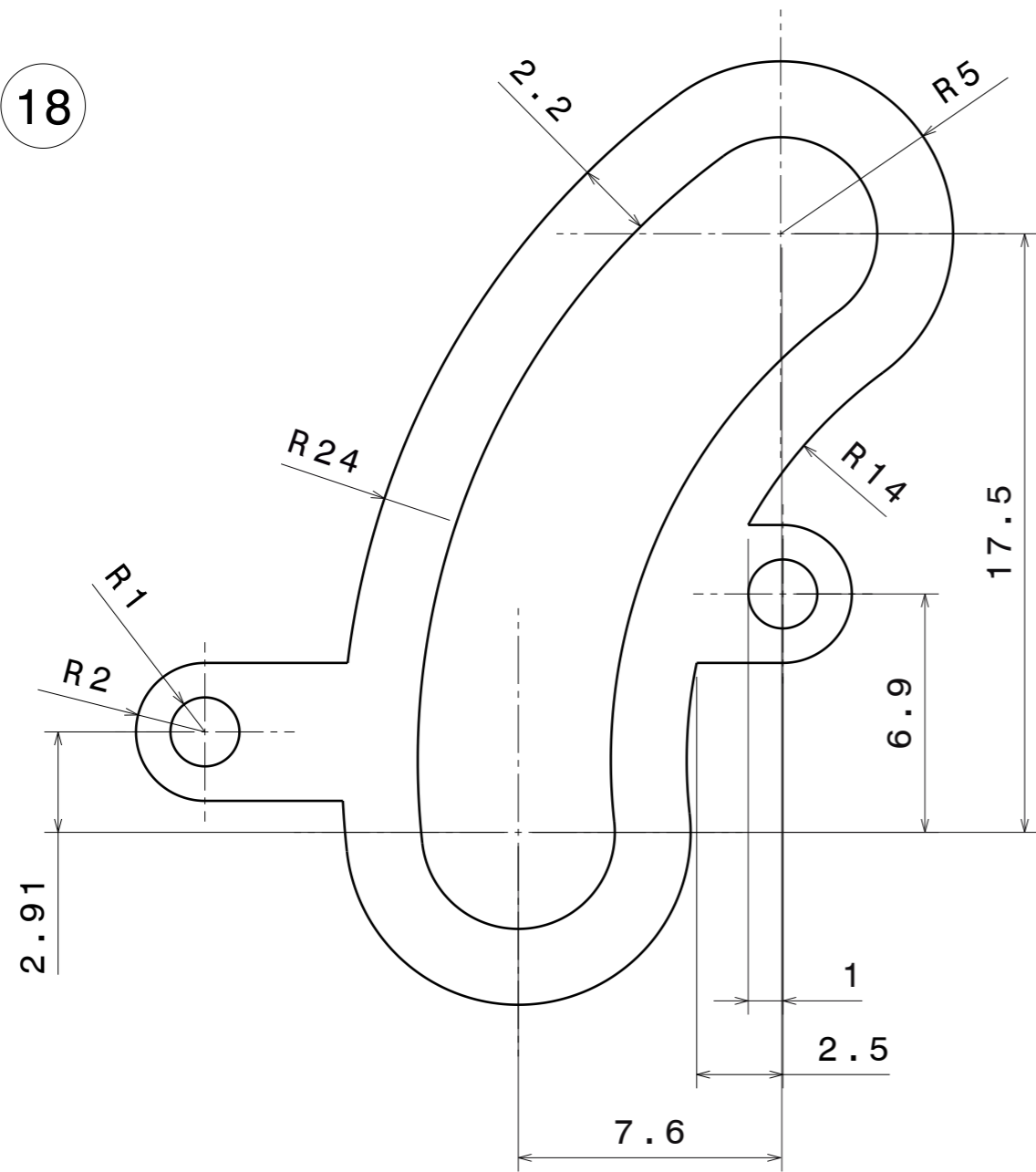
15



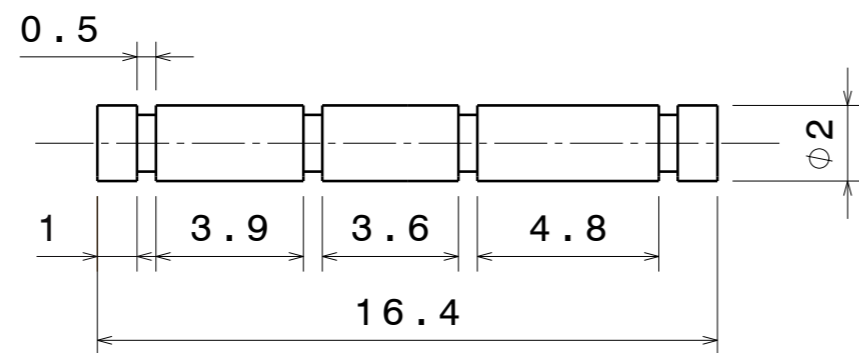
Sección N-N'


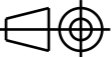
15	Falange Proximal	1	Aluminio 5083
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	14/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
	Sistema de proyección:		Formato: A3      Hoja 16 de 17
	Plano N°:	1.03.05      Escala 5:1	

18



16



18	Guía de Giro	1	Aluminio 5083
16	Eje 3	1	Acero Plata
Marca	Nombre	Cant.	Material/Denominación
	Nombre y apellidos	Fecha	Nombre de plano  PLANO DE ACOTACIÓN- PIEZAS DEL DEDO PULGAR
Diseñado por:	Pablo Medina Coello	14/09/21	
Revisado por:	Pablo Medina Coello	15/09/21	
 <b>UCA</b> Universidad de Cádiz	Sistema de proyección:		Formato: A3
	Plano N°:	1.03.06	
			Hoja 17 de 17