



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Diseño y desarrollo de un dedo pulgar y su  
accionamiento mecánico para una mano biónica,  
mediante tecnologías de impresión 3D**

Autor: D. Alberto Merayo Alvarez

Tutor: D. Alberto Mansilla Gallo

Valladolid, Julio, 2020

## Resumen

Este Trabajo Fin de Máster (de ahora en adelante TFM) es una primera aproximación hacia un producto protésico ante amputaciones del brazo que busca ser completamente funcional y de un precio asequible. Como muchos proyectos innovadores se trata de un trabajo iterativo, en el que cada nueva iteración arroja un nuevo producto viable susceptible de ser útil, pero que aún no ha alcanzado su máximo grado de desarrollo.

En un primer lugar se ha realizado un estudio profundo de los diferentes productos que actualmente se asemejan en mayor o menor medida a nuestro objetivo final. A través del *Estado del arte* nos acercamos a diferentes proyectos innovadores desarrollados desde varias entidades investigadoras.

El primer proyecto en el que nos centramos fue: *Manus Hand*, una mano que busca alcanzar el máximo número de modos de prensión con un número mínimo de actuadores. Luego se han estudiado proyectos con objetivos similares, como *Smarthand*, o *DARPA Hand* que además busca añadir los movimientos de abducción y adducción a cada dedo de la mano. No obstante, para este trabajo hemos seguido en mayor o menor medida, por tratarse del proyecto más afín a nuestros objetivos, es decir máxima funcionalidad a mínimo coste, con el trabajo *6 DOF Open Source Hand* que cómo indica su propio nombre, se trata de un proyecto de código abierto, que además se basa en la sencillez y las altas capacidades del producto.

Después de analizar el *Estado del arte*, parece indispensable, de acuerdo con lo estudiado en los diferentes proyectos anteriores, que se debe tener un conocimiento profundo, en mayor o menor medida, sobre la antropometría del propio dedo pulgar, para así conseguir un producto que se asimile lo máximo posible a las características humanas del mismo. Para ello en el *Capítulo 2. Antropometría del dedo pulgar*, el foco se pone sobre este aspecto y se estudian dos parámetros vitales para el diseño de un dedo. Por un lado, los ángulos máximos de los movimientos del dedo y por otro los tamaños del mismo. Ambos parámetros van a permitir adaptar el diseño a las formas antropométricas teniendo en cuentas las características mecánicas del propio dedo y su interacción con el resto de la mano.

En el siguiente capítulo se trabaja la idea conceptual del dedo. Se habla de aspectos como el tipo de diseño, su estructura, su forma a grandes rasgos y también otros parámetros como los grados de libertad, la velocidad de movimiento y las fuerzas que deberá soportar.

Una vez establecido este diseño conceptual y teniendo claros aspectos como la estructura, es vital hacer un estudio de mercado de diferentes productos que no se fabricarán pero que, si condicionarán por sus tamaños o formas el diseño del dedo. Estos productos que se adquieren a través de fabricantes específicos, serán los motores y las reductoras. Unido a este aspecto va el *Capítulo 5. Diseño mecánico del dedo pulgar*, que se alza sin duda como uno de los puntos vitales de este trabajo. A través de este capítulo se analizan las características tanto cinemáticas como dinámicas que nos permiten alcanzar cada uno de los modelos propuestos previamente. Este estudio exhaustivo arrojará un tipo de motor y reductora óptimo para cada uno de los movimientos que deseamos realizar.

Una vez solventados los aspectos mecánicos del diseño, el foco se sitúa sobre la fabricación de las piezas. Como indica el título de este TFM la fabricación aditiva, comúnmente llamada impresión 3D, será el vehículo perfecto para diseñar nuestros productos. Por ello a través del *Capítulo 6. Tecnologías de impresión 3D y su aplicación en la biomedicina*, se tratan los aspectos más íntimamente relacionados con las propias tecnologías que se usarán para desarrollar las diferentes piezas. Por un lado hablaremos de tecnología FDM y por otro, de SLA, ofreciendo comparativas, parámetros de impresión y el papel que desempeñan en la fabricación de los diferentes elementos que componen el dedo.

Ya una vez en el *Capítulo 7. Diseño y fabricación de los componentes*, se encara la recta final del TFM con el diseño de los propios elementos y su impresión. Un diseño realizado a través de modelos CAD e impresos con las diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Finalmente, en el *Capítulo 8. Diseño final*, se cierra por completo el diseño del primer dedo pulgar de este proyecto ofreciendo la versión final que se ha alcanzado.

Los dos últimos capítulos irán destinados a ofrecer una visión de futuro sobre el desarrollo de este proyecto, dando a conocer aquellos aspectos que hoy por hoy deberían mejorarse y otras características que deberían implementarse con el tiempo.

## Summary

This Master's thesis (from now on TFM) is a first approach towards a prosthetic product for arm amputations that aims to be fully functional and affordable. Like many innovative projects it is an iterative work, where each new iteration yields a new viable product that can be useful, but has not yet reached its maximum level of development.

First of all, an in-depth study has been carried out of the different products that currently resemble our final objective to a greater or lesser extent. Through the State of the Art we approach different innovative projects developed by several research entities.

The first project we focused on was: Manus Hand, a hand that seeks to achieve the maximum number of grip modes with a minimum number of actuators. Then we studied projects with similar objectives, such as Smarthand, or DARPA Hand that also seeks to add the abduction and adduction movements to each finger. However, for this work we have followed, as it is the project most in line with our objectives, i.e. maximum functionality at minimum cost, the work 6 DOF Open Source Hand that as its name indicates, is an open source project, which is also based on the simplicity and high capabilities of the product.

After analysing the state of the art, it seems indispensable, in accordance with what has been studied in the different previous projects, to have a deep knowledge, to a greater or lesser extent, of the anthropometry of one's thumb, in order to achieve a product that is as assimilated as possible to its human characteristics. To this end, in Chapter 2. Anthropometry of the thumb, the focus is placed on this aspect and two vital parameters for the design of a finger are studied. On the one hand, the maximum angles of the movements of the finger and on the other hand the sizes of the finger. Both parameters will allow to adapt the design to the anthropometric forms taking into

account the mechanical characteristics of the finger itself and its interaction with the rest of the hand.

In the following chapter the conceptual idea of the finger is worked on. We talk about aspects such as the type of design, its structure, its shape in general and also other parameters such as the degrees of freedom, the speed of movement and the forces that it must support.

Once this conceptual design has been established and having clear aspects such as the structure, it is vital to carry out a market study of different products that will not be manufactured but that will condition the design of the finger due to their size or shape. These products, which are acquired through specific manufacturers, will be the motors and gearboxes. Linked to this aspect is Chapter 5. Mechanical design of the thumb, which undoubtedly stands as one of the vital points of this work. This chapter analyzes the kinematic and dynamic characteristics that allow us to achieve each of the models previously proposed. This exhaustive study will yield an optimal type of motor and gearbox for each of the movements we wish to perform.

Once the mechanical aspects of the design have been solved, the focus is on the manufacture of the parts. As the title of this TFM indicates, additive manufacturing, commonly called 3D printing, will be the perfect vehicle for designing our products. Therefore, Chapter 6, 3D printing technologies and their application in biomedicine, deals with the aspects most closely related to the technologies that will be used to develop the different parts. On the one hand, we will talk about FDM technology and on the other hand, about SLA, offering comparisons, printing parameters and the role they play in the manufacture of the different elements that make up the finger.

Once in Chapter 7. Design and manufacture of the components, the final stage of the TFM is faced with the design of the elements themselves and their printing. A design made through CAD models and printed with the different additive manufacturing technologies. Finally, in Chapter 8. Final design, the design of the first thumb of this project is completely closed offering the final version that has been reached.

The last two chapters will offer a vision of the future development of this project, presenting those aspects that today should be improved and other characteristics that should be implemented over time.

## *Palabras clave*

*Prótesis de mano, diseño del dedo pulgar, fabricación aditiva, FDM, SLA.*

## *Keywords*

*Hand prosthesis, thumb design, additive manufacturing, FDM, SLA.*

# *Agradecimientos*

*A mi tutor y al laboratorio "4inn" por el acompañamiento en este proceso.*

*A mis padres, mi hermana y mis amigos por el apoyo y los ánimos que nunca han faltado en este camino.*

# Indice

Resumen.....	II
Summary .....	III
Palabras clave.....	V
Keywords.....	V
Agradecimientos .....	VI
Indice de imágenes.....	IX
Indice de tablas .....	XI
Introducción y objetivos.....	XIII
Capítulo 1. Estado del arte. ....	1
1.1. Estado del arte.....	1
1.1.1. Manus Hand (5) (6).....	1
1.1.2. The Smarthand (4).....	2
1.1.3. The UNB Hand (7).....	4
1.1.4. The DLR/HIT hand II (8) .....	5
1.1.5. DARPA Hand (9).....	6
1.1.6. The Yale Hand (10) .....	7
1.1.7. 6 DOF Open Source hand (1):.....	7
Capítulo 2. Antropometría del dedo pulgar. ....	10
2.1. Antropometría del dedo pulgar.....	10
2.1.1. Ángulos máximos de las articulaciones del dedo pulgar. ....	11
2.1.2. Tamaños del dedo pulgar. ....	12
Capítulo 3. Definición conceptual del diseño del pulgar. ....	14
3.1. Selección y definición del tipo de diseño. ....	14
3.1.1. Parámetros básicos de diseño .....	14
3.1.2. Estructura conceptual del diseño .....	15
Capítulo 4. Estudio de mercado. ....	16
4.1. Análisis de mercado: Motores y reductoras.....	16
4.1.1. Motores y reductoras Maxon .....	16
4.1.2. Motores y reductoras Faulhaber .....	17
Capítulo 5. Diseño mecánico del dedo pulgar. ....	19
5.1. Análisis mecánico .....	19
5.1.1. Análisis cinemático del movimiento flexión-extensión .....	19
5.1.2. Análisis dinámico del movimiento flexión-extensión .....	25

5.1.3. Selección del motor y reductora (flexión-extensión) .....	31
5.1.4. Análisis cinemático del movimiento abducción-adducción .....	31
5.1.5. Análisis dinámico del movimiento abducción-adducción .....	38
5.1.6. Selección del motor y reductora (abducción-adducción).....	38
5.2. Simulación mecánica mediante working model.....	39
5.2.1. Diseño del sistema en working model.....	39
5.2.2. Parámetros.....	40
5.2.3. Datos de simulación .....	41
5.2.4. Análisis de resultados .....	42
5.2.5. Solución adoptada .....	47
Capítulo 6. Tecnologías de impresión 3D y su aplicación en la biomedicina.....	49
6.1. Tecnologías de impresión 3D .....	49
6.1.1. Tecnología FDM .....	49
6.1.2. Tecnología SLA .....	49
6.1.3. Comparativa FDM vs SLA .....	49
6.2. Parámetros de impresión .....	52
6.2.1. Parámetros de impresión FDM.....	52
6.2.2. Parámetros de impresión SLA.....	54
6.3. Uso de las tecnologías 3D en la impresión de los componentes del dedo .....	54
Capítulo 7. Diseño y fabricación de los componentes. ....	56
7.1. Dedo: diseño y fabricación .....	56
7.2. Soporte: diseño y fabricación .....	58
7.3. Pasadores: diseño y fabricación .....	61
7.4. Engranajes: diseño y fabricación .....	63
Capítulo 8. Diseño final. ....	65
8.1. Ensamblaje motor-dedo .....	65
8.2. Ensamblaje dedo-soporte.....	65
8.3. Ensamblaje soporte-mano.....	66
8.4. Ensamblaje engranajes flexión-extensión .....	67
8.5. Ensamblaje engranajes abucción-adducción .....	68
Capítulo 9. Líneas futuras.....	70
Capítulo 10. Conclusiones. ....	72
Bibliografía .....	73
Anexo. Planos .....	



## Índice de imágenes

Imagen 1. Tipos de agarre. ....	1
Imagen 2. Esquema global de la estructura cinemática de MANUS-Hand .....	2
Imagen 3. Movimiento cíclico del mecanismo de ginebra. ....	2
Imagen 4. Arquitectura de SmartHand. ....	3
Imagen 5. Arquitectura SmartHand. ....	4
Imagen 6. A. Dedo con la localización del tendón. B. Dispositivo Capstan. ....	4
Imagen 7. Mecanismo del pulgar. ....	5
Imagen 8. Mecanismos de flexión-extensión (eje verde) y de abducción-aducción (eje rojo). ....	6
Imagen 9. Dedo pulgar DARPA Hand. ....	6
Imagen 10. Sistema de funcionamiento de la Yale Hand. ....	7
Imagen 11. Vista lateral del esquema de funcionamiento del dedo. ....	8
Imagen 12. Esquema de actuación del dedo. ....	8
Imagen 13. Esquema funcionamiento dedo pulgar. ....	9
Imagen 14. Articulación trapezometacarpiana. ....	10
Imagen 15. Articulación metacarpofalángica. ....	11
Imagen 16. Posiciones angulares neutrales del dedo pulg .....	11
Imagen 17. Esqueleto de la mano (vista palmar). ....	12
Imagen 18. Esquema del sistema motor-transmisión. (Elaboración propia) .....	19
Imagen 19. Extracto de las características del motor Maxon 463219. ....	20
Imagen 20. Distancia R (punto de giro-punto de contacto).....	25
Imagen 21. Esquema del sistema motor-transmisión. (Elaboración propia). ....	31
Imagen 22. Extracto de las características del motor Maxon 463219. ....	32
Imagen 23. Análisis cinemático Motor Maxon 118397. ....	34
Imagen 24. Análisis cinemático Motor Maxon 118485. ....	35
Imagen 25. Análisis cinemático Motor Maxon 118683. ....	35
Imagen 26. Análisis cinemático Motor Maxon 14XXX. ....	36
Imagen 27. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1219N4.5G . ....	36
Imagen 28. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1624T006S.....	37
Imagen 29. Análisis cinemático Motor Faulhaber 2230T015S.....	37
Imagen 30. Estructura del dedo. (Elaboración propia) .....	39
Imagen 31. Modelo dedo flexión-extensión en Working Model .....	40
Imagen 32. Modelo dedo abducción-adducción en Working Model .....	40
Imagen 33. Análisis dinámico del motor Maxon 118683 y reductora 4,4:1. ....	42
Imagen 34. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Maxon 118683 y reductora 4,4:1. ....	42
Imagen 35. Análisis dinámico del motor Faulhaber 1219N4.5G y reductora 16:1. ....	42
Imagen 36. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Faulhaber 1219N4.5G y reductora 16:1. ....	42
Imagen 37. Análisis del motor Maxon 118683 con reductora 4,4:1 .....	47
Imagen 38. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 118683 con reductora 4,4:1 .....	47
Imagen 39. Análisis del motor Faulhaber 1219N4.5G con reductora 16:1 .....	47
Imagen 40. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 1219N4.5G con reductora 16:1.....	47
Imagen 41. Comparativa impresión FDM vs SLA. ....	50
Imagen 42. Gráfica de curado de la resina tipo Clear. ....	51

Imagen 43. Parámetros de impresión FDM. ....	53
Imagen 44. Interfaz de parametrización del software Cura. ....	53
Imagen 45. Versión 1.0. Diseño del dedo. ....	57
Imagen 46. Versión 1.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA) .....	57
Imagen 47. Versión 2.0. Diseño del dedo. ....	57
Imagen 48. Versión 2.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA) .....	57
Imagen 49. Versión 3.0. Diseño del dedo. ....	58
Imagen 50. Versión 3.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA) .....	58
Imagen 51. Versión 1.0. Diseño del soporte y ensamblaje soporte 1.0 - dedo 2.0 . ....	59
Imagen 52. Versión 1.0. Diseño del soporte. Impresión FDM (PLA) .....	59
Imagen 53. Versión 2.0. Diseño del soporte. ....	60
Imagen 54. Versión 3.0. Diseño del soporte y ensamblaje soporte 3.0 - dedo 3.0 . ....	60
Imagen 55. Versión 3.0. Diseño del soporte. Impresión FDM (PLA) .....	61
Imagen 56. Versión 3.0. Diseño del soporte. Impresión SLA (Clear) .....	61
Imagen 57. Ajuste del embellecedor y pasador para soporte 2.0 . ....	62
Imagen 58. Pasador con chavetero. ....	62
Imagen 59. Diseño del pasador con chavetero. Impresión SLA (Clear) .....	62
Imagen 60. Pasador cilíndrico. ....	63
Imagen 61. Engranajes cónicos 1:3 . ....	63
Imagen 62. Engranaje cónico fijo. Impresión SLA (Clear) .....	64
Imagen 63. Conjunto corona-sinfin. ....	64
Imagen 64. Corona. Impresión SLA (Clear) .....	64
Imagen 65. Ensamblaje dedo-pasadores. ....	65
Imagen 66. Ensamblaje dedo-soporte. ....	65
Imagen 67. Ensamblaje pasador con chavetero-soporte 3.0. ....	66
Imagen 68. Ensamblaje dedo-soporte. ....	66
Imagen 69. Ensamblaje soporte-mano. ....	67
Imagen 70. Ensamblaje engranajes flexión-extensión. ....	68
Imagen 71. Ensamblaje engranaje fijo. ....	68
Imagen 72. Ensamblaje engranajes abducción-adducción. ....	69
Imagen 73. Ensamblaje corona-soporte. ....	69

## Índice de tablas

Tabla 1 Valores de los ángulos del dedo pulgar (goniómetro manual). .....	11
Tabla 2 Valores de los ángulos del dedo pulgar (goniómetro electrónico). .....	12
Tabla 3. Longitud promedio de las falanges del dedo pulgar. ....	12
Tabla 4. Longitudes promedio de las falanges del dedo pulgar. ....	13
Tabla 5. Fuerzas de agarre en cada dedo. ....	14
Tabla 6. Características Motor Maxon 463219. ....	16
Tabla 7. Características Motor Maxon 118397. ....	17
Tabla 8. Características Motor Maxon 118485. ....	17
Tabla 9. Características Motor Maxon 118683. ....	17
Tabla 10. Características Motor Faulhaber 12194.5G. ....	18
Tabla 11. Características Motor Faulhaber 1624T006S. ....	18
Tabla 12. Características Motor Faulhaber 2230T015S. ....	18
Tabla 13. Características Motor Faulhaber 1188683. ....	18
Tabla 14. Análisis cinemático Motor Maxon 463219. ....	21
Tabla 15. Análisis cinemático Motor Maxon 118397. ....	21
Tabla 16. Análisis cinemático Motor Maxon 118485. ....	22
Tabla 17. Análisis cinemático Motor Maxon 118683. ....	22
Tabla 18. Análisis cinemático Motor Maxon 14XXX. ....	23
Tabla 19. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1219N4.5G. ....	23
Tabla 20. Análisis cinemático Motor Faulhaber 124T006S. ....	24
Tabla 21. Análisis cinemático Motor Faulhaber 2230T015S. ....	24
Tabla 22. Análisis dinámico Motor Maxon 463219. ....	27
Tabla 23. Análisis dinámico Motor Maxon 118397. ....	27
Tabla 24. Análisis dinámico Motor Maxon 118485. ....	28
Tabla 25. Análisis dinámico Motor Maxon 118683. ....	28
Tabla 26. Análisis dinámico Motor Maxon 14XX. ....	29
Tabla 27. Análisis dinámico Motor Faulhaber 1219N4.5G. ....	29
Tabla 28. Análisis dinámico Motor Faulhaber 1624T006S. ....	30
Tabla 29. Análisis dinámico Motor Faulhaber 2230T015S. ....	30
Tabla 30. Análisis cinemático Motor Maxon 463219. ....	34
Tabla 31. Análisis dinámico del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1. ....	41
Tabla 32. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1. ....	41
Tabla 33. Análisis cinemático (4 rad/s) del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1. ....	41
Tabla 34. Análisis dinámico del motor Faulhaber 2230T015S y reductora 102:1. ....	42
Tabla 35. Análisis cinemático (3 rad/s) del motor Faulhaber 2230T015S y reductora 102:1. ....	42
Tabla 36. Análisis del motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1. ....	43
Tabla 37. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1. ....	43
Tabla 38. Análisis del motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 3:1. ....	44
Tabla 39. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 3:1. ....	44
Tabla 40. Análisis del motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1. ....	45
Tabla 41. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1. ....	45

Tabla 42. Análisis del motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 3:1.....	46
Tabla 43. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 3:1. ....	46

## *Introducción y objetivos*

Este Trabajo Fin de Máster nace con la idea de mejorar la vida de la gente y permitir que la tecnología implementada en el desarrollo de brazos biónicos, sea accesible a más personas que actualmente no pueden disponer de estos productos por sus elevados precios.

Se debe mencionar que este TFM se incluye en un proyecto de mayor envergadura, enfocado en el desarrollo de un brazo biónico completamente funcional. En dicho proyecto, trabajan más compañeros del laboratorio "4inn" de la Universidad de Valladolid, desarrollando el resto de dedos de la mano, la articulación del codo y los sistemas de sensores que permiten la conectividad del usuario con el brazo y la interacción del mismo con el entorno.

En concreto este TFM se centrará, como su título indica, en desarrollar un dedo pulgar que tendrá varias características especiales que a su vez serán los objetivos de este proyecto:

- El primero de ellos, será disponer de dos tipos de movimientos: flexión-extensión y abducción-adducción. Actualmente hay productos, tanto en investigación, como en el mercado, que implementan estas características. Sin embargo, no son muchas las opciones que además suponen precios muy elevados.
- El segundo objetivo será desarrollar los diferentes elementos mediante tecnologías de fabricación aditiva, para con ello, conseguir dos hitos:
  - Personalizar al máximo el producto adaptándolo a las necesidades del usuario. La tecnologías de impresión 3D permiten, de forma muy ágil, adaptar con pequeños cambios en los diseños CAD, un producto base a otro que se adapte a las características únicas del usuario final.
  - Reducir los costes para permitir hacer la tecnología más accesible. Actualmente la mayoría de productos biónicos, se fabrica con materiales de muy elevada calidad, como fibras de vidrio o carbono, no obstante los plásticos enfocados en la fabricación aditiva tienen comportamientos de muy alta calidad a precios menores que este otro tipo de productos. Esto permitirá obtener un producto funcional con una notable reducción del coste y con un buen nivel de calidad.
- El tercer objetivo de este TFM, será conseguir un diseño sencillo y fácilmente replicable en cualquier lugar, disponiendo únicamente de los modelos de las piezas y una impresora 3D.

# Capítulo 1. Estado del arte.

## 1.1. Estado del arte.

Actualmente, hay diferentes modelos en los que se implementan los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción en el dedo pulgar. La mayoría de estos modelos no son comerciales, sin embargo, existen algunos productos en el mercado que incluyen esta funcionalidad.

Entre los casos comerciales tendríamos la mano "Vincent Evolution 3"(1)(2) de la compañía Vincent GMBH, la mano "Michelangelo" (3) de la compañía OttoBock y el modelo de la compañía Ossür, conocido como "iLimb Ultra" (4)(1) que también permite estos movimientos.

A través de este capítulo, se reúne la información actual más relevante para nuestro desarrollo, mediante el análisis de las principales manos protésicas que incorporan movimiento del dedo pulgar en dos ejes (flexión-extensión y abducción-adducción).

### 1.1.1. Manus Hand (5) (6)

Conceptualmente busca cumplir con las siguientes características:

- Cubrir el mayor espectro de modos de prensión, es decir los que requieren oposición del pulgar (agarres de potencia y precisión) como los que no la necesitan (agarres de lateral y gancho).

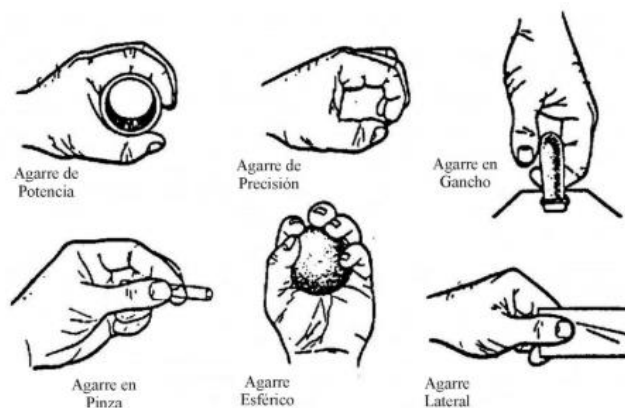


Imagen 1. Tipos de agarre. (6)

- Buscar una solución que requiera un bajo número de actuadores para alcanzar mayor compactación y reducción del peso.
- Conseguir que la interacción usuario-prótesis se implemente a partir de canales naturales que faciliten el aprendizaje y uso del sistema por parte del usuario.
- Lograr que el sistema sea capaz de controlar de forma autónoma posibles perturbaciones durante el agarre.

El proyecto MANUS Hand ha desarrollado una mano con diez articulaciones en la que se distinguen tres mecanismos independientes: dedos, muñeca y pulgar, de los cuales nosotros nos centraremos en el último de ellos.

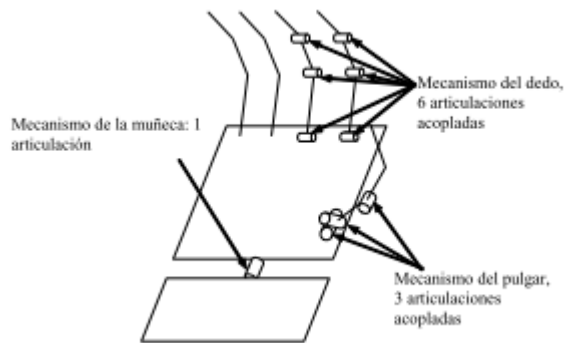


Imagen 2. Esquema global de la estructura cinemática de MANUS-Hand(6)

Para solucionar el movimiento en dos planos del pulgar, el proyecto MANUS Hand ofrece una propuesta basada en el mecanismo de Ginebra. Este mecanismo permite generar un desplazamiento en dos planos de forma cíclica. Si se parte del pulgar en posición de agarre lateral se obtiene, mediante giro del motor estos cuatro movimientos:

- Movimiento combinado de extensión y oposición desde la zona de agarre lateral a la zona de agarre en gancho.
- Movimiento de extensión hasta la zona neutral (posición de reposo).
- Movimiento combinado de oposición y de flexión hasta la zona de agarre de potencia.
- Movimiento de flexión hasta completar agarre de precisión.

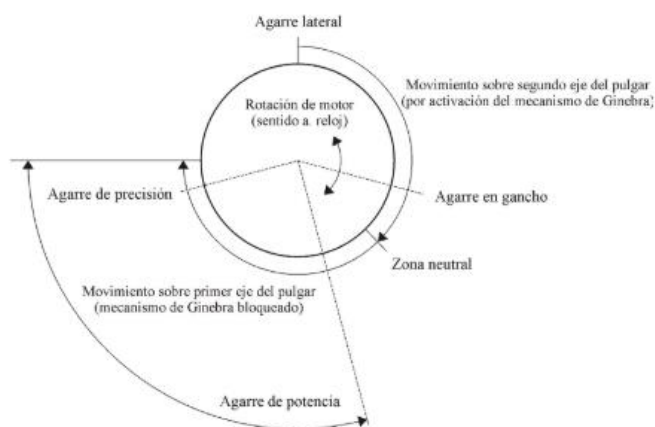


Imagen 3. Movimiento cíclico del mecanismo de ginebra. (6)

### 1.1.2. The Smarthand (4)

El objetivo a nivel conceptual, se basa en alcanzar cinco puntos basados en las necesidades de las personas amputadas:

- Permitir los agarres de potencia (35 % ADLs).
- Conseguir agarres de precisión (30 % ADLs).
- Lograr los agarres laterales (20 % ADLs).
- Conseguir el movimiento de apuntar con el índice, por su utilidad en actividades cotidianas como pulsar un botón.
- Alcanzar la capacidad de realizar gestos básicos como contar con los dedos.

Como añadido, esta investigación propone una serie de características que nombra como “*bio-inspired*” y que se traducen en los siguientes cuatro puntos:

- Antropomorfismo: asemejarse en tamaño y peso, número y distribución de las articulaciones, así como la acción de los diferentes grados de libertad (DoFs).
- Biomimetismo estático y dinámico.
- Sensorización.
- Funcionamiento: se centra en la velocidad (cierre completo de la mano en menos de dos segundos) y en las fuerzas de agarre (capacidad para el manejo de objetos cotidianos).

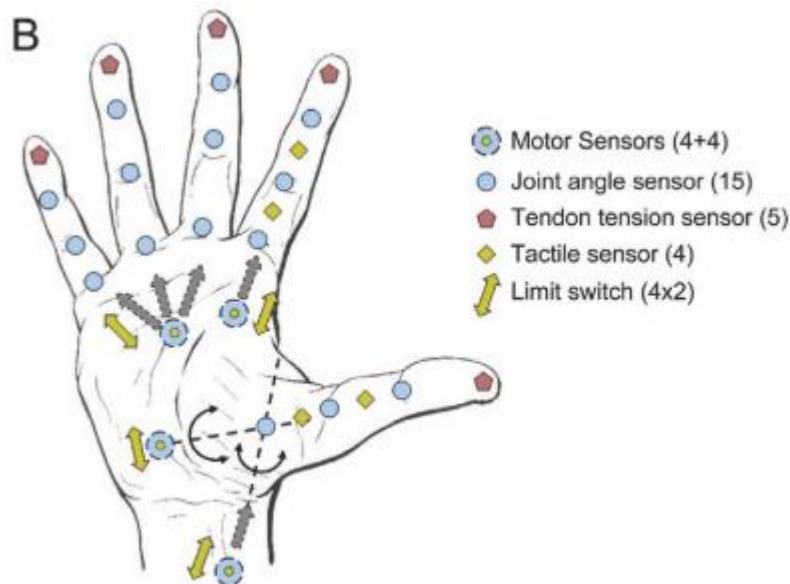


Imagen 4. Arquitectura de SmartHand. (4)

El funcionamiento del dedo pulgar en esta mano, se basa en la acción de dos motores, uno que permitirá la flexión-extensión (*M1 en Imagen 5*) y uno que permitirá la abducción-aducción (*M4 en Imagen 5*).



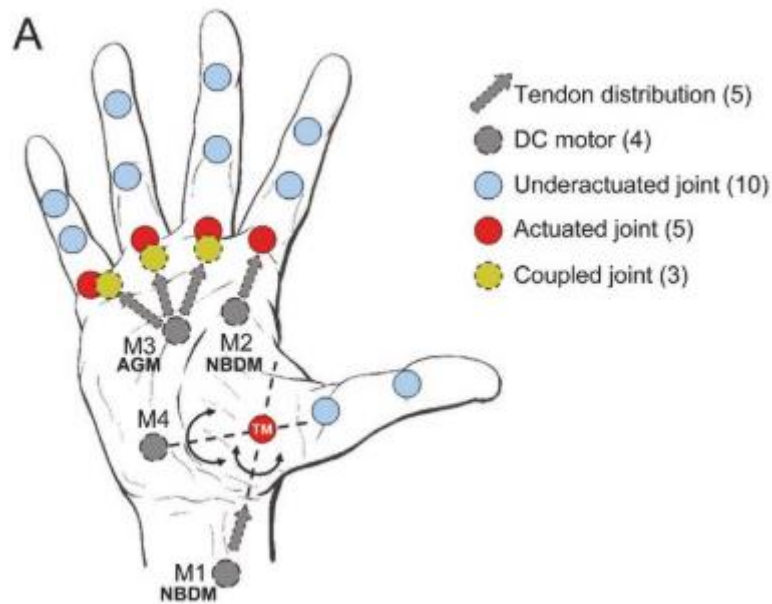


Imagen 5. Arquitectura SmartHand.(4)

El funcionamiento del mecanismo flexión-extensión de los dedos, en esta mano, se basa en un motor que mueve un dispositivo tipo “capstan” (Imagen 6B) que enrolla los cables que se sitúan en el interior de los dedos (Imagen 6A) provocando así su flexión.

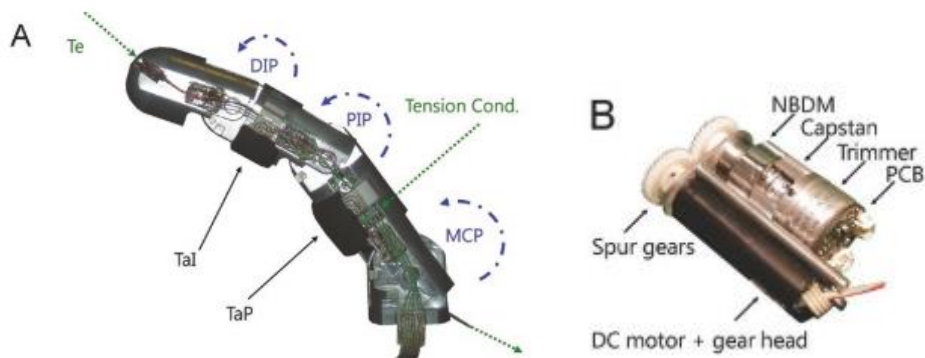


Imagen 6. A. Dedo con la localización del tendón. B. Dispositivo Capstan.(4)

### 1.1.3. The UNB Hand (7)

Como en los casos anteriores, se parte de una serie de consideraciones previas, que en este caso se componen de cuatro apartados:

- Coste total: el proyecto fija que el desarrollo de una nueva prótesis debe estar comprometido por un lado con las mejoras funcionales pero también con el precio, para que este no sea una barrera en la adquisición de las mismas.
- Grados de libertad (GDL): existe una consideración de un mínimo de dos GDL para conseguir una mano funcional, sin embargo se plantea que el aumento de GDL conlleva un aumento de peso y coste, por lo tanto se tratará de solucionar el problema con una motivación por tratar de limitar el número de GDL.

- Controlabilidad: buscan incorporar tantos movimientos como crean los amputados que pueden llegar a controlar de forma realista. Bajo este argumento también se apoya la idea anterior de limitar el número de GDL.
- Diseño modular y flexible: basándose en que cada usuario tiene unas necesidades diferentes, se buscan diseños flexibles tanto a nivel de componentes como de controlabilidad.

El mecanismo de acción del pulgar se basa en una unión del movimiento de flexión y rotación a través de un sistema de leva. Según el mecanismo, el motor provocaría el giro de abducción-aducción y movería la leva provocando la flexión-extensión del dedo.



*Imagen 7. Mecanismo del pulgar.(7)*

#### **1.1.4. The DLR/HIT hand II (8)**

El proyecto establece unos objetivos para el desarrollo de la mano:

- Menos peso y volumen.
- Aumentar la similitud con la mano humana: relacionado con la reducción de tamaño de los dedos y la posición óptima del pulgar.
- Interfaces de comunicaciones más flexibles.
- Mejorar la capacidad de manipulación: se aumentan el número de grados de libertad para conseguir realizar tareas más complejas.
- Rigidez más flexible en la articulación: en lugar de una transmisión basada en engranajes, usarán correas dentadas y alambres de acero generando mayor flexibilidad y seguridad.
- Alta integración entre la palma y los dedos.
- Cables mínimos entre el dedo y la base: se integra un controlador DSP que permite reducir el número de cables.
- Detección inercial: se incorpora un acelerómetro de dos ejes en la palma de la mano para medir la orientación de la mano.

En este proyecto el dedo pulgar se fija en una posición de uso común y no tiene el movimiento extra. Sin embargo, como en el resto de caso, aparece la flexión-extensión que se realiza mediante un motor que transmite el movimiento a través de una correa dentada a la falange proximal y mediante un cable de acero se mueven la intermedia y distal.

### 1.1.5. DARPA Hand (9)

En la fase 2 de este proyecto se incluye el diseño del pulgar con dos movimientos. Para ello se fijan los siguientes objetivos:

- Todos los motores de la mano residirán en la palma y los dedos: en este proyecto se analizaron configuraciones con 15 motores, reduciendo hasta los 9 o 10 para darle una aplicación clínica y una disponibilidad a corto plazo.

En este diseño todos los dedos disponen de los movimientos de flexión-extensión (eje verde) y de abducción-aducción (eje rojo), para ello exclusivamente se usa un único motor que gestiona ambos movimientos, usando un sistema planetario de tres etapas para la abducción-aducción (eje rojo) y los sistemas cicloidales para los movimientos de flexión-extensión (eje verde).

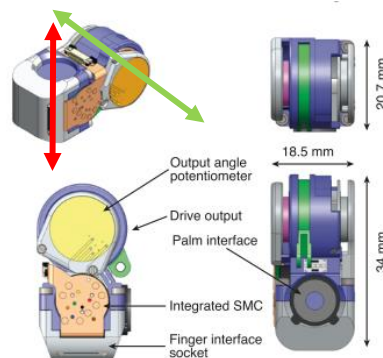


Imagen 8. Mecanismos de flexión-extensión (eje verde) y de abducción-aducción (eje rojo). (9)

Para el mecanismo del dedo pulgar se establecen cuatro grados de libertad que se corresponden con los círculos rojos de la Imagen 9.

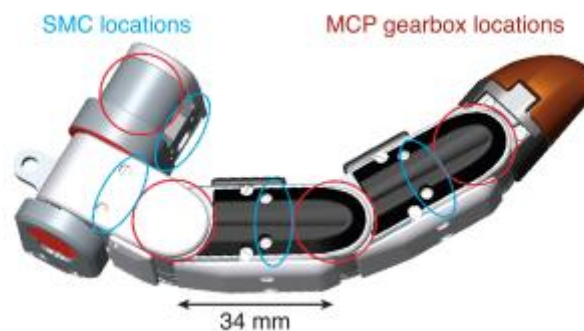


Imagen 9. Dedo pulgar DARPA Hand.(9)

### 1.1.6. The Yale Hand (10)

Este proyecto dispone un diseño conceptual específico para el dedo pulgar que atiende a la siguiente característica:

- Movimiento del motor en sentido horario para actuar sobre una salida y movimiento antihorario para la otra salida. De este modo un único motor puede controlar dos salidas.

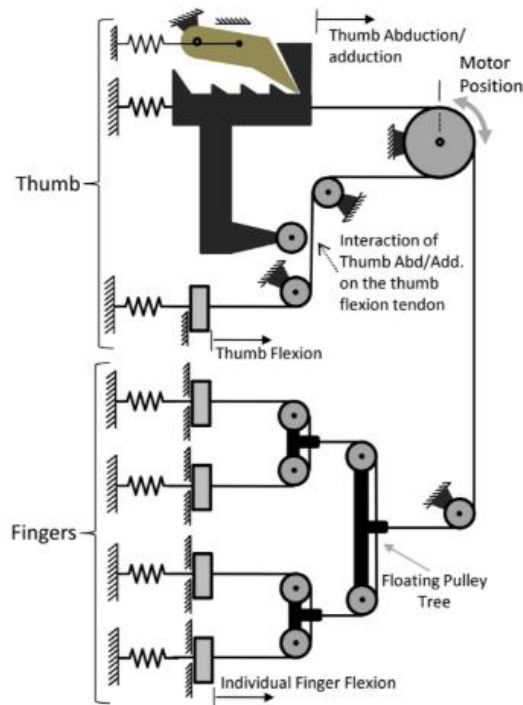


Imagen 10. Sistema de funcionamiento de la Yale Hand. (10)

En el esquema podemos ver el funcionamiento, como el motor al girar en sentido antihorario genera la tensión en los cables para provocar la flexión de los dedos y al girar en el sentido horario la abducción-aducción del pulgar.

### 1.1.7. 6 DOF Open Source hand (1):

Los parámetros de diseño en este proyecto son:

- Diseño para realizar cualquier tipo de agarre.
- Control independiente de cada dedo, con un motor para cada uno de los dedos y dos motores en el pulgar (uno controla la flexión-extensión y otro la abducción-aducción).
- Costes reducidos para poder hacer más accesible el uso de la prótesis.

En esta mano cada dedo se ha diseñado de forma idéntica. Un motor mueve mediante engranajes cónicos la falange proximal y mientras esta genera el movimiento de flexión

otra corona dentada provoca el movimiento acompasado de las falanges intermedia y distal como vemos a continuación.

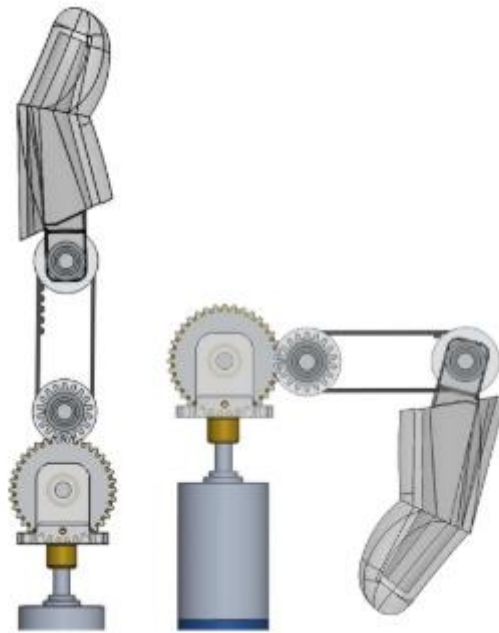


Imagen 11. Vista lateral del esquema de funcionamiento del dedo.(1)

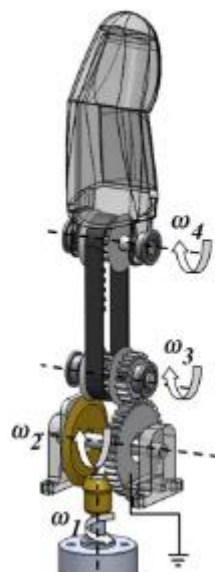


Imagen 12. Esquema de actuación del dedo.(1)

En esta segunda imagen (Imagen 12) podemos observar como el movimiento del motor que gira con  $\omega_1$  acciona mediante un engranaje cónico el eje que rige el movimiento de la falange proximal que se moverá con  $\omega_2$ . Desde el eje proximal se transmite el movimiento hacia la falange intermedia y distal que se mueven a través de una correa dentada.

Respecto al dedo pulgar, en el que se centra nuestro proyecto podemos ver la solución adoptada en la siguiente imagen.

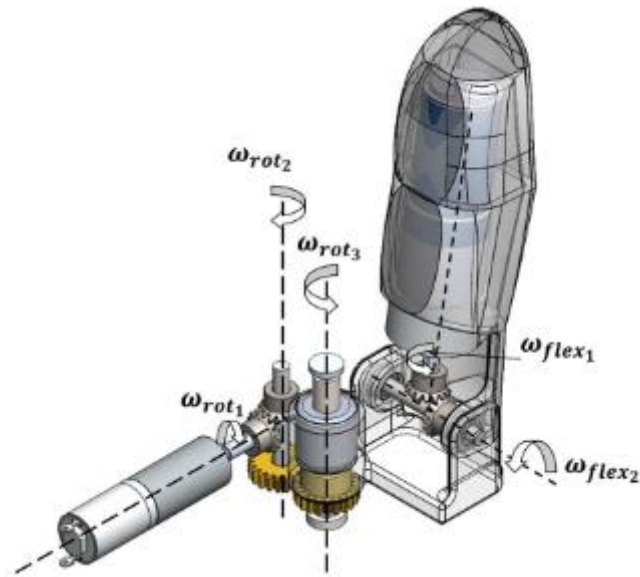


Imagen 13. Esquema funcionamiento dedo pulgar.(1)

Para el movimiento del pulgar tenemos dos motores. Uno de ellos alojados en la carcasa del dedo que permite el movimiento de flexión-extensión que corresponde con  $\omega_{flex1}$ . El motor que permite el movimiento de abducción-aducción se alojaría en la palma y correspondería con  $\omega_{rot1}$ .

## Capítulo 2. Antropometría del dedo pulgar.

### 2.1. Antropometría del dedo pulgar

La existencia del dedo pulgar es prácticamente indispensable para una óptima funcionalidad de la mano, ya que el pulgar permite realizar los movimientos de pinza por su característica de ser oponible. Se compone de cinco piezas óseas:

- Escafoides
- Trapecio
- Metacarpiano
- Falange proximal
- Falange distal

El dedo pulgar presenta cuatro articulaciones, sin embargo en nuestro caso particular solo se contemplan dos de ellas que permitirán los movimientos objetivo de este TFM:

- **Articulación trapezometacarpiana:** permite los movimientos de abducción y aducción. En el siguiente punto se evalúan los valores máximos que se pueden alcanzar.

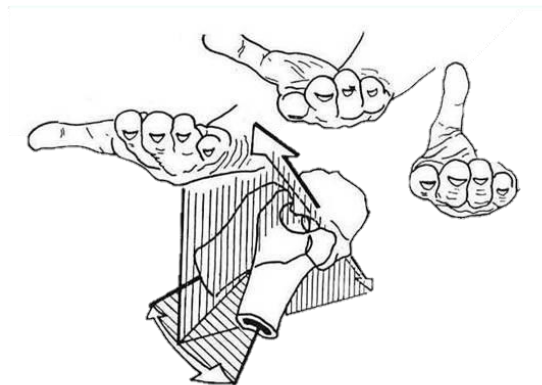


Imagen 14. Articulación trapezometacarpiana (11)

- **Articulación metacarpofalángica:** permite movimientos de flexión y extensión así como pequeños movimientos de lateralidad. Además esta articulación también permite el movimiento de rotación axial que ayuda a la oposición del pulgar.

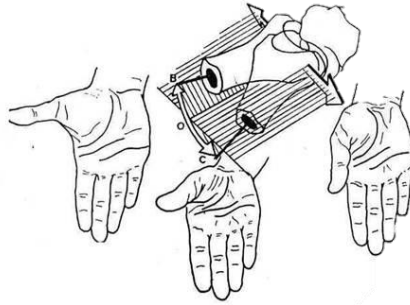


Imagen 15. Articulación metacarpofalángica. (11)

Para definir con mayor precisión la biomecánica del dedo pulgar, será necesario conocer las dimensiones y saber los ángulos que pueden alcanzar las diferentes articulaciones del dedo pulgar.

### 2.1.1. Ángulos máximos de las articulaciones del dedo pulgar.

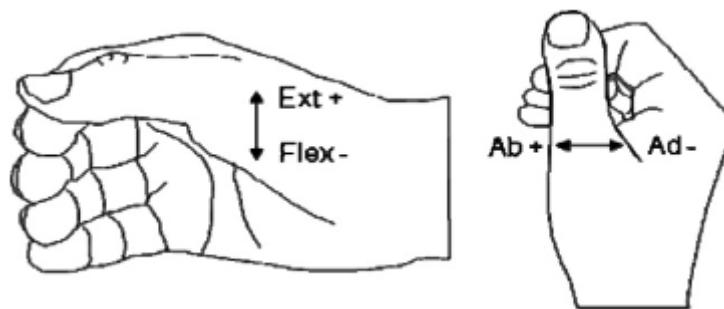


Imagen 16. Posiciones angulares neutrales del dedo pulgar. (12)

Para optimizar el diseño, necesitaremos conocer los ángulos de flexión-extensión y abducción-aducción. Para ello hemos recurrido a Calvanese et al., 2018 (12) y Jonsson et al., 2007 (11). Podemos comprobar que ambos arrojan valores similares, sin embargo por su mayor detalle se ha optado por los propuestos en el segundo estudio (11).

En primer lugar se muestran los datos determinados a través de un goniómetro manual.

	Valor medio (°)	Rango (°)
<i>Ab./Ad. Neutral</i>	0,0	0,0
<i>Ab. Máximo</i>	29,3	22,0 / 39,0
<i>Flex. Máximo</i>	-46,7	-60,0 / -27,0
<i>Ext. Máximo</i>	56,1	43,0 / 64,0

Tabla 1 Valores de los ángulos del dedo pulgar (goniómetro manual).(12)

A continuación se muestran los mismos valores pero obtenidos con un goniómetro electrónico.



	Valor medio (°)	Rango (°)
<i>Ab./Ad. Neutral</i>	-0,4	-6,0 / 5,0
<i>Ab. Máximo</i>	33,0	21,7 / 50,8
<i>Flex. Máximo</i>	-42,3	-61 / 23,1
<i>Ext. Máximo</i>	57,7	44,0 / 69,0

Tabla 2 Valores de los ángulos del dedo pulgar (goniómetro electrónico).(12)

### 2.1.2. Tamaños del dedo pulgar.

Para determinar los tamaños del dedo pulgar, en primer lugar debemos conocer su anatomía.

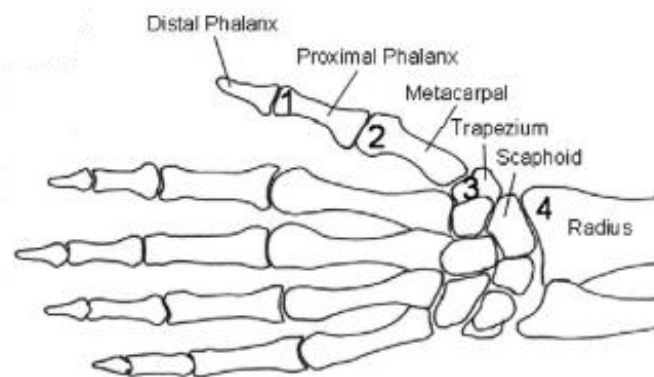


Imagen 17. Esqueleto de la mano (vista palmar).(10)

Se puede observar como en el caso del dedo pulgar, a diferencia del resto de dedos, únicamente presenta dos falanges: proximal y distal.

A través de dos estudios, que se exponen a continuación, se han determinado los valores medios de los tamaños de estas dos falanges.

- En el primero de ellos (13) se dan valores para una región concreta (VII Región de Chile-Maule), especificando por edades y mano.

edades	Falange proximal		Falange distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	41±7	41±7	32±4	32±4
20-24	40±6	40±6	32±3	32±3
25-29	42±7	42±7	34±4	34±5
30-34	41±9	41±8	32±5	31±5
35-39	39±8	38±8	32±4	31±5
40-44	40±10	40±11	31±9	31±8
45-49	44±4	43±6	33±3	32±4
50-54	41±7	40±7	32±4	32±4
55-59	39±11	40±12	33±4	33±4
60-64	38±9	38±10	33±4	33±5

Tabla 3. Longitud promedio de las falanges del dedo pulgar.(13)

- En el segundo caso (14) se proporcionan datos medios, sin especificar por sexo o edad.

Finger	tip – soft tissues of the tip of the distal phalanx (mm)	pd–distal phalanx (mm)	pm–medial phalanx (mm)	pp–proximal phalanx (mm)	m–metacarpal (mm)
I	5.67±0.61	21.67±1.60		31.57±3.13	46.22±3.94
II	3.84±0.59	15.82±2.26	22.38±2.51	39.78±4.94	68.12±6.27
III	3.95±0.61	17.40±1.85	26.33±3.00	44.63±3.81	64.60±5.38
IV	3.95±0.60	17.30±2.22	25.65±3.29	41.37±3.87	58.00±5.06
V	3.73±0.62	15.96±2.45	18.11±2.54	32.74±2.77	53.69±4.36

*Tabla 4. Longitudes promedio de las falanges del dedo pulgar.(14)*

## Capítulo 3. Definición conceptual del diseño del pulgar.

### 3.1. Selección y definición del tipo de diseño.

#### 3.1.1. Parámetros básicos de diseño

Con la definición de estos parámetros, se podrá comenzar a dar forma al producto final, ya que determinarán el número y tipo de motores y a su vez también los espacios disponibles que restringirán el diseño estructural del dedo.

- **Grados de libertad:** De acuerdo al enfoque de este trabajo, el número de grados de libertad será de dos. Uno para los movimientos de flexión-extensión y otro para los de abducción-aducción.
- **Velocidad:** De acuerdo a las afirmaciones de Weir, 2003 (14), se ha determinado que las velocidades medias para tareas como la selección y colocación en actividades diarias, se mueven en un rango entre 3 rad/s y 4 rad/s.
- **Fuerza de agarre:** También basándonos en Weir, 2003 (14) se puede conocer que una mano puede alcanzar hasta 400 N de fuerza. Sin embargo, en el caso de actividades diarias las necesidades de fuerza oscilan entre los 0 N y los 67 N. No obstante, puesto que el sistema se está diseñando para un único dedo nos centraremos en los desarrollos de Belter et al., 2013 (15), en el que se estudian las fuerzas que realizan los dedos de manos comerciales, y también en el estudio de Krausz et al., 2016 (1) que basándose en el anterior, propone una media de  $9,28 \pm 2,46$  N de fuerza para cada dedo.

Individual finger holding force at tip.			
Finger	Force (N)	Number of Trials	Standard Deviation
Vincent Large (ring, middle, and index)	4.82 or 8.44*	14 or 8*	0.8 or 1.3*
Vincent Small (little)	3.00	2	0.1
iLimb Large (middle)	7.66	2	0.2
iLimb Med (index/ring)	5.39	4	0.1
iLimb Small (little)	5.17	2	0.1
iLimb Pulse Med (index)	4.15 or 6.54*	1	—
iLimb Pulse Large (middle)	3.09 or 6.24*	2 or 2*	0.7 or 0.4*
iLimb Pulse Med (ring)	6.43 or 11.18*	2 or 2*	0 or 0.3*
iLimb Pulse Small (little)	4.09 or 8.56*	2 or 2*	0.1 or 0*
Bebionic (index)	12.47	1	—
Bebionic (middle)	12.25	2	1.0
Bebionic (ring)	12.53	2	1.1
Bebionic Small (little)	16.11	2	0.2
Bebionic v2 Large (ring, middle, and index)	14.5	2	1.2

\*Holding force after pulse mode.  
med = medium.

Tabla 5. Fuerzas de agarre en cada dedo.(15)

- **Dimensiones:** De acuerdo al capítulo anterior se determina un rango de tamaños basado en la media de ambos, tomando la edad de referencia en 20 años. Este rango queda entre 48,51 mm y 84 mm, sin embargo se ha de tener en cuenta que esta medida solo haría referencia a las falanges y por lo tanto el tamaño se incrementaría al incluir el resto de la estructura ósea (metacarpo),

pudiendo llegar como indica Weir, 2003 (14) hasta los 114,41 mm de longitud total.

- **Ángulos de las articulaciones del dedo pulgar:** basándonos de nuevo en el apartado anterior, tomaremos como valores de referencia los datos obtenidos mediante el goniómetro electrónico por ser más preciso que las mediciones manuales. Por lo tanto el movimiento de abducción-aducción se posicionará entre los 0 y los 33 grados y la flexión-extensión entre los -42,3 y los 57,7 grados.

### **3.1.2. Estructura conceptual del diseño**

De acuerdo a la antropometría del dedo pulgar, las características definidas en el punto anterior y las conclusiones extraídas del estado del arte, se puede realizar una conceptualización de las partes que compondrán el producto final.

- **Dedo:** en primer lugar se realizará una estructura que simulará las funciones del dedo humano, tales como agarrar, señalar o presionar superficies.
- **Soporte móvil:** este elemento servirá para integrar los dos movimientos para los que se diseñará el pulgar. Por un lado la abducción-aducción y por otro el de flexión-extensión.
- **Motores:** puesto que el diseño atiende a la realización de dos movimientos diferentes, será necesario disponer de dos motores, cada uno de ellos enfocado en uno de los movimientos.
- **Sistemas de transmisión:** finalmente para poder transmitir el movimiento de los motores al propio dedo se requerirán sistemas de transmisión como engranajes, o sistemas sinfín-corona.

## Capítulo 4. Estudio de mercado.

Antes de comenzar con los aspectos de diseño, tanto mecánico como estructural del dedo, se hace indispensable conocer los productos que existen en el mercado y de los que el proyecto es dependiente para poder así, adaptar en cada momento las características de los elementos a las características de los productos adquiridos.

En el caso de este proyecto los productos que no se fabricarán, serán los motores y las reductoras. Como se ha indicado en el apartado anterior, serán necesarios dos conjuntos motor-reductora, uno para el movimiento de flexión-extensión y otro para el de abducción-adducción.

En el propio laboratorio en el que se ha desarrollado el TFM, se dispone de un motor *Maxon modelo 463219* con una reductora 1/36 para una aplicación similar y que ha servido como punto de partida para este análisis ayudándonos a fijar dos características que nos han permitido acotar la búsqueda: dimensiones muy reducidas y tipología de corriente continua.

### 4.1. Análisis de mercado: Motores y reductoras.

Para comenzar este tipo de análisis lo primero ha sido buscar las casas de fabricantes que podían ofrecer este producto y a partir de ahí reunir sus principales características.

#### 4.1.1. Motores y reductoras Maxon

En primer lugar, optamos por esta casa ya que el comienzo de este proyecto, como se ha indicado al inicio de este capítulo se ve ligado a uno previo, basado en el desarrollo del resto de dedos de la mano. En dicho proyecto se optó por usar un motor de Maxon con su propia controladora (EPOS). Esta selección nos sirvió como punto de partida para la búsqueda de opciones óptimas para este proyecto.

El número de motores y combinaciones son muy elevadas, por lo tanto hemos escogido para cada rango de potencia (rango generado por el fabricante) el motor que presenta menor diámetro. A continuación se resumen las opciones consideradas:

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	Coste [€]	Coste total [€]
<b>463219</b>	<b>8</b>	<b>0,5</b>	<b>4,2</b>	<b>14300</b>	<b>0,631</b>	<b>70,45</b>	<b>70,45</b>
<b>REDUCTORAS</b>							
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Coste [€]	Coste total [€]	
468995	8	1024:1			192,36	262,81	
468996	8	256:1			165,27	235,72	
468997	8	64:1			140,64	211,09	

Tabla 6. Características Motor Maxon 463219. (16)

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	Coste [€]	Coste total [€]
<b>118397</b>	<b>10</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>9880</b>	<b>1,57</b>	<b>54,91</b>	<b>54,91</b>
<b>REDUCTORAS</b>							
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Coste [€]	Coste total [€]	
110310	10	64:1			48,82	103,73	
218417	10	64:1			96,55	151,46	
218418	10	256:1			128,91	183,82	

Tabla 7. Características Motor Maxon 118397.(16)

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	Coste [€]	Coste total [€]
<b>118485</b>	<b>13</b>	<b>2,5</b>	<b>10</b>	<b>11400</b>	<b>2,9</b>	<b>82,36</b>	<b>82,36</b>
<b>REDUCTORAS</b>							
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Coste [€]	Coste total [€]	
110313	13	4,1:1			39,63	121,99	
110314	13	17:1			48,64	131	
110315	13	67:1			55,73	138,09	
110316	13	275:1			63,82	146,18	

Tabla 8. Características Motor Maxon 118485.(16)

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	Coste [€]	Coste total [€]
<b>118683</b>	<b>16</b>	<b>3,2</b>	<b>4,8</b>	<b>5700</b>	<b>5,61</b>	<b>112,73</b>	<b>112,73</b>
<b>REDUCTORAS</b>							
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Coste [€]	Coste total [€]	
110321	16	4,4:1			41,73	154,46	
110322	16	19:1			49,73	162,46	
110323	16	84:1			58,09	170,82	
110324	16	370:1			66	178,73	
110325	16	1621:1			73,3	186,03	

Tabla 9. Características Motor Maxon 118683.(16)

#### 4.1.2. Motores y reductoras Faulhaber

Basándonos en el estudio de Krausz et al., 2016 (1) se decidió estudiar las opciones de este fabricante, ya que para su diseño hacían uso de los motores de esta casa. El número de opciones era más elevado y por lo tanto las combinaciones posibles pueden permitir una mejor adaptación a las necesidades.

Modelo	$\phi$ [mm]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]
<b>1219N4.5G</b>	<b>12</b>	<b>4,5</b>	<b>15300</b>	<b>0,72</b>
<b>REDUCTORAS</b>				
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión		
10/1	10	16:1		
10/1	10	64:1		
10/1	10	256:1		

Tabla 10. Características Motor Faulhaber 12194.5G.(17)

Modelo	$\phi$ [mm]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]
<b>1624T006S</b>	<b>16</b>	<b>6</b>	<b>10500</b>	<b>1,8</b>
<b>REDUCTORAS</b>				
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión		
16/17	16	14:1		
16/17	16	66:1		
16/17	16	190:1		
16/17	16	246:1		
16/17	16	415:1		
16/17	16	592:1		

Tabla 11. Características Motor Faulhaber 1624T006S.(17)

Modelo	$\phi$ [mm]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]
<b>2230T015S</b>	<b>22</b>	<b>15</b>	<b>8400</b>	<b>4,7</b>
<b>REDUCTORAS</b>				
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión		
22E	22	28:1		
22E	22	102:1		
22E	22	152:1		
22E	22	249:1		

Tabla 12. Características Motor Faulhaber 2230T015S.(17)

Modelo	$\phi$ [mm]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]
<b>118683</b>	<b>16</b>	<b>4,8</b>	<b>5700</b>	<b>5,61</b>
<b>REDUCTORAS</b>				
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión		
110321	16	4,4:1		
110322	16	19:1		
110323	16	84:1		
110324	16	370:1		
110325	16	1621:1		

Tabla 13. Características Motor Faulhaber 118683.

Después de analizar las opciones podremos afrontar con solvencia el análisis mecánico para poder seleccionar la mejor opción que se adapte a las necesidades de velocidad y carga.

# Capítulo 5. Diseño mecánico del dedo pulgar.

## 5.1. Análisis mecánico

### 5.1.1. Análisis cinemático del movimiento flexión-extensión

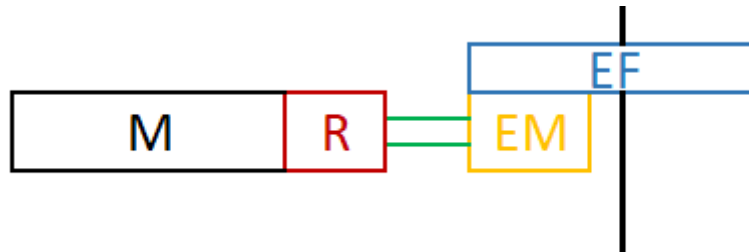


Imagen 18. Esquema del sistema motor-transmisión. (Elaboración propia)

- “M”: es el motor.
- “R”: es la reductora acoplada al motor.
- “EM”: es el engranaje móvil acoplado al eje de la reductora “R”.
- “EF”: es el engranaje fijo en el que acopla el engranaje móvil y gracias al cual se produce el movimiento de flexión y extensión.

En base a esta nomenclatura se fijan una serie de valores que servirán para realizar un análisis cinemático del movimiento.

- $W_{motor}$  será la velocidad de giro del motor.
- $W_{reductora}$  será la velocidad de giro a la salida de la reductora.
- $W_{flexión}$  será la velocidad que llevará el dedo medido respecto al eje que atraviesa el engranaje fijo (“EF”).
- $T_{flex-reduct}$  es la relación de transmisión entre el engranaje móvil y el engranaje fijo.
- $T_{reduct-motor}$  es la relación de transmisión entre la reductora y el motor.

Tal y como se fijó en el apartado de parámetros básicos de diseño la  $W_{flex}$  se sitúa entre los 3 rad/s y 4 rad/s, por lo tanto la fijaremos en 3,5 rad/s. El cálculo del resto de parámetros dependerá de las relaciones de transmisión.

$$\tau_{flex-reduct} = \frac{W_{flex}}{W_{reduct}}$$

$$W_{reduct} = \frac{W_{flex}}{\tau_{reduct}}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{W_{reduct}}{W_{motor}}$$

$$W_{motor} = \frac{W_{reduct}}{\tau_{reduct-motor}}$$



Para poder conocer los valores se debe fijar los valores de las relaciones de transmisión que a su vez vendrán determinados por los modelos de los diferentes motores y también por las necesidades de carga que queramos cubrir.

En el caso de este proyecto, se dispone inicialmente de un motor adquirido para el desarrollo del resto de dedos de la mano y que usaremos en este caso para poner números a los cálculos. No obstante se realizará un estudio mediante simulación para poder calcular y adaptarnos a las necesidades fijadas de velocidad.

El modelo del motor es Maxon 463219 que dispone de las siguientes características:

		Part Numbers						
		462207	463219	463220	463221	463222	463223	
		A with terminals	347723	347724	347725	347728	347726	347727
<b>Motor Data</b>								
<b>Values at nominal voltage</b>								
1	Nominal voltage	V	2.4	4.2	6	7.2	9	12
2	No load speed	rpm	13900	14200	13300	14300	14400	15600
3	No load current	mA	19.2	11.2	7.3	6.66	5.35	4.44
4	Nominal speed	rpm	4320	4480	3500	4220	4760	5410
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	0.63	0.624	0.616	0.596	0.626	0.589
6	Nominal current (max. continuous current)	A	0.412	0.237	0.155	0.134	0.113	0.0865
7	Stall torque	mNm	0.925	0.932	0.857	0.866	0.957	0.925
8	Stall current	A	0.581	0.34	0.207	0.187	0.166	0.13
9	Max. efficiency	%	67	67	66	66	68	67
<b>Characteristics</b>								
10	Terminal resistance	Ω	4.13	12.3	29	38.5	54.3	92.2
11	Terminal inductance	mH	0.03	0.09	0.206	0.257	0.4	0.606
12	Torque constant	mNm/A	1.59	2.74	4.15	4.63	5.77	7.11
13	Speed constant	rpm/V	6000	3490	2300	2060	1650	1340
14	Speed / torque gradient	rpm/mNm	15600	15700	16100	17200	15500	17400
15	Mechanical time constant	ms	6.31	6.3	6.34	6.44	6.29	6.49
16	Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	0.0388	0.0383	0.0375	0.0358	0.0387	0.0355

Imagen 19. Extracto de las características del motor Maxon 463219. (18)

$$\tau_{flex-reduct} = \frac{W_{flex}}{W_{reduct}} = 1/4$$

$$W_{reduct} = \frac{W_{flex}}{\tau_{reduct}} = \frac{3,5 \text{ rad/s}}{1/4} = 14 \text{ rad/s} = 133,7 \text{ rpm}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{W_{reduct}}{W_{motor}} = 1/36$$

$$W_{motor} = \frac{W_{reduct}}{\tau_{reduct-motor}} = \frac{14 \text{ rad/s}}{1/36} = 504 \text{ rad/s} = 4812,85 \text{ rpm}$$

Como se puede observar en las características el motor de Maxon 463219, el rango de velocidad del motor oscila entre 4480 rpm (velocidad nominal) y 14200 rpm (velocidad en vacío), por lo tanto se cumpliría la necesidad de alcanzar los 4812,85 rpm para conseguir la velocidad de 3,5 rad/s en el dedo.

No obstante para los motores estudiados en el análisis de Mercado realizaremos estudios para velocidades comprendidas entre 3 rad/s y 4 rad/s. A continuación se muestran los resultados obtenidos para los diferentes motores a 3,5 rad/s, sin embargo en el fichero de Excel "Estudio de Mercado" se recogen el resto de cálculos.

En estas tablas que recogemos a continuación se han marcado con verde aquellos motores que cumplen con las necesidades establecidas en cuanto a velocidad.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>					
<b>463219</b>	<b>8</b>	<b>0,5</b>	<b>4,2</b>	<b>14300</b>	<b>4480</b>	<b>0,631</b>						
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>			
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]			
468995	8	1024:1				10752,00	102674,04	14336,00	90075,74			
468996	8	256:1				2688,00	25668,51	3584,00	22518,94			
468997	8	64:1				672,00	6417,13	896,00	5629,73			

Tabla 14. Análisis cinemático Motor Maxon 463219

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>					
<b>118397</b>	<b>10</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>9880</b>	<b>3880</b>	<b>1,57</b>						
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>			
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]			
110310	10	64:1				672,00	6417,13	896,00	5629,73			
218417	10	64:1				672,00	6417,13	896,00	5629,73			
218418	10	256:1				2688,00	25668,51	3584,00	22518,94			

Tabla 15. Análisis cinemático Motor Maxon 118397.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>				
<b>118485</b>	<b>13</b>	<b>2,5</b>	<b>10</b>	<b>11400</b>	<b>7790</b>	<b>2,9</b>					
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
110313	13	4,1:1				43,05	411,10	57,40	360,65		
110314	13	17:1				178,50	1704,55	238,00	1495,40		
110315	13	67:1				703,50	6717,93	938,00	5893,63		
110316	13	275:1				2887,50	27573,59	3850,00	24190,26		

Tabla 16. Análisis cinemático Motor Maxon 118485.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>				
<b>118683</b>	<b>16</b>	<b>3,2</b>	<b>4,8</b>	<b>5700</b>	<b>3630</b>	<b>5,61</b>					
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
110321	16	4,4:1				46,2	441,1775023	61,6	387,0442149		
110322	16	19:1				199,5	1905,084669	266	1671,327292		
110323	16	84:1				882	8422,479588	1176	7389,025921		
110324	16	370:1				3885	37099,01723	5180	32546,89989		
110325	16	1621:1				17020,5	162533,8025	22694	142590,6074		

Tabla 17. Análisis cinemático Motor Maxon 118683.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>			
<b>14XXX</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>7730</b>	<b>5040</b>	<b>6</b>				
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>	
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
140XX	14	21:1				220,5	2105,619897	294	1847,25648	
140XX	14	62:1				651	6216,592077	868	5453,804847	
140XX	14	103:1				1081,5	10327,56426	1442	9060,353213	

Tabla 18. Análisis cinemático Motor Maxon 14XXX.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>			
<b>1219N4.5G</b>	<b>12</b>	<b>0,5</b>	<b>4,5</b>	<b>15300</b>	<b>0,72</b>				
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>	
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]
10/1	10	16:1				168	1604,281826	224	1407,433509
10/1	10	64:1				672	6417,127305	896	5629,734035
10/1	10	256:1				0,008359873	0,079830903	0,011146497	0,070035505

Tabla 19. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1219N4.5G.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS CINEMÁTICO</b>					
<b>1624T006S</b>	<b>16</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>10500</b>	<b>1,8</b>						
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>			
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]			
16/17	16	14:1			147,00	1403,75	196,00	1231,50			
16/17	16	66:1			693,00	6617,66	924,00	5805,66			
16/17	16	190:1			1995,00	19050,85	2660,00	16713,27			
16/17	16	246:1			2583,00	24665,83	3444,00	21639,29			
16/17	16	415:1			4357,50	41611,06	5810,00	36505,31			
16/17	16	592:1			6216,00	59358,43	8288,00	52075,04			

Tabla 20. Análisis cinemático Motor Faulhaber 124T006S.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS CINEMÁTICO</b>					
<b>2230T015S</b>	<b>22</b>	<b>2,5</b>	<b>15</b>	<b>8400</b>	<b>4,7</b>						
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>		<b>Tflex-reduct = 1/4</b>			
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]			
22E	22	28:1			294	2807,493196	392	2463,00864			
22E	22	102:1			1071	10227,29664	1428	8972,388619			
22E	22	152:1			1596	15240,67735	2128	13370,61833			
22E	22	249:1			2614,5	24966,63592	3486	21903,18398			

Tabla 21. Análisis cinemático Motor Faulhaber 2230T015S.

### 5.1.2. Análisis dinámico del movimiento flexión-extensión

A continuación se exponen los cálculos dinámicos necesarios para determinar la potencia del motor, sin embargo en primer lugar fijaremos el significado de los términos.

- $M_{motor}$  será el momento generado por el motor
- $M_{reductora}$  será el momento generado a la salida de la reductora.
- $M_{flexión}$  será el momento en el eje del engranaje fijo (“EF”).
- $T_{flex-reduct}$  es la relación de transmisión entre el engranaje móvil y el engranaje fijo.
- $T_{reduct-motor}$  es la relación de transmisión entre la reductora y el motor.

$$M_{flex} = F \cdot R$$

$$\tau_{flex-reduct} = \frac{M_{reduct}}{M_{flex}}$$

$$M_{reduct} = M_{flex} \cdot \tau_{flex-reduct}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{M_{motor}}{M_{reduct}}$$

$$M_{motor} = M_{reduct} \cdot \tau_{reduct-motor}$$

No obstante, del mismo modo que con la velocidad calculada en el punto anterior partiremos de las especificaciones del motor para conocer la fuerza que podría soportar el dedo.

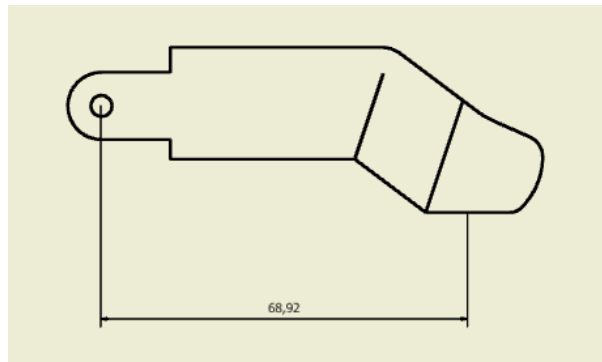


Imagen 20. Distancia R (punto de giro-punto de contacto)

$$M_{reduct} = \frac{M_{motor}}{\tau_{reduct-motor}} = \frac{0,624 \text{ mNm}}{1/36} = 22,464 \text{ mNm}$$

$$M_{flex} = \frac{M_{reduct}}{\tau_{flex-reduct}} = \frac{22,464 \text{ mNm}}{1/4} = 89,85 \text{ mNm}$$

$$F = \frac{M_{flex}}{R} = \frac{89,85 \text{ mNm}}{0,06892 \text{ m}} = 1303,68 \text{ mN} = 1,303 \text{ N}$$

$$Masa = \frac{F}{a} = \frac{1,303 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 0,1329 \text{ kg} = 132,89 \text{ g}$$

A diferencia del análisis cinemático el Motor *Maxon 463219* no cumple con las características fijadas de soportar aproximadamente 9,28 N de fuerza por lo tanto a través de la simulación mecánica podremos determinar las características necesarias del motor.

De acuerdo a la selección realizada en el punto anterior, se han calculado las masas que podrían soportar el resto de combinaciones de motores y reductoras. A continuación se muestran los datos obtenidos.

Del mismo modo que en el estudio cinemático, los motores que son válidos se señalan en verde en las siguientes tablas.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>463219</b>	<b>8</b>	<b>0,5</b>	<b>4,2</b>	<b>14300</b>	<b>4480</b>	<b>0,631</b>						
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	
468995	8	1024:1				1938,43	28,13	2,87	2584,58	37,50	3,82	
468996	8	256:1				484,61	7,03	0,72	646,14	9,38	0,96	
468997	8	64:1				121,15	1,76	0,18	161,54	2,34	0,24	

Tabla 22. Análisis dinámico Motor Maxon 463219.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>118397</b>	<b>10</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>9880</b>	<b>3880</b>	<b>1,57</b>						
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	M	
110310	10	64:1				301,44	4,37	0,45	401,92	5,83		
218417	10	64:1				301,44	4,37	0,45	401,92	5,83		
218418	10	256:1				1205,76	17,50	1,78	1607,68	23,33		

Tabla 23. Análisis dinámico Motor Maxon 118397.



Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>				
<b>118485</b>	<b>13</b>	<b>2,5</b>	<b>10</b>	<b>11400</b>	<b>7790</b>	<b>2,9</b>					
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]
110313	13	4,1:1				35,67	0,52	0,05	47,56	0,69	0,07
110314	13	17:1				147,90	2,15	0,22	197,20	2,86	0,29
110315	13	67:1				582,90	8,46	0,86	777,20	11,28	1,15
110316	13	275:1				2392,50	34,71	3,54	3190,00	46,29	4,72

Tabla 24. Análisis dinámico Motor Maxon 118485.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>				
<b>118683</b>	<b>16</b>	<b>3,2</b>	<b>4,8</b>	<b>5700</b>	<b>3630</b>	<b>5,61</b>					
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]
110321	16	4,4:1				74,05	1,07	0,11	98,74	1,43	0,15
110322	16	19:1				319,77	4,64	0,47	426,36	6,19	0,63
110323	16	84:1				1413,72	20,51	2,09	1884,96	27,35	2,79
110324	16	370:1				6227,10	90,35	9,21	8302,80	120,47	12,28
110325	16	1621:1				27281,43	395,84	40,35	36375,24	527,79	53,80

Tabla 25. Análisis dinámico Motor Maxon 118683.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>14XXX</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>7730</b>	<b>5040</b>	<b>6</b>						
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	
140XX	14	21:1				378,00	5,48	0,56	504,00	7,31	0,75	
140XX	14	62:1				1116,00	16,19	1,65	1488,00	21,59	2,20	
140XX	14	103:1				1854,00	26,90	2,74	2472,00	35,87	3,66	

Tabla 26. Análisis dinámico Motor Maxon 14XX.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>1219N4.5G</b>	<b>12</b>	<b>0,5</b>	<b>4,5</b>	<b>15300</b>	<b>0,72</b>						
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]
10/1	10	16:1				34,56	0,50	0,05	46,08	0,67	0,07
10/1	10	64:1				138,24	2,01	0,20	184,32	2,67	0,27
10/1	10	256:1				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 27. Análisis dinámico Motor Faulhaber 1219N4.5G.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>1624T006S</b>	<b>16</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>10500</b>	<b>1,8</b>						
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	
16/17	16	14:1			75,60	1,10	0,11	100,80	1,46	0,15	
16/17	16	66:1			356,40	5,17	0,53	475,20	6,89	0,70	
16/17	16	190:1			1026,00	14,89	1,52	1368,00	19,85	2,02	
16/17	16	246:1			1328,40	19,27	1,96	1771,20	25,70	2,62	
16/17	16	415:1			2241,00	32,52	3,31	2988,00	43,35	4,42	
16/17	16	592:1			3196,80	46,38	4,73	4262,40	61,85	6,30	

Tabla 28. Análisis dinámico Motor Faulhaber 1624T006S.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANÁLISIS DINÁMICO</b>					
<b>2230T015S</b>	<b>22</b>	<b>2,5</b>	<b>15</b>	<b>8400</b>	<b>4,7</b>						
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tflex-reduct = 1/3</b>			<b>Tflex-reduct = 1/4</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	
22E	22	28:1			394,80	5,73	0,58	526,40	7,64	0,78	
22E	22	102:1			1438,20	20,87	2,13	1917,60	27,82	2,84	
22E	22	152:1			2143,20	31,10	3,17	2857,60	41,46	4,23	
22E	22	249:1			3510,90	50,94	5,19	4681,20	67,92	6,92	

Tabla 29. Análisis dinámico Motor Faulhaber 2230T015S.

### 5.1.3. Selección del motor y reductora (flexión-extensión)

De acuerdo a lo expuesto anteriormente y al fichero “*Estudio de mercado\_flexión\_extensión*” donde se resumen todos los cálculos, se determina que existen en principio dos motores que podrían cumplir con los requerimientos necesarios.

Por un lado el motor 14XXX de la casa Maxon acoplado a la reductora 62:1 y el par de engranajes cónico 4:1, permitiría desarrollar pares que soportarían hasta 2,20 kg trabajando con velocidades de 3,5 rad/s - 4 rad/s.

Por otro lado el motor 2230T015S de Faulhaber que unido a la reductora 102:1 y los engranajes cónicos 4:1 permiten alcanzar hasta 2,84 kg con velocidades más bajas que en el caso anterior de 3 rad/s.

Para corroborar este estudio recurrimos a un software de simulación mecánica: Working Model.

### 5.1.4. Análisis cinemático del movimiento abducción-adducción



Imagen 21. Esquema del sistema motor-transmisión. (Elaboración propia).

- “M”: es el motor.
- “R”: es la reductora acoplada al motor.
- “SF”: es el tornillo sinfin acoplado a la reductora “R”.
- “CR”: es la corona que acopla con el tornillo sinfin produciendo el movimiento de abducción-adducción.

En base a esta nomenclatura se fijan una serie de valores que servirán para realizar un análisis cinemático del movimiento.

- $W_{motor}$  será la velocidad de giro del motor.
- $W_{reductora}$  será la velocidad de giro a la salida de la reductora.
- $W_{ab-ad}$  será la velocidad que llevará el dedo medido respecto al eje que atraviesa la corona (“CR”).
- $T_{flex-reduct}$  es la relación de transmisión entre el engranaje móvil y el engranaje fijo.
- $T_{reduct-motor}$  es la relación de transmisión entre la reductora y el motor.

Del mismo modo que se tomo un objetivo de velocidad entre 3 rad/s y 4 rad/s para los movimientos de flexión-extensión, se opta por fijar los mismos valores.

A continuación se muestra la forma genérica que se ha usado para realizar los cálculos. El procedimiento es idéntico al caso de la flexión-extensión solo que en este caso el movimiento a evaluar es el de abducción-adducción.

$$\tau_{abd-add} = \frac{W_{abd-add}}{W_{reduct}}$$

$$W_{reduct} = \frac{W_{abd-add}}{\tau_{reduct}}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{W_{reduct}}{W_{motor}}$$

$$W_{motor} = \frac{W_{reduct}}{\tau_{reduct-motor}}$$

Para poder conocer los valores se debe fijar las magnitudes de las relaciones de transmisión que a su vez vendrán determinados por los modelos de los diferentes motores y también por las necesidades de carga que queramos cubrir.

Como ya se conoce del estudio de flexión-extensión, en este proyecto, se dispone inicialmente de un motor adquirido para el desarrollo del resto de dedos de la mano. Usaremos dicho motor y sus características para dar valores numéricos a la ejemplificación. No obstante, como en el caso anterior, se realizará un estudio mediante simulación para poder calcular y adaptarnos a las necesidades fijadas de velocidad.

El modelo del motor es *Maxon 463219* que dispone de las siguientes características:

		Part Numbers						
		462207	463219	463220	463221	463222	463223	
		A with terminals	347723	347724	347725	347726	347727	
Motor Data								
Values at nominal voltage								
1	Nominal voltage	V	2.4	4.2	6	7.2	9	12
2	No load speed	rpm	13900	14200	13300	14300	14400	15600
3	No load current	mA	19.2	11.2	7.3	6.66	5.35	4.44
4	Nominal speed	rpm	4320	4480	3500	4220	4760	5410
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	0.63	0.624	0.616	0.596	0.626	0.589
6	Nominal current (max. continuous current)	A	0.412	0.237	0.155	0.134	0.113	0.0865
7	Stall torque	mNm	0.925	0.932	0.857	0.866	0.957	0.925
8	Stall current	A	0.581	0.34	0.207	0.187	0.166	0.13
9	Max. efficiency	%	67	67	66	66	68	67
Characteristics								
10	Terminal resistance	Ω	4.13	12.3	29	38.5	54.3	92.2
11	Terminal inductance	mH	0.03	0.09	0.206	0.257	0.4	0.606
12	Torque constant	mNm/A	1.59	2.74	4.15	4.63	5.77	7.11
13	Speed constant	rpm/V	6000	3490	2300	2060	1650	1340
14	Speed / torque gradient	rpm/mNm	15600	15700	16100	17200	15500	17400
15	Mechanical time constant	ms	6.31	6.3	6.34	6.44	6.29	6.49
16	Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	0.0388	0.0388	0.0375	0.0358	0.0387	0.0355

Imagen 22. Extracto de las características del motor Maxon 463219. (18)

$$\tau_{abd-add-reduct} = \frac{W_{abd-add}}{W_{reduct}} = 1/28$$

$$W_{reduct} = \frac{W_{abd-add}}{\tau_{reduct}} = \frac{3,5 \text{ rad/s}}{1/28} = 98 \text{ rad/s} = 935,83 \text{ rpm}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{W_{reduct}}{W_{motor}} = 1/36$$

$$W_{motor} = \frac{W_{reduct}}{\tau_{reduct-motor}} = \frac{98 \text{ rad/s}}{1/36} = 3528 \text{ rad/s} = 33689,92 \text{ rpm}$$

Como se observa en las características el motor *Maxon 463219*, el rango de velocidad del motor oscila entre 4480 rpm (velocidad nominal) y 14200 rpm (velocidad en vacío), por lo tanto no se cumpliría la necesidad de alcanzar los 33689,92 rpm para conseguir la velocidad de 3,5 rad/s en el dedo. A diferencia del caso anterior de flexión-extensión al tener una relación de transmisión tan mínima entre sinfín y corona los valores de velocidad van a aumentar en mayor medida.

No obstante para los motores estudiados en el análisis de Mercado realizaremos estudios para velocidades comprendidas entre 3 rad/s y 4 rad/s. A continuación se muestran los resultados obtenidos para los diferentes motores a 3,5 rad/s, sin embargo en el fichero "*Estudio de Mercado*" se recogen el resto de cálculos.

En estas tablas que recogemos a continuación se han marcado con verde aquellos motores que cumplen con las necesidades establecidas en cuanto a velocidad.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>463219</b>	<b>8</b>	<b>0,5</b>	<b>4,2</b>	<b>14300</b>	<b>4480</b>	<b>0,631</b>			
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
468995	8	1024:1				100352,00	958291,01		
468996	8	256:1				25088,00	239572,75		
468997	8	64:1				6272,00	59893,19		

Tabla 30. Análisis cinemático Motor Maxon 463219.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>118397</b>	<b>10</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>9880</b>	<b>3880</b>	<b>1,57</b>			
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
110310	10	64:1				6272,00	59893,19		
218417	10	64:1				6272,00	59893,19		
218418	10	256:1				25088,00	239572,75		

Imagen 23. Análisis cinemático Motor Maxon 118397.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>118485</b>	<b>13</b>	<b>2,5</b>	<b>10</b>	<b>11400</b>	<b>7790</b>	<b>2,9</b>			
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
110313	13	4,1:1				401,80	3836,91		
110314	13	17:1				1666,00	15909,13		
110315	13	67:1				6566,00	62700,68		
110316	13	275:1				26950,00	257353,54		

Imagen 24. Análisis cinemático Motor Maxon 118485.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>118683</b>	<b>16</b>	<b>3,2</b>	<b>4,8</b>	<b>5700</b>	<b>3630</b>	<b>5,61</b>			
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
110321	16	4,4:1				431,20	4117,66		
110322	16	19:1				1862,00	17780,79		
110323	16	84:1				8232,00	78609,81		
110324	16	370:1				36260,00	346257,49		
110325	16	1621:1				158858,00	1516982,16		

Imagen 25. Análisis cinemático Motor Maxon 118683.



Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>14XXX</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>18</b>	<b>7730</b>	<b>5040</b>	<b>6</b>			
<b>REDUCTORAS</b>							<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
140XX	14	21:1				2058,00	19652,45		
140XX	14	62:1				6076,00	58021,53		
140XX	14	103:1				10094,00	96390,60		

Imagen 26. Análisis cinemático Motor Maxon 14XXX.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>		
<b>1219N4.5G</b>	<b>12</b>	<b>0,5</b>	<b>4,5</b>	<b>15300</b>	<b>0,72</b>			
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tabd-add = 1/28</b>		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]		
10/1	10	16:1			1568,00	14973,30		
10/1	10	64:1			6272,00	59893,19		
10/1	10	256:1			0,08	0,75		

Imagen 27. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1219N4.5G .

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>
<b>1624T006S</b>	<b>16</b>	<b>1,5</b>	<b>6</b>	<b>10500</b>	<b>1,8</b>	
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tabd-add = 1/28</b>
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]
16/17	16	14:1			1372,00	13101,63
16/17	16	66:1			6468,00	61764,85
16/17	16	190:1			18620,00	177807,90
16/17	16	246:1			24108,00	230214,44
16/17	16	415:1			40670,00	388369,89
16/17	16	592:1			58016,00	554011,99

Imagen 28. Análisis cinemático Motor Faulhaber 1624T006S.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	<b>ANALISIS CINEMÁTICO</b>
<b>2230T015S</b>	<b>22</b>	<b>2,5</b>	<b>15</b>	<b>8400</b>	<b>4,7</b>	
<b>REDUCTORAS</b>						<b>Tabd-add = 1/28</b>
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión			Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]
22E	22	28:1			2744,00	26203,27
22E	22	102:1			9996,00	95454,77
22E	22	152:1			14896,00	142246,32
22E	22	249:1			24402,00	233021,94

Imagen 29. Análisis cinemático Motor Faulhaber 2230T015S.

### 5.1.5. Análisis dinámico del movimiento abducción-adducción

A continuación se exponen los cálculos dinámicos necesarios para determinar la potencia del motor, sin embargo en primer lugar se fijará el significado de los términos.

- $M_{motor}$  será el momento generado por el motor
- $M_{reductora}$  será el momento generado a la salida de la reductora.
- $M_{ab-ad}$  será el momento en el eje de la corona ("CR").
- $T_{ab-ad}$  es la relación de transmisión entre el sinfín y la corona.
- $T_{reduct-motor}$  es la relación de transmisión entre la reductora y el motor.

$$M_{ab-ad} = F \cdot d$$

$$\tau_{ab-ad} = \frac{M_{reduct}}{M_{ab-ad}}$$

$$M_{reduct} = M_{ab-ad} \cdot \tau_{ab-ad}$$

$$\tau_{reduct-motor} = \frac{M_{motor}}{M_{reduct}}$$

$$M_{motor} = M_{reduct} \cdot \tau_{reduct-motor}$$

No obstante, del mismo modo que con la velocidad calculada en el punto anterior partiremos de las especificaciones del motor para conocer la fuerza que podría soportar el dedo.

$$M_{reduct} = \frac{M_{motor}}{\tau_{reduct-motor}} = \frac{0,624 \text{ mNm}}{1/36} = 22,464 \text{ mNm}$$

$$M_{ab-ad} = \frac{M_{reduct}}{\tau_{ab-ad}} = \frac{22,464 \text{ mNm}}{1/28} = 628,992 \text{ mNm}$$

$$F = \frac{M_{flex}}{R} = \frac{628,992 \text{ mNm}}{0,02411 \text{ m}} = 26088,43 \text{ mN} = 26,088 \text{ N}$$

$$Masa = \frac{F}{a} = \frac{26,088 \text{ N}}{9,81 \text{ m/s}^2} = 2,659 \text{ kg}$$

En este caso el Motor Maxon 463219 cumpliría con las características fijadas de soportar aproximadamente 9,28 N de fuerza.

De acuerdo a la selección realizada en el punto anterior, se han calculado las masas que podrían soportar el resto de combinaciones de motores y reductoras.

A diferencia del caso de flexión-extensión en este caso la relación de transmisión tan reducida entre el sinfín y la corona provoca momentos muy grandes y prácticamente todos los motores son capaces de generar el momento suficiente para arrastrar los 9,28 N de objetivo que se han fijado. Por lo tanto en este caso no se exponen a continuación los datos y únicamente quedan incluidos en el fichero Excel "Estudio de mercado\_abducción\_adducción".

### 5.1.6. Selección del motor y reductora (abducción-adducción)

De acuerdo a lo expuesto anteriormente y a los ficheros “*Estudio de mercado\_flexión\_extensión*” y “*Estudio de mercado\_abducción\_adducción*” donde se resumen todos los cálculos, se determina que existen en principio dos motores que podrían cumplir con los requerimientos necesarios.

Por un lado el motor 118683 de la casa Maxon acoplado a la reductora 4,4:1 nos permitiría desarrollar pares muy elevados trabajando con velocidades de aproximadamente 3,5 rad/s.

Por otro lado el motor 1219N4.5G de Faulhaber que unido a la reductora 16:1 permite alcanzar las fuerzas necesarias y con velocidades aproximadamente de 3,5 rad/s.

Para corroborar este estudio, al igual que en el caso de flexión-extensión, recurrimos a un software de simulación mecánica: Working Model.

## 5.2. Simulación mecánica mediante working model

### 5.2.1. Diseño del sistema en working model.

De acuerdo al siguiente diseño de la estructura del dedo podremos fijar los diferentes elementos en Working Model.

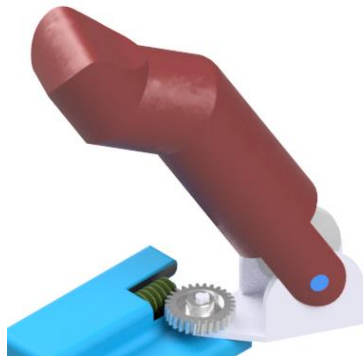


Imagen 30. Estructura del dedo. (Elaboración propia)

Para analizar tanto el movimiento de flexión-extensión como abducción-adducción aparecen una serie de elementos diferentes:

- Motores (flexión-extensión y abducción-adducción)
- Reductoras (flexión-extensión y abducción-adducción))
- Engranaje motriz (asociado al movimiento de la reductora flexión-extensión)
- Engranaje fijo (asociado al movimiento del dedo flexión-extensión)
- Corona (asociado al movimiento del soporte abducción-adducción)
- Sinfin (asociado al movimiento de la reductora abducción-adducción)
- Soporte al que se anclan los diferentes elementos

#### a. Movimiento de flexión-extensión

Para simularlo dispondremos un bloque que actúa como soporte sobre el que se anclará el engranaje fijo. Al engranaje fijo uniremos de manera rígida el dedo. Por otro lado generaremos otro soporte en el que irán el motor y la reductora unidos mediante engranajes. Por ultimo la reductora se une al engranaje fijo mediante otro par de engranaje simulando la unión de engranaje fijo y móvil.

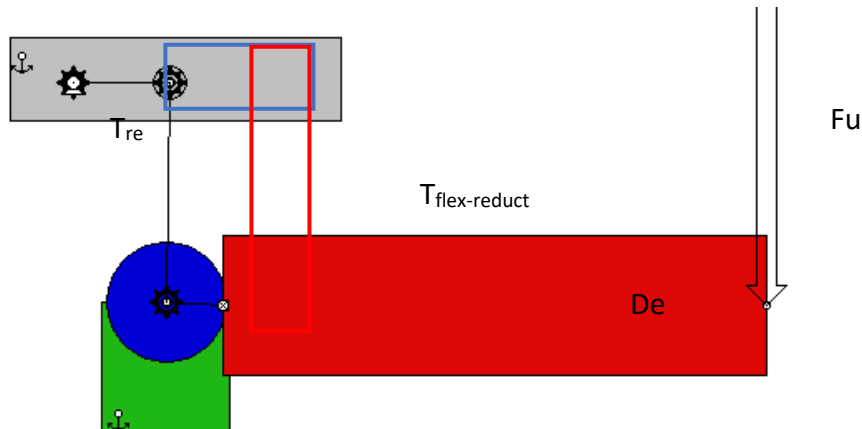


Imagen 31. Modelo dedo flexión-extensión en Working Model

### b. Movimiento de abducción-adducción

Para simularlo dispondremos un bloque que hará el efecto de la palma de la mano. Sobre él se ha anclado la pieza que actuaría como soporte, y a la misma, lo que sería el dedo. Aparecen dos sistemas de engranaje, el primero obedece a la reductora del motor y el segundo a la reducción entre sinfín y corona.

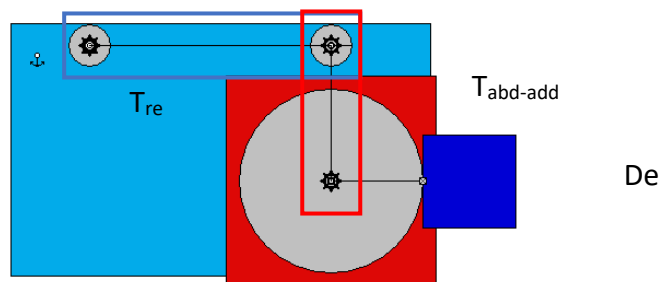


Imagen 32. Modelo dedo abducción-adducción en Working Model

### 5.2.2. Parámetros

A la hora de simular aparecerán diferentes parámetros que se describen a continuación:

- **Par motor:** se fija, de acuerdo a las especificaciones un par motor constante que en cada uno de los casos vendrá determinado por la gráfica del punto de trabajo. En base a ese valor se determinará el par óptimo y la velocidad de rotación máxima.

- **Velocidad de rotación del motor:** aunque se fijará mediante una condición y no como un parámetro, la velocidad de rotación vendrá al igual que el par motor determinada por la gráfica del punto de trabajo y será función tanto de la misma como del par motor seleccionado. La condición establecida por lo tanto será que la velocidad de rotación del motor no exceda dicho valor máximo para poder asegurar que el motor trabaja en términos reales y que no está imprimiendo una velocidad inconsecuente con el par motor.
- **Relaciones de transmisión:** existirán dos transmisiones. Una primera que corresponde con la reductora acoplada al motor, que en el caso del motor Maxon será de 62:1 y en el de Faulhaber de 102:1. La segunda transmisión será la que se realiza entre la reductora y el dedo que podrá tomar valores de 3:1 o de 4:1.
- **Fuerza:** los cálculos de los ficheros “*Estudio de mercado\_flexión\_extensión*” y “*Estudio de mercado\_abducción\_adducción*” están realizados de forma aproximada sin tener en cuenta, en el caso del estudio cinemático las cargas que debe soportar el dedo y arrojando por lo tanto valores para casos de carga nula. Por lo tanto esta simulación nos servirá para saber a que velocidad se moverá el dedo de forma real cuando se someta a una fuerza de 9,28 N que se ha de recordar, será el valor máximo y en ningún caso el más habitual.

### 5.2.3. Datos de simulación

#### a. Movimiento de flexión-extensión

Con el fin de corroborar que los motores y sistemas de transmisión seleccionados son los más adecuados se ha simulado el sistema mediante el software working model.

A continuación se disponen los datos de acuerdo a los que se simulará cada sistema.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS DINÁMICO			
14XXX	14	3	18	7730	5040	6				
REDUCTORAS							Tflex-reduct = 1/3		Tflex-reduct = 1/4	
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				F [N]	Masa [kg]	F [N]	Masa [kg]	
140XX	14	62:1				16,19	1,65	21,59	2,20	

Tabla 31. Análisis dinámico del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO (3,5 rad/s)			
14XXX	14	3	18	7730	5040	6				
REDUCTORAS							Tflex-reduct = 1/3		Tflex-reduct = 1/4	
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
140XX	14	62:1				651	6216,592077	868	5453,804847	

Tabla 32. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO					
14XXX	14	3	18	7730	5040	6						
REDUCTORAS							Tflex-reduct = 1/3			Tflex-reduct = 1/4		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wreduct [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wreduct [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
140XX	14	62:1				114,59	744,00	7104,68	152,79	992,00	6232,92	

Tabla 33. Análisis cinemático (4 rad/s) del motor Maxon 14XXX y reductora 62:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO				
14XX	14	3	18	7730	5040	6					
REDUCTORAS							Tflex-reduct = 1/3		Tflex-reduct = 1/4		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wreduct [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wreduct [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]
140XX	14	62:1				114,59	744,00	7104,68	152,79	992,00	6232,92

Tabla 34. Análisis dinámico del motor Faulhaber 2230T015S y reductora 102:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO (3 rad/s)			
2230T015S	22	2,5		15	8400	4,7				
REDUCTORAS							Tflex-reduct = 1/3		Tflex-reduct = 1/4	
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
22E	22	102:1				918,00	8766,25	1224,00	7690,62	

Tabla 35. Análisis cinemático (3 rad/s) del motor Faulhaber 2230T015S y reductora 102:1.

### b. Movimiento de abducción-adducción

Del mismo modo se exponen a continuación los datos utilizados para modelar el movimiento de abducción-adducción.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	Nn [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS DINÁMICO		
118683	16	3,2	4,8	5700	3630	5,61			
REDUCTORAS							Tabd-add = 1/28		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]	
110321	16	4,4:1				691,15	28,67	2,92	

Imagen 33. Análisis dinámico del motor Maxon 118683 y reductora 4,4:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO		
118683	16	3,2	4,8	5700	5,61			
REDUCTORAS						Tabd-add = 1/28		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
110321	16	4,4:1				431,20	4117,66	

Imagen 34. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Maxon 118683 y reductora 4,4:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS DINÁMICO		
1219N4.5G	12	0,5	4,5	15300	0,72			
REDUCTORAS						Tabd-add = 1/28		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Mflex [mNm]	F [N]	Masa [kg]
10/1	10	16:1				322,56	13,38	1,36

Imagen 35. Análisis dinámico del motor Faulhaber 1219N4.5G y reductora 16:1.

Modelo	$\phi$ [mm]	P [W]	Vn [V]	N [rpm]	M [mNm]	ANÁLISIS CINEMÁTICO		
1219N4.5G	12	0,5	4,5	15300	0,72			
REDUCTORAS						Tabd-add = 1/28		
Modelo	$\phi$ [mm]	Relación de transmisión				Wmotor [rad/s]	Wmotor [rpm]	
10/1	10	16:1				1568,00	14973,30	

Imagen 36. Análisis cinemático (3,5 rad/s) del motor Faulhaber 1219N4.5G y reductora 16:1.

### 5.2.4. Análisis de resultados

### a. Movimiento de flexión-extensión

Se analizarán principalmente dos parámetros. El primero de ellos será la velocidad de giro del dedo al aplicar 9,28 N de fuerza en el extremo de la estructura. En el “*Estudio de mercado flexión\_extensión*” el análisis cinemático se realiza sin tener en cuenta las cargas, por lo tanto esta simulación nos permitirá conocer que velocidad real alcanzará el dedo. El segundo parámetro evaluará que capacidad de carga extra sería capaz de soportar el dedo. Esto permitirá tener una visión de si en caso de sobrepasar, por algún motivo, los 9,28 N, en que grado el dedo podría mantener su comportamiento de forma adecuada.

- **Motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1**

A continuación exponemos los valores de velocidad resultantes de la simulación:

<b>Velocidad del Dedo</b>		
t [s]	V $\phi$ [rpm]	V $\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,05	19,67	2,06
0,10	20,40	2,14
0,15	19,88	2,08
0,20	19,16	2,01
0,25	19,94	2,09
0,30	20,04	2,10
0,35	20,09	2,10
0,40	20,66	2,16
0,45	20,78	2,18
0,50	22,80	2,39
0,55	20,94	2,19
0,60	21,69	2,27
0,65	21,15	2,21
0,70	21,22	2,22
0,75	20,89	2,19

Tabla 36. Análisis del motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1.

Por otro lado se evalúa el valor máximo de carga que puede soportar esta combinación.

<b>Fuerza-Tiempo total</b>	
t <sub>total</sub> [s]	F[N]
0,781	0,00
0,796	9,28
0,821	15,70

Tabla 37. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1.

- **Motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 3:1**

Se procede del mismo modo, con los resultados de velocidad y de fuerza:



<b>Velocidad del Dedo</b>		
t [s]	V $\phi$ [rpm]	V $\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,05	26,91	2,82
0,10	26,09	2,73
0,15	26,51	2,78
0,20	26,78	2,80
0,25	27,17	2,85
0,30	27,87	2,92
0,35	27,59	2,89
0,40	27,51	2,88
0,45	28,28	2,96
0,50	28,48	2,98
0,55	27,77	2,91
0,60	28,88	3,02

Tabla 38. Análisis del motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 3:1.

<b>Fuerza-Tiempo Total</b>	
t <sub>total</sub> [s]	F[N]
0,575	0,00
0,606	9,28
0,626	11,80

Tabla 39. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 3:1.

- **Motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1**

Se exponen los datos obtenidos de la simulación:

<b>Velocidad del Dedo</b>		
t [s]	V $\phi$ [rpm]	V $\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,05	12,54	1,31
0,10	12,72	1,33
0,15	12,68	1,33
0,20	12,68	1,33
0,25	12,59	1,32
0,30	13,62	1,43
0,35	12,66	1,33
0,40	12,72	1,33
0,45	12,86	1,35
0,50	13,03	1,36
0,55	13,82	1,45
0,60	13,10	1,37
0,65	12,82	1,34
0,70	13,75	1,44
0,75	12,76	1,34
0,80	12,74	1,33
0,85	12,83	1,34
0,90	12,60	1,32
0,95	13,53	1,42
1,00	13,89	1,45
1,05	13,19	1,38
1,10	13,41	1,40
1,15	13,72	1,44
1,20	12,91	1,35
1,25	13,22	1,38

Tabla 40. Análisis del motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1.

<b>Fuerza-Tiempo total</b>	
t <sub>total</sub> [s]	F [N]
1,268	0
1,284	9,28
1,349	25,9

Tabla 41. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1.

- **Motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 3:1**  
Se muestran los datos de velocidad y fuerza:

<b>Velocidad del Dedo</b>		
t [s]	V $\phi$ [rpm]	V $\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,05	26,91	2,82
0,10	26,09	2,73
0,15	26,51	2,78
0,20	26,78	2,80
0,25	27,17	2,85
0,30	27,87	2,92
0,35	27,59	2,89
0,40	27,51	2,88
0,45	28,28	2,96
0,50	28,48	2,98
0,55	27,77	2,91
0,60	28,88	3,02

Tabla 42. Análisis del motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 3:1.

<b>Fuerza-Tiempo total</b>	
t <sub>total</sub> [s]	F [N]
0,575	0,00
0,606	9,28
0,628	11,80

Tabla 43. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 3:1.

### **b. Movimiento abducción-adducción**

En este caso el análisis se centra en los mismos dos puntos que el de flexión-extensión pero con otro punto de vista. Por un lado analizamos la velocidad y el tiempo que tardará el dedo en girar el ángulo máximo. Por otro el tiempo que tarda en realizar ese mismo ángulo cuando variamos las fuerzas aplicadas. Como ya se ha determinado en el apartado de análisis de motores, la reducción elevada entre el sinfín y la corona permite que se soporten grandes momentos por lo tanto en este caso se ha evaluado no la máxima fuerza que podría soportar como se hizo en el análisis de flexión-extensión si no la variabilidad temporal que existe al aplicar el doble de fuerza de la objetivada.

- **Motor Maxon 118683 con reductora 4,4:1**

<b>Velocidad del Dedo</b>		
t [s]	V $\phi$ [rpm]	V $\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,10	35,00	3,67
0,20	35,03	3,67

Imagen 37. Análisis del motor Maxon 118683 con reductora 4,4:1 .

<b>Fuerza-Tiempo total</b>	
$t_{total}$ [s]	F [N]
0,240	0,00
0,250	9,28
0,270	18,56

Imagen 38. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Maxon 118683 con reductora 4,4:1

- **Motor Faulhaber 12194.5G con reductora 16:1**

<b>Velocidad del dedo</b>		
t [s]	$V\phi$ [rpm]	$V\phi$ [rad/s]
0,00	0,00	0,00
0,10	35,05	3,67
0,20	35,07	3,67

Imagen 39. Análisis del motor Faulhaber 12194N.5G con reductora 16:1

<b>Fuerza-Tiempo total</b>	
$t_{total}$ [s]	F [N]
0,240	0,00
0,240	9,28
0,250	18,56

Imagen 40. Comparativa fuerza vs tiempo total para el motor Faulhaber 12194N.5G con reductora 16:1

### 5.2.5. Solución adoptada

#### a. Movimiento de flexión-extensión

Teniendo en cuenta las consideraciones de diseño iniciales, expuestas en el Capítulo 3, la velocidad de rotación del dedo debería oscilar entre los 3 rad/s y 4 rad/s y además el dedo debe soportar al menos 9,28 N. En los datos anteriores los estudios de velocidad se han realizado con cargas de 9,28 N y además podemos observar que en todos los casos la fuerza máxima soportada por el conjunto de motor y reductoras es mayor a los 9,28 N y que por lo tanto en caso de surgir algún tipo de fallo que provocará que el dedo sufriera una carga mayor a la máxima estimada, el sistema podría soportarlo.

Sin embargo en el apartado de la velocidad si que aparecen más diferencias. En primer lugar el motor Faulhaber 2230T015S con reductora 102:1 y engranajes cónicos 4:1, no cumpliría por alcanzar velocidades muy bajas con un máximo de 1,45 rad/s. Otro caso que se podría considerar límite sería el primer ejemplo del motor Maxon 14XXX con reductora 62:1 y engranajes cónicos 4:1 que alcanzaría velocidades máximas de 2,4 rad/s que supondrían reducir en un 20 % el límite inferior de 3 rad/s.

Por otro lado tendríamos los dos casos que si cumplirían por alcanzar velocidades de 3 rad/s, que serían el motor Faulhaber 2230T015S y el Maxon 14XXX con sus reductoras correspondientes y engranajes cónicos 3:1, por lo tanto la opción más lógica sería optar por uno de estos dos modelos.

Si centramos la selección ahora en otros parámetros nos fijamos principalmente en las dimensiones, según los estudios antropológicos, un dedo pugar ronda una circunferencia de aproximadamente 22 mm. Si fijamos este parámetro como crítico para realizar la selección, se comprueba que el modelo de la casa Faulhaber mide 22 mm de circunferencia, lo que obligaría al diseño de un dedo con dimensiones fuera de la normalidad antropomórfica. Por otro lado, el modelo de Maxon únicamente tiene 14 mm de circunferencia, lo cual permitiría mantener esos 22 mm máximos de circunferencia. Además como es lógico, al ser más pequeño también supondría un menor peso y comprometería la velocidad en valores mínimos.

Por lo tanto, la selección adecuada sería el Motor Maxon 14XXX con reductora de 62:1 y engranajes cónicos 3:1. Esta configuración permitirá alcanzar los valores de fuerza necesarios y con los requerimientos de velocidad establecidos.

#### ***b. Movimiento de abducción-adducción***

En este caso, a diferencia del anterior, seleccionar en base a los objetivos principales de velocidades, pares, fuerzas o tamaño, es menos relevante puesto que tanto las velocidades como los pares y fuerzas se cumplen en ambos casos sobradamente. Además el tamaño tiene una menor limitación que en el caso de flexión-extensión en el que el motor tenía que ajustarse a una pieza de máximo 22 mm de diámetro. Para este caso de movimiento, se dispone de una pieza, como la palma de la mano, que permitirá alojar motores de mayor tamaño.

Por lo tanto en este caso, una de las métricas que permitirán la selección será el coste. Es una magnitud que no se ha dado primado en la parte de flexión-extensión porque como se ha comentado, eran más vitales otras métricas que permitieran cumplir los objetivos, pero no obstante, el precio también fue objeto de análisis.

En el caso del conjunto Maxon el valor del motor es de 112,73 € y de la reductora 4,4:1 de 41,73 €. Su pequeño tamaño y su configuración con menos engranajes permite que el precio sea más contenido. Por su parte el conjunto Faulhaber tiene un precio del motor de 48,45 € y reductora 48,64 €. Por tanto y teniendo en cuenta que ambas opciones cumplen los objetivos y las expectativas de calidad, se optará por seleccionar el motor Faulhaber 12194.5G que presenta menor precio y además un menor tamaño y como consecuencia menor peso que permitirá obtener un producto finalmente más ligero.

# Capítulo 6. Tecnologías de impresión 3D y su aplicación en la biomedicina.

## 6.1. Tecnologías de impresión 3D

### 6.1.1. Tecnología FDM

La tecnología FDM es un método de fabricación aditiva que usa termoplásticos para la fabricación de piezas con 3 dimensiones.

El funcionamiento a grandes rasgos se basa en una cama, que en ocasiones tiene control de temperatura, y un extrusor a través del que pasa el filamento. Este extrusor calienta el filamento a distintas temperaturas en función del material y este filamento fundido se deposita sobre la cama mediante capas consiguiendo así las piezas (19).

Actualmente son varias las aplicaciones en bioingeniería de esta tecnología (20):

- Moldes para poder aportar nutrientes a los tejidos que se están en proceso de fabricación y que en ocasiones ven limitado su crecimiento por la falta o mala distribución de nutrientes.
- Tejido óseo ya que algunos materiales como el PCL y PPF presentan propiedades y resistencia mecánica similar a la de los huesos.
- Replica de tejidos blandos.

### 6.1.2. Tecnología SLA

La tecnología SLA es un método de fabricación aditiva basado en la fotopolimerización de una resina mediante un láser que de forma selectiva provoca el endurecimiento de las capas generando así el modelo.

El procedimiento consiste en una cama que en este caso se empapa en una resina sobre la cual actúa un láser, que de forma selectiva y en base a la forma deseada endurece parte de esa resina. Después de generar una capa, la cama vuelve a empaparse con la resina del tanque y regresa al mismo punto para repetir el procedimiento hasta obtener la pieza.

Actualmente hay varias aplicaciones orientadas al campo de la bioingeniería (21):

- Desarrollo de plantillas y órtesis customizadas para cada paciente.
- Fabricación de réplicas para la práctica y el ensayo de casos clínicos.
- Desarrollo de piezas dentales.

### 6.1.3. Comparativa FDM vs SLA

La comparativa de ambas tecnologías se puede establecer en base a diferentes términos (22) (23) (24):

- **Calidad de impresión y precisión:** La tecnología FDM se basa como se ha explicado en la deposición de plástico fundido a través de una boquilla, por lo

tanto la resolución de la pieza va a venir determinada por las características de dicha boquilla. Estas características pueden provocar la aparición de huecos entre las diferentes capa generando una menor fuerza de unión entre las mismas y a la vez también es más sencillo que se produzcan deformaciones o desalineación entre las capas. Por su parte la impresión SLA permite alcanzar mayores resoluciones ya que en este caso, depende del tamaño del punto óptico del láser. Además la impresión mediante tecnología SLA se realiza a temperatura ambiente, sin necesidad de calentar un material y por lo tanto no sufre la influencia de acciones térmicas de expansión o contracción.

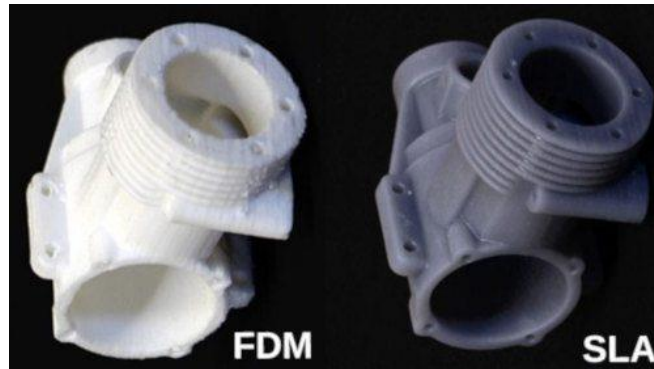


Imagen 41. Comparativa impresión FDM vs SLA. (24)

- **Materiales utilizados:** Respecto a los materiales empleados se presentan dos grandes diferencias, por un lado la tecnología FDM usará termoplásticos mientras que la SLA usará polímeros termoestables. Las diferencias que se establecerán en estos términos se deben como es lógico a las características de cada uno de estos materiales. En el caso de los termoestables no se verán alterados por las acciones de la temperatura mientras que en el caso de los termoplásticos si podría suceder.

Otro factor importante se centra en que el número de materiales para impresoras FDM es mayor y ofrece más variedades de colores o propiedades. En el caso de las impresoras SLA el catálogo es más limitado tanto de colores como de propiedades aunque existen suficientes para cubrir un amplio rango de necesidades.

- **Velocidad de impresión:** Las impresiones FDM usan capas más gruesas y menores densidades de relleno, aumentando de este modo la velocidad de impresión. Además a esas características se une la falta de postprocesado en la mayoría de casos, generando una pieza válida al finalizar la impresión.

Por su parte las impresiones con SLA, al tener capas más delgadas resultan más lentas, si bien es cierto que hay nuevos materiales que permiten agilizar este proceso, la realidad es que al usar menos altura de capa el proceso se prolonga.

- **Postprocesado:** Para la tecnología FDM es necesario realizar la separación de la pieza de la cama y eliminar los soportes y rebabas que se han generado durante la impresión. Por su parte las impresiones realizadas con SLA requieren un baño en alcohol isopropílico, un curado a una temperatura concreta y

durante un tiempo concreto de acuerdo a las características de cada material. Por último también se deben retirar los soportes generados durante la impresión.



Imagen 42. Gráfica de curado de la resina tipo Clear.

- **Costes de impresión:** Para analizar los términos económicos existirían tres apartados en los que centrarnos.

Un primer apartado debe hacer referencia a los equipos. En el caso de las impresoras FDM, los equipos que permitan alcanzar buenas calidades pueden oscilar entre los 2.000 € y 6.000 €. Por su parte las impresoras SLA tienen un mayor coste y oscilan entre los 3.000 € hasta 10.000 €. En ambos casos hablamos de impresoras de escritorio orientadas para laboratorios y no de equipos ideados para grandes industrias que puedan fabricar piezas de grandes volúmenes.

Un segundo apartado para analizar los términos económicos serían los costes de material. En el caso de materiales para FDM hay múltiples precios en función del tipo de plástico (PLA, PVA, PP, ABS). Por ejemplo un rollo de 1 kg de PLA puede costar unos 18 €, mientras que un rollo de 1 kg de PVA ronda los 50 € (24). Por su parte las resinas para SLA, por lo general rondan precios más elevados. 1 litro de resina Clear cuesta 150 € y 1 litro de resina Castable Wax 250 € (25).

El último punto de análisis económico se centra en los costes humanos a la hora de invertir tiempo en fijar los parámetros de la impresión. En el caso de la tecnología FDM aunque es más barata por equipos y materiales, requiere más dedicación del operario, ya que son más parámetros los que se deben controlar y no disponen de valores predeterminados en función del material. Además en caso de querer conseguir acabados de buena calidad requerirán post-procesados prolongados. Por su parte las impresiones SLA disponen de parámetros de impresión predeterminados en función del material, ahorrando así tiempo del operario.



## 6.2. Parámetros de impresión

Como se ha mencionado previamente a la hora de realizar la impresión es necesario fijar una serie de parámetros en función de la calidad que queramos alcanzar o la velocidad con la que se quiera imprimir entre otros. Como también se ha comentado en el apartado anterior, las impresoras SLA son menos flexibles en cuanto a la variación de parámetros y suelen disponer de valores predeterminados en función del material que equilibran perfectamente el tiempo de impresión y la calidad, sin embargo en el caso de las FDM la capacidad de variación es mucho mayor. Por lo tanto a continuación, se expondrán los principales valores y las magnitudes elegidas para las impresiones que vamos a realizar tanto en FDM como en SLA.

### 6.2.1. Parámetros de impresión FDM.

Al realizar una impresión FDM se deben tener varios parámetros en cuenta.

- El primero de ellos será la **temperatura** tanto del material como de la cama, en ambos casos variarán en función del material que se este empleando. En nuestro caso el material será PLA y según hojas del fabricante alcanza sus valores óptimos entre 200 °C y 210 °C. Por otra parte la cama debe alcanzar los 60 °C y además como extra a esta temperatura, deberá llevar una capa de laca que permita la adhesión de la pieza (26).
- Otro factor importante a la hora de imprimir con PLA será el **tipo de boquilla**. Según el fabricante de nuevo en este caso son válidas las boquillas AA 0.25, las AA 0.4 y las AA 0.8, en nuestro caso por ser las disponibles en el laboratorio hemos empleado las AA 0.4. Es importante destacar que un menor valor permite alcanzar un mayor detalle, no obstante la AA 0.4 consigue un buen equilibrio entre acabado y calidad (26).
- Otro parámetro a analizar es la **altura de capa**. De acuerdo a muchas recomendaciones esta no debe exceder el tamaño del diámetro de la boquilla, considerándose valores ideales aproximadamente el 50 % del valor de la misma. En nuestro caso y con el fin de alcanzar un mayor acabado se ha puesto en 0.1 mm, de este modo se busca que no se noten diferencias entre cada capa (27) (28).
- El parámetro referido al **grosor de la pared** no dispone de mucha documentación técnica y se basa en cuestiones experimentales. Lo único que se arroja en claro es que una sola capa equivalente al diámetro de la boquilla daría como resultado un producto endeble. Por ese motivo se ha decidido aumentar 1,5 veces el diámetro de la boquilla para así conseguir una pieza robusta pero que permita un buen acabado (27) (29).
- El **relleno** es otro parámetro de vital importancia y vendrá determinado por dos factores: la densidad y el patrón. En el caso de la densidad los valores vienen determinados por el objetivo que se busca. Si se desea una pieza ligera llevará menor cantidad de relleno y si en cambio se busca una pieza más robusta se

optará por aumentarlo. En nuestro caso optaremos por el 20 % que es un valor muy común ya que permite un compromiso entre resistencia, peso y tiempo de impresión (30) (31).

Otro factor en el parámetro del relleno es el patrón. En nuestro caso se ha escogido el triangular por optimizar el tiempo y por la resistencia de la que dota dicho patrón a la pieza.

- Por último queda la **velocidad de impresión**. Para imprimir PLA las velocidades recomendadas oscilan entre 30 mm/s y 60 mm/s, resultando obvio que a menor velocidad mayor tiempo de impresión pero mayor calidad en el acabado. En nuestro caso concreto para buscar un compromiso entre velocidad y acabados hemos optado por una velocidad intermedia de 50 mm/s (27) (32).

A continuación, se expone un cuadro resumen con los valores que se han tomado para realizar las impresiones, así como la interfaz del software de configuración.

<b>Calidad</b>	
Altura de capa	0,1 mm
<b>Revestimiento</b>	
Grosor de pared	1 mm
<b>Material</b>	
Temperatura de impresión	200 °C
Temperatura de la cama	60 °C
<b>Relleno</b>	
Densidad	20%
Patrón	Triángulos
<b>Velocidad</b>	
Velocidad de impresión	50 mm/s

Imagen 43. Parámetros de impresión FDM.

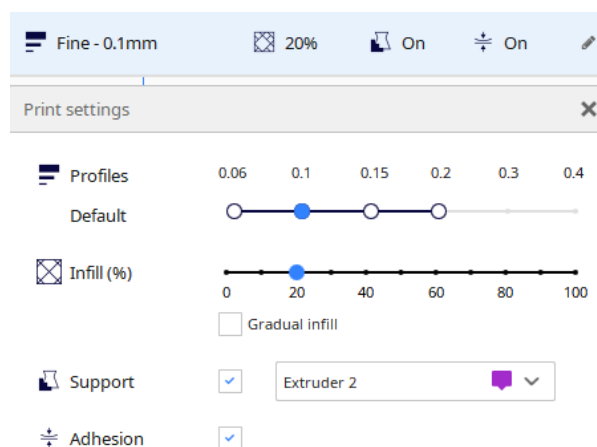


Imagen 44. Interfaz de parametrización del software Cura.

### 6.2.2. *Parámetros de impresión SLA.*

A continuación se describen los parámetros que afectan a la impresión con tecnología SLA. Cabe destacar que en función del material los parámetros toman valores diferentes, en este caso particular las impresiones se realizaron con resina Clear.

- El primer parámetro será la **altura de capa** que permitirá obtener una mayor o menor calidad en el acabado. Como es lógico una mayor altura de capa nos permitirá acabar más rápido la impresión, sin embargo conseguiremos una menor calidad.  
En nuestro caso las piezas que se imprimen mediante SLA requiere elevados grados de precisión por tanto se fija la altura de capa al mínimo en 0,025 mm que permite el tipo de resina.
- Un segundo parámetro será el **tiempo de exposición** que determinará el tiempo que la resina se expone al fotocurado. Un tiempo apropiado suelen ser los 6 segundos para conseguir solidificar la capa.
- El **tiempo de alzado del eje Z** que se mide como un avance en mm/min es como indica el propio nombre a la velocidad a la que se eleva la plataforma de impresión desde el tanque de resina cada vez que genera una capa fotocurada. Un tiempo de alzado muy rápido provocará que la pieza se pueda romper. La velocidad estándar se fija en 65 mm/min.
- **Orientación de partes** es en cierto modo un parámetro ya que variando las angulaciones podemos conseguir diferentes calidades. En la mayoría de casos hemos dispuesto ángulos de entorno a 45<sup>o</sup> ya que tras diferentes pruebas son los que mejores acabados nos permitían obtener.

### 6.3. *Uso de las tecnologías 3D en la impresión de los componentes del dedo*

Para la producción de las diferentes piezas necesarias usaremos las dos tecnologías mencionadas previamente. En función de la pieza se usará una u otra basándonos en sus diferentes propiedades y características que hemos comparado previamente.

El producto final tendrá 4 tipos de piezas:

- **Dedo:** será el producto que tendrá la forma aproximada del dedo y que cumplirá con las funciones propias del mismo. Para desarrollarlo se ha seleccionado la tecnología FDM por varias razones. La primera de ellas ha sido los menores costes, puesto que es uno de los objetivos de este proyecto y porque es la pieza de mayor tamaño e imprimirla en resina resultaría más caro. Otra ventaja por la que se ha seleccionado esta tecnología es porque se necesita generar un producto que en comparación con el conjunto es de gran volumen pero a la vez requiere pesar muy poco. Si hubiéramos optado por SLA el objeto sería macizo, de este modo podemos conseguir reducir el relleno sin comprometer la rigidez ni la resistencia pero consiguiendo menores pesos.
- **Soporte:** del mismo modo que el dedo es una pieza de elevado volumen y por ese motivo se ha optado por realizar en FDM ya que abarata el coste y permite

aligerar la pieza. Además no es una pieza con detalles precisos por lo tanto la tecnología FDM permite alcanzar la calidad necesaria.

- **Pasadores:** en este caso los productos son más pequeños que en los casos previos, además al tratarse de elementos que van a través de un agujero necesitan un buen acabado y dimensiones precisas. Por ese motivo y también porque se requiere una mayor densidad y rigidez por el compromiso mecánico se ha optado por tecnología SLA.
- **Engranajes:** en este objeto es innegable la necesidad de usar tecnología SLA ya que el nivel de precisión para reproducir los dientes de los engranajes debe ser muy alto y no se podría conseguir con tecnologías FDM.

## *Capítulo 7. Diseño y fabricación de los componentes.*

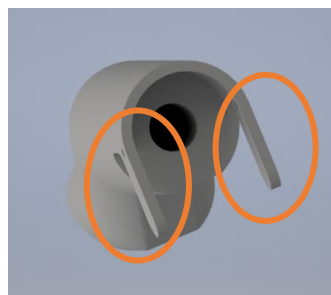
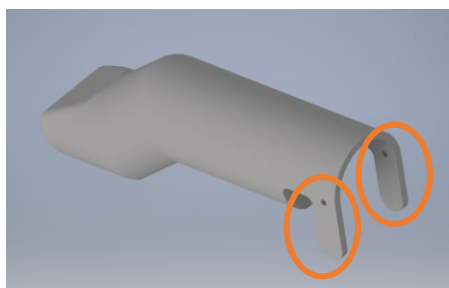
Para poder conseguir el producto final, es decir un dedo con los dos movimientos de flexión-extensión y abducción-adducción se han realizado varios modelos. Todos ellos han tenido en común varias cuestiones que han servido de premisa para el diseño:

- El dedo va a ser un único sólido rígido que además se fabricará como una pieza única. En su interior, basándonos en estudios previos se dispondrá el motor que permita la flexión y extensión del mismo por lo tanto deberá llevar un hueco cilíndrico que permita el ajuste del mismo en el interior.
- El soporte será una pieza que dispondrá del mecanismo para unirse con el dedo. A su vez deberá albergar el sistema de engranajes, por lo tanto el volumen vacío deberá ser suficiente para que no haya colisiones entre los diferentes objetos. Esta pieza se encargará de permitir el movimiento de flexión-extensión gracias a la unión con el dedo y también del movimiento de abducción-adducción al permitir la unión con lo que sería la palma de la mano.
- Los pasadores serán las piezas encargadas de realizar la unión entre el dedo y el soporte. Deberán permitir la rotación y ajustarse perfectamente a los taladros del pasador y el dedo para que exista la movilidad de flexión-extensión.
- Los engranajes serán las piezas que requieran la mayor precisión ya que presentan los detalles más precisos. Su posición será dentro del soporte donde el engranaje motriz que irá ensamblado al eje del motor encajara con el engranaje móvil que se encontrará fijo a la pared del soporte y permitirá de este modo el giro.

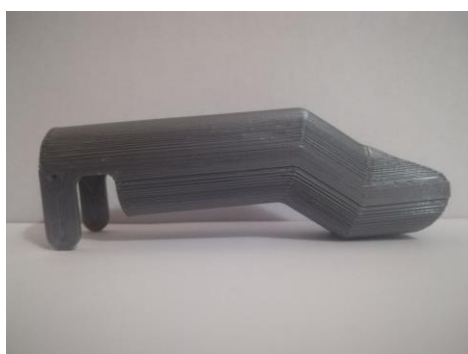
### *7.1. Dedo: diseño y fabricación*

El diseño del dedo se ha basado en las dimensiones del Capítulo 2, en las dimensiones de los motores y en otras adaptaciones necesarias basadas en la experimentación y en las pruebas realizadas que han permitido determinar que diseños eran más útiles.

A continuación se muestra la primera aproximación que se realizó del dedo. En esta se diseño la forma externa que sería prácticamente la definitiva, en ella se trato de asemejar las formas de un dedo, se dispuso una zona plana en lo que correspondería con la yema y se trataron de imitar el resto de formas y curvaturas del dedo en un estado relajado. En lo que si sufriría cambios a posteriori sería en el mecanismo de unión. En esta primera aproximación, con el fin de dar algo más de rigidez se dispusieron unas patillas (señaladas en la Imagen 45) que al realizar posteriormente las pruebas vimos que limitarían el movimiento teniendo en cuenta las necesidades del soporte y no permitirían alcanzar los grados de movilidad necesarios.

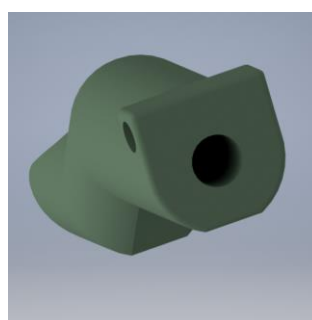
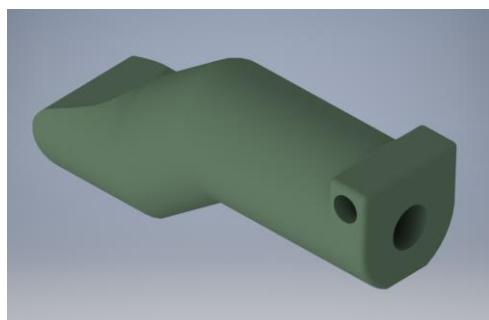


*Imagen 45. Versión 1.0. Diseño del dedo.*



*Imagen 46. Versión 1.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA)*

En una segunda versión se entró a mejorar los fallos previos. Se eliminaron las patillas y además el taladro del pasador se hizo de mayor tamaño para hacer más robusta la pieza.

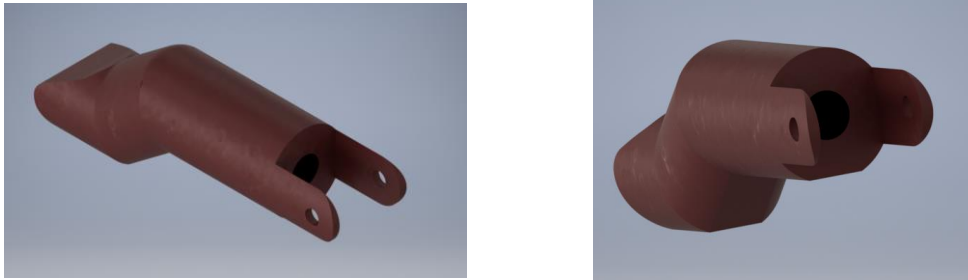


*Imagen 47. Versión 2.0. Diseño del dedo.*



*Imagen 48. Versión 2.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA)*

En la segunda versión se eliminaron las patillas y podíamos alcanzar los grados de giro necesario, sin embargo al introducir los engranajes apareció un nuevo fallo basado en que la posición del eje de rotación no permitía de nuevo realizar el giro total. Por lo tanto la nueva y definitiva versión mantenía la forma pero el eje del pasador se posiciona alineado con el centro del engranaje fijo para que se pueda realizar el giro de flexión-extensión completo.



*Imagen 49. Versión 3.0. Diseño del dedo.*



*Imagen 50. Versión 3.0. Diseño del dedo. Impresión FDM (PLA)*

Esta versión 3.0 es la definitiva ya que reúne los requisitos necesarios y permite realizar el movimiento de flexión-extensión completo.

En el Anexo A, al finalizar este documento se encuentran los planos del diseño.

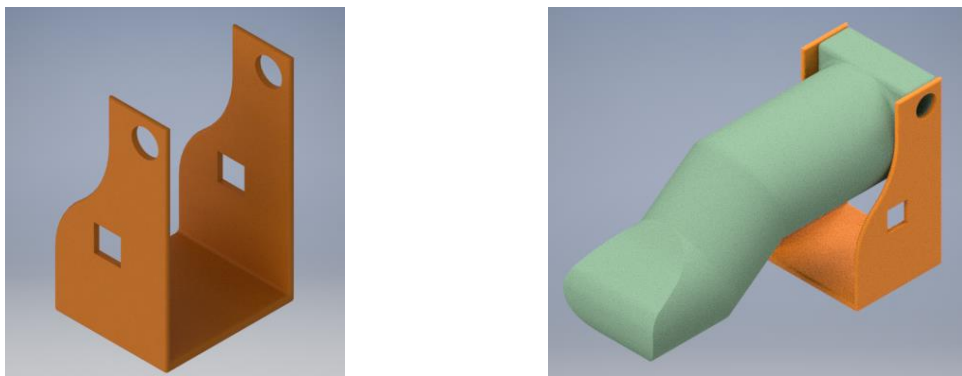
Por otra parte como ya se ha mencionado anteriormente, la fabricación de este producto se llevo a cabo mediante FDM. Para ello se utilizó una impresora Ultimaker 3 con el material PLA que tiene un coste reducido y nos permite realizar pruebas de forma rápida y también conseguir un producto final con la calidad suficiente. Para proceder a la impresión se ajustaron los parámetros, tal y como se explico en el Capítulo 6, mediante el software Cura, para conseguir buena cohesión entre las capas y además dotar al dedo de la máxima ligereza para evitar comprometer la acción del motor.

## **7.2. Soporte: diseño y fabricación**

Del mismo modo que en el caso de los dedos y con el fin de adaptarse a las diferentes versiones de los mismo, el soporte también ha sufrido cambios. No obstante su función siempre ha sido la misma, por un lado unirse con el dedo para poder generar el movimiento de flexión-extensión, alojando además parte del sistema de transmisión, y por otro lado la unión con la mano para realizar el movimiento de abducción-adducción.

En una primera versión enfocada en la versión 2.0 del dedo, se generó un dispositivo que permitía ensamblar con el dedo a través de un taladro circular. Además la pieza disponía otro taladro, en este caso cuadrado que serviría para alojar el pasador que retendría el engranaje fijo. Como ya apuntamos anteriormente este diseño daría un error al no permitir el movimiento completo de flexión-extensión.

A continuación se muestra la pieza y también el ensamblaje con la versión 2.0 del dedo.



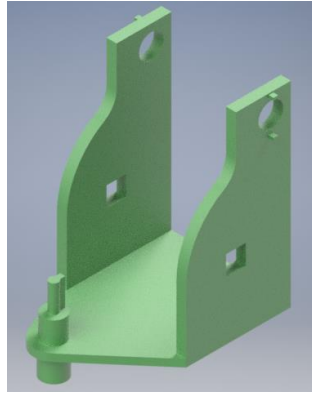
*Imagen 51. Versión 1.0. Diseño del soporte y ensamblaje soporte 1.0 - dedo 2.0 .*



*Imagen 52. Versión 1.0. Diseño del soporte. Impresión FDM (PLA)*

Sobre esta primera versión se implementó una mejora realtiva a la unión con la palma y la implementación del movimiento de abducción-adducción. Esta mejora se compone de la extensión de la base y el añadido de una serie de cuerpos cilíndricos que permiten la unión con la palma y el ensamblaje de la rueda dentada que formará parte del Sistema de transmisión.

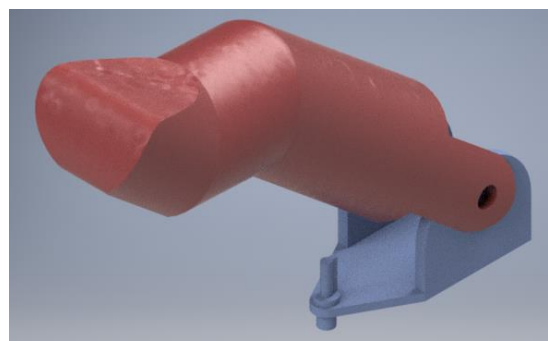
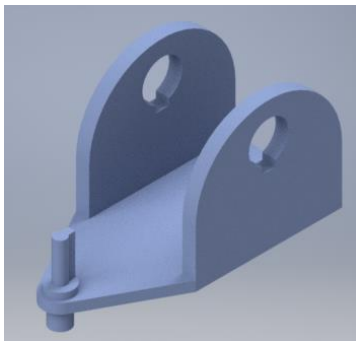




*Imagen 53. Versión 2.0. Diseño del soporte.*

Con el fin de resolver el problema del ángulo de flexión-extensión se implementaron nuevos cambios. Se redondearon los bordes superiores para evitar cualquier tipo de colisión al realizar el giro entre soporte y dedo. Además se realizó un único taladro que dispone de un chavetero para poder conseguir que el engranaje fijo no se mueva. También cabe destacar que en un primer diseño que pensó en que la estructura del dedo fuera contenida entre las dos paredes del soporte pero esa opción no permitía la fijación del engranaje por lo tanto se optó por reducir la distancia entre las paredes y hacer que el dedo se situará por la parte exterior de las paredes.

A continuación se muestra tanto el soporte como el ensamblaje del mismo con el dedo versión 3.0 .



*Imagen 54. Versión 3.0. Diseño del soporte y ensamblaje soporte 3.0 - dedo 3.0 .*



*Imagen 55. Versión 3.0. Diseño del soporte. Impresión FDM (PLA)*



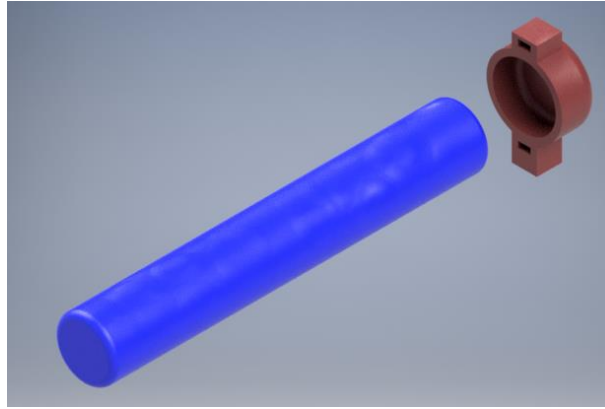
*Imagen 56. Versión 3.0. Diseño del soporte. Impresión SLA (Clear)*

Los planos referentes a dicha pieza quedan en el Anexo A.

En cuanto al método de fabricación en este caso se probaron ambos, por un motivo principal y es que el grosor de las paredes laterales no era muy grande y la tecnología FDM podría no generar una pieza con la rigidez suficiente. Tras realizar las pruebas las piezas más consistentes fueron las impresas en SLA ya que a pesar de los menores grosores permitía alcanzar un mejor comportamiento mecánico. Por lo tanto la impresión se realizó mediante tecnología SLA de acuerdo a los parámetros fijados en el Capítulo 6.

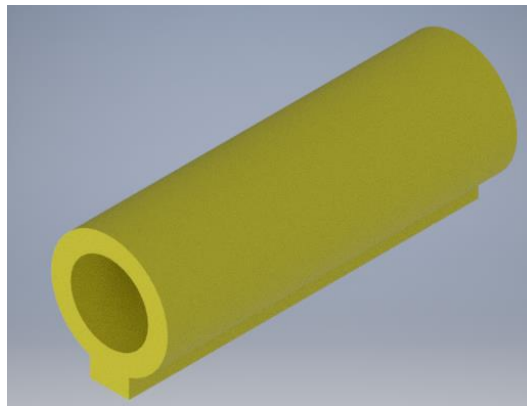
### ***7.3. Pasadores: diseño y fabricación***

Como en los casos anteriores se diseñaron múltiples versiones de pasadores para los distintos tipos de soportes y dedos. Una primera versión consistió en un pasador prismático para los soportes 1.0 y 2.0 así como un pasador cilíndrico para los mismos. Para la versión 2.0 del soporte además se diseñaron embellecedores con el fin de hacer más rígida la estructura y evitar que el pasador cilíndrico se desplazara.



*Imagen 57. Ajuste del embellecedor y pasador para soporte 2.0 .*

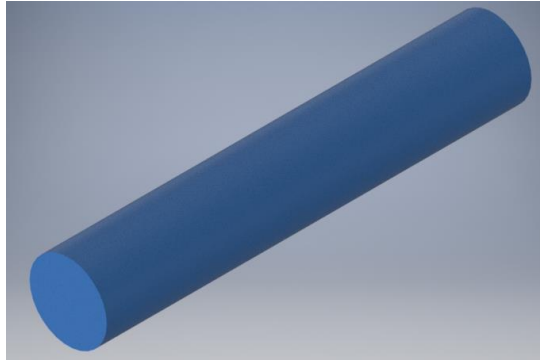
La versión final se compone de dos pasadores. El primero es un pasador cilíndrico que atraviesa el soporte y también el dedo provocando así la unión solidaria de ambas piezas y permitiendo el giro de la una respecto a la otra. El segundo pasador dispone de un chavetero y su longitud corresponde a la anchura máxima del soporte, de este modo fija el engranaje y no interrumpe el giro del dedo respecto al soporte.



*Imagen 58. Pasador con chavetero.*



*Imagen 59. Diseño del pasador con chavetero. Impresión SLA (Clear)*



*Imagen 60. Pasador cilíndrico.*

Al igual que en el resto de piezas, los planos se adjuntan en el Anexo A.

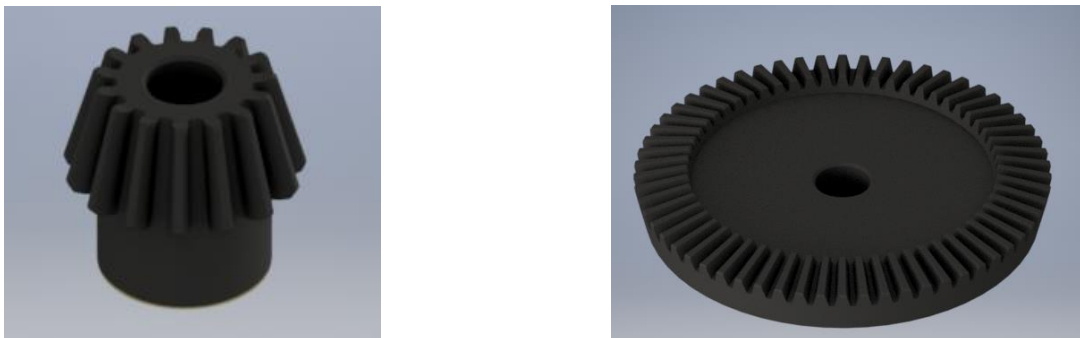
Para su fabricación al necesitar piezas con acabados superficiales muy lisos se optó por SLA de acuerdo a los parámetros fijados en el Capítulo 6. Si se hubiera optado por FDM no habríamos conseguido acabados superficiales de la misma calidad dificultando adaptarnos a las tolerancias de las piezas taladradas.

#### **7.4. Engranajes: diseño y fabricación**

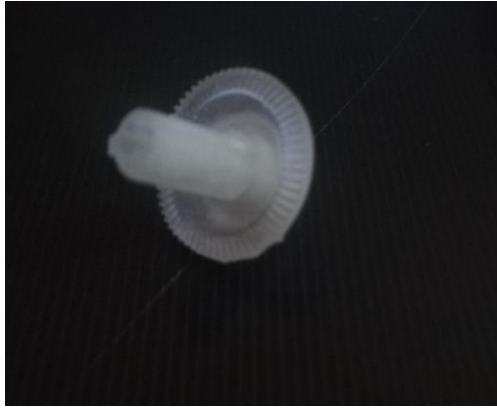
Estas piezas comprenden 4 tipos de diseños diferentes. Por un lado el par de engranajes cónicos 1:3 que irán acoplados en la salida de la reductora del motor. Por otro, el conjunto corona-sin fin que irán alojados en el soporte (corona) y en la palma de la mano (sin fin).

Para alcanzar las versiones finales de estas piezas se realizaron numerosas pruebas sobre todo intentando determinar los tamaños adecuados que permitieran evitar colisiones. En ambos casos las piezas se han reproducido a través de impresión 3D pero se ha optado por diseños comerciales que podrían ser comprados para obtenerlos de forma más sencilla y con mejores acabados.

Para comenzar se exponen los engranajes cónicos, la mayor complejidad de estas piezas son sus pequeños tamaños, lo cual hace complicado reproducir cada detalle. No obstante se ha obtenido un diseño del par de engranajes que se ha adaptado a nuestras necesidades (33). Adaptando los tamaños de taladro al eje de salida del motor y al tamaño del pasador del soporte respectivamente.

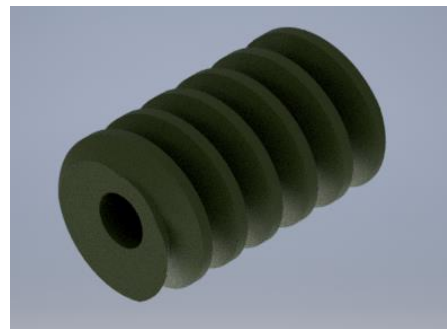


*Imagen 61. Engranajes cónicos 1:3 .*



*Imagen 62. Engranaje cónico fijo ensamblado al pasador. Impresión SLA (Clear)*

Por otro lado y también basándonos en productos comerciales (34) se ha rediseñado el conjunto corona sin fin que permitirá realizar el movimiento de abducción-adducción. En este caso la operativa ha sido similar y se han adaptado los tamaños de los taladros para realizar el ensamblaje correcto con el soporte y el eje del motor.



*Imagen 63. Conjunto corona-sinfin.*



*Imagen 64. Corona. Impresión SLA (Clear)*

Los planos de las piezas quedan reflejados en el Anexo A.

Respecto a la fabricación, como ya se ha mencionado previamente son piezas con detalles muy concretos y que requieren acabados de máxima calidad ya que su efectividad dependen del contacto entre ellas y del engrane preciso entre las piezas. Por ese motivo se ha optado por la impresión mediante tecnología SLA que permita alcanzar el máximo grado de calidad.

## Capítulo 8. Diseño final.

Después de enumerar las diferentes piezas y explicar sus procesos de diseño y fabricación llegamos al último punto en la construcción del dedo. Para ilustrar el proceso de construcción, a continuación se mostrarán los diferentes ensamblajes realizados entre las piezas para que podamos apreciar como los productos descritos anteriormente se comportan en el diseño final.

### 8.1. Ensamblaje motor-dedo

En este caso el ensamblaje es simple y se realiza exclusivamente por acción de la presión que ejerce la carcasa del dedo al introducir el motor. De este modo el motor queda retenido y no se mueve.

### 8.2. Ensamblaje dedo-soporte

Para realizar la unión entre dedo y soporte se usan los diferentes pasadores que se diseñaron.

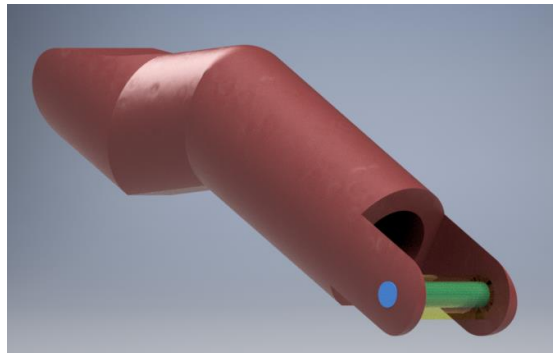


Imagen 65. Ensamblaje dedo-pasadores.

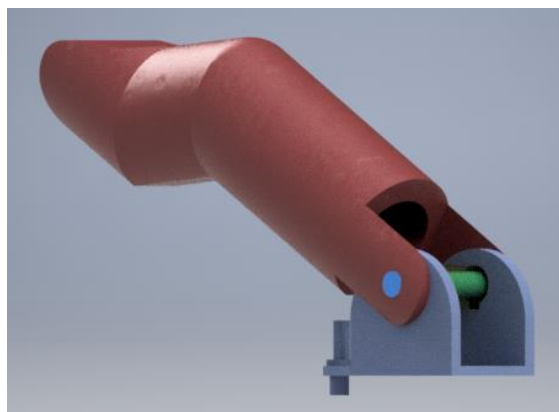
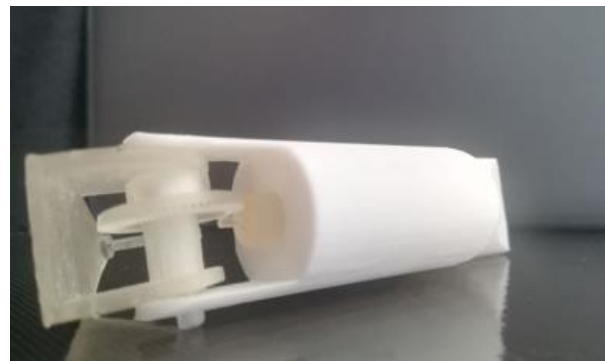


Imagen 66. Ensamblaje dedo-soporte.



*Imagen 67. Ensamblaje pasador con chavetero-soporte 3.0.*

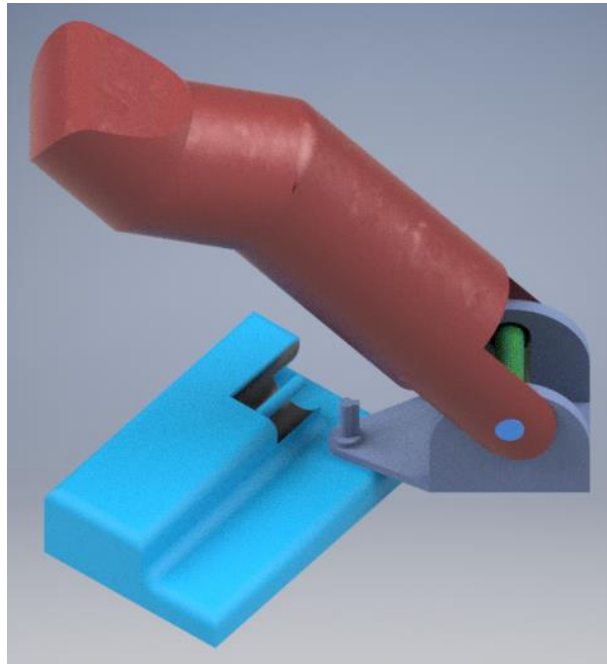


*Imagen 68. Ensamblaje dedo-soporte.*

La unión consiste en un primer pasador con chavetero que se ajusta a la anchura del soporte a través del cual se introduce un pasador cilíndrico que es el encargado de fijar el dedo. Los grados de ajuste entre las piezas serán los que permitirán mayor o menor movilidad, si bien es cierto que no se ha podido conseguir un ajuste fino (habría que realizar más pruebas) la idea es alcanzar un grado en el que tampoco dificulte que el motor pueda realizar el movimiento, es decir que la fuerza que genere el ajuste entre pasador cilíndrico y dedo no sea tan elevada que el par motor no consiga mantener las consideraciones que se fijaron como objetivos. No obstante el sobredimensionamiento en parte del motor (la selección de motor nos permite elevar más peso del fijado como objetivo) permitiría que la fuerza generada por el ajuste no comprometiera los objetivos del movimiento en cuanto a velocidades ni fuerzas.

### **8.3. Ensamblaje soporte-mano**

Para imitar este ensamblaje hemos generado una pieza que simularía la mano, ya que la misma aún no ha sido desarrollada dentro de este proyecto global. El ensamblaje consiste exclusivamente en una unión cilíndrica a través del soporte que permitiría la rotación (movimiento de abducción-adducción del dedo).



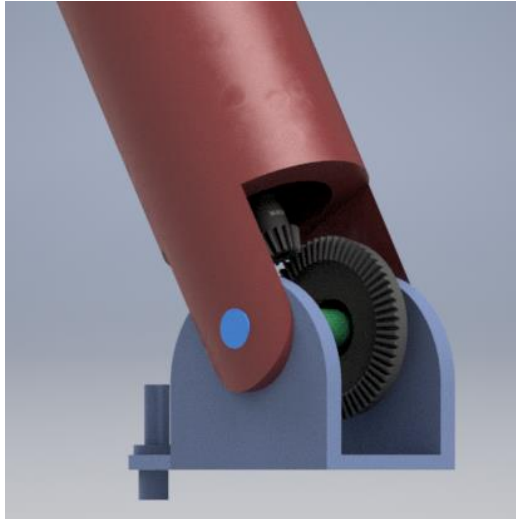
*Imagen 69. Ensamblaje soporte-mano.*

Cabe destacar que esta unión al no haberse desarrollado la mano es un desarrollo incipiente y debería consistir en una unión más robusta pero que si consistiera en este principio de unión cilíndrica única.

#### **8.4. Ensamblaje engranajes flexión-extensión**

Este par de engranajes corresponden con los engranajes cónicos 1:3. En este caso el engranaje motriz va ajustado al eje de salida de la reductora del motor y el engranaje fijo va ajustado al pasador con chavetero alojado en el soporte.





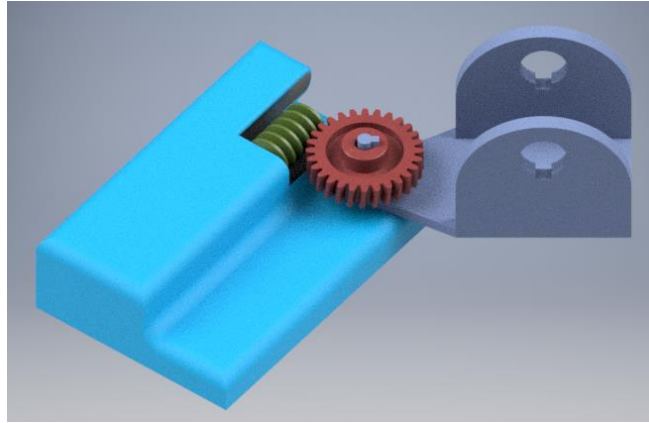
*Imagen 70. Ensamblaje engranajes flexión-extensión.*



*Imagen 71. Ensamblaje engranaje fijo.*

### **8.5. Ensamblaje engranajes abucción-adducción**

En este caso se trata del ensamblaje del conjunto corona-sinfin. Para poder simularlo al igual que el ensamblaje soporte-mano hemos usado la pieza que equivaldría a la mano que aún no se ha desarrollado. En esa pieza se ha dispuesto un eje que sería el símil del eje de la salida de la reductora del motor. Por otra parte la corona va ensamblada de forma fija al soporte a través de un chavetero que impide su rotación y a su vez provoca junto al giro del sinfin el movimiento de abducción-adducción.



*Imagen 72. Ensamblaje engranajes abducción-adducción.*



*Imagen 73. Ensamblaje corona-soporte.*

## Capítulo 9. Líneas futuras.

Sin duda al tratarse de un producto innovador que se ha comenzado sin desarrollos previos, quedan muchos frentes abiertos sobre los que continuar la investigación y el desarrollo. Podríamos distinguir entre horizontes enfocados al corto y al medio plazo.

Por empezar por el corto plazo, destacamos cuatro objetivos que alcanzar:

- El primero de ellos sería la implantación del dedo en una palma de mano sobre la que se insertarían en el resto de dedos, para de este modo observar las incompatibilidades que pudieran surgir.  
Esta funcionalidad sin duda será vital a la hora de desarrollar no solo la funcionalidad completa del dedo pulgar si no la de la mano ya que permitirá el ensamblaje del resto de dedos.
- Combinado con este primer objetivo tendríamos el desarrollo de una unión más robusta entre dedo y mano para el movimiento de abducción-adducción. El desarrollo actual, en parte por no haber una palma de mano desarrollada, es un sistema con muy baja robustez que únicamente se compone de una forma básica de unión. El futuro debe centrarse en conseguir esa unión más robusta que permita garantizar el movimiento de abducción-adducción.
- Otro objetivo inminente sería el de desarrollar el código de control del motor, así como la implantación y el control de los sensores.  
Actualmente es un punto sobre el que ya se trabaja en este proyecto y que se podrá implementar sobre las primeras versiones del dedo. Por lo tanto permitirá también arrojar nuevas vertientes de trabajo futuro cuando se analicen aquellas cuestiones que dificultan el desarrollo del mismo.
- Otro punto a destacar serían las mejoras en términos de producción y diseño. Actualmente se ha alcanzado un primer grado de desarrollo en el que se ha buscado la compatibilidad entre todas las piezas permitiendo los movimientos y alcanzando un diseño robusto de las piezas. No obstante el futuro de este proyecto debe centrarse en conseguir piezas más optimizadas tanto a nivel de diseño como de producción.

Se deberán centrar esfuerzos en aspectos como:

- Los ajustes entre piezas realizando diseño de alta precisión en los que cada pieza se estudie con el máximo detalle.
- Estudiar la resistencia de cada pieza. Actualmente el dedo se ha diseñado de una forma relativamente robusta para que pudiera soportar los esfuerzos. No obstante un estudio de resistencia permitiría corroborar que el dedo soportaría las fuerzas que se han objetivado. Además este tipo de análisis permitiría mejorar el diseño, ahorrando material o distribuyéndolo mejor según el compromiso de cada zona.

En cuanto los objetivos en el medio plazo para poder alcanzar el verdadero cometido de este proyecto que es, como ya se apuntó al comienzo, el desarrollo de un brazo biónico de bajo coste, irían enfocados en el desarrollo del resto de elementos del mismo:

- Por un lado el desarrollo de la articulación de la muñeca que permita realizar los giros de la mano.
- Por otra parte, lo que correspondería con la articulación del codo y por lo tanto el diseño del antebrazo que será donde inicialmente se alojen todos los controladores que requiera tanto la mano como el resto del brazo.

## Capítulo 10. Conclusiones

Para finalizar este trabajo me gustaría aportar las conclusiones que permitan reflejar los aprendizajes a lo largo de todo este proyecto.

En primer lugar, más allá del diseño, la producción o la investigación, me gustaría destacar las sinergias que se han establecido con el resto de compañeros del laboratorio y que han permitido que este proyecto alcance las dimensiones humanas de las que es merecedor, teniendo en cuenta su objetivo de ayudar a simplificar la vida de las personas. No cabe duda que es un proyecto complejo y ambicioso que ha nacido desde cero, pero que nos ha permitido colaborar entre compañeros y aprender a trabajar en equipo, sirviéndonos de lo que los demás habían desarrollado o aprendido y aportando al resto del equipo nuestro conocimiento y trabajo.

En cuanto a los aspectos de investigación, sin duda y como es lógico en un trabajo de este tipo, la aportación es excelsa puesto que al final son múltiples las referencias con las que se trabaja, se debe seleccionar cuidadosamente que artículos aportan valor al trabajo y cuáles no, que webs o referencias resultan fiables, se debe contrastar y al fin y al cabo realizar una investigación exhaustiva en mayor o menor volumen pero con rigor suficiente para asegurar la calidad de las fuentes y los datos extraídos.

En referencia a la etapa de diseño, hablamos de la más visual de todas. El resultado de este TFM queda reflejado a través de los diferentes diseños que se han desarrollado. Sin duda, es una parte básica de la ingeniería industrial y a través de este proyecto me ha aportado conocimientos tanto a la hora de manejar un software de diseño 3D como a la hora de ser riguroso con las medidas y planos entre otros aspectos, para conseguir que cada pieza ajuste y consiga las propiedades que se han fijado como objetivos.

Por último hago mención a la parte de fabricación e impresión 3D, un concepto un tanto manido a estas alturas en las que prácticamente cualquiera pareciera que puede realizar impresiones 3D desde su escritorio en casa. No obstante realizar una fabricación de una pieza mediante tecnologías FDM o SLA, es un ejercicio de la más pura ingeniería basado en el rigor científico y en los datos precisos, pero también en las pruebas y en el análisis de las mismas, no es simplemente la aparente sencillez de dejar que la máquina haga todo el trabajo fijando los parámetros. Teniendo clara esa visión, he podido aprender algunas de las tecnologías más populares en fabricación aditiva: FDM y SLA, sus principios de funcionamiento, los problemas que se originan, los materiales y como trabajar con ellos y sobre todo a dar rigor científico a una tecnología que hoy puede parecer exenta de atributos científicos, pero que sin lugar a duda, es una herramienta muy potente para proyectos como el que hemos desarrollado, donde poder personalizar el producto al máximo adaptándolo a las necesidades exclusivas de cada individuo, puede mejorar exponencialmente la vida de las personas.

## Bibliografía

1. Krausz NE, Rorrer RAL, Weir RFF. Design and Fabrication of a Six Degree-of-Freedom Open Source Hand. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2016;24(5):562–72.
2. VINCENTevolution 3 [Internet]. [cited 2019 Nov 28]. Available from: <https://vincentsystems.de/en/prosthetics/vincent-evolution-3/>
3. Michelangelo prosthetic hand | Ottobock US [Internet]. [cited 2019 Nov 11]. Available from: <https://www.ottobockus.com/prosthetics/upper-limb-prosthetics/solution-overview/michelangelo-prosthetic-hand/>
4. Cipriani C, Controzzi M, Carrozza MC. The SmartHand transradial prosthesis. *J Neuroeng Rehabil.* 2011;8(1).
5. Salley DG. Activity-based cycle counting vs. time/value-based selection. *Annu Int Conf Proc - Am Prod Invent Control Soc.* 1993;556–8.
6. Ceres R, Pons JL, Calderón L, Moreno J. La robótica en la discapacidad. Desarrollo de la prótesis diestra de extremidad inferior manus-hand. *RIAI - Rev Iberoam Autom e Inform Ind.* 2008;5(2):60–8.
7. Losier Y, Clawson A, Wilson A, Scheme E, Englehart K, Kyberd P, et al. AN OVERVIEW OF THE UNB HAND SYSTEM Institute of Biomedical Engineering , University of New Brunswick , Canada Department of Electrical and Computer Engineering , University of New Brunswick , Canada. *Myoelectric Control Up Limb Prosthetics Symp.* 2011;2–5.
8. Liu H, Wu K, Meusel P, Seitz N, Hirzinger G, Jin MH, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT hand II. 2008 *IEEE/RSJ Int Conf Intell Robot Syst IROS.* 2008;3692–7.
9. Johannes MS, Bigelow JD, Burck JM, Harshbarger SD, Kozlowski M V., Van Doren T. An overview of the developmental process for the modular prosthetic limb. *Johns Hopkins APL Tech Dig (Applied Phys Lab.* 2011;30(3):207–16.
10. Belter JT, Dollar AM. Novel differential mechanism enabling two DOF from a single actuator: Application to a prosthetic hand. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* 2013;1–6.
11. García J. El pulgar. *Cir Ortopédica Y Traumatol* [Internet]. 2016 [cited 2020 Feb 18];1–7. Available from: [http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Pulgar\\_Apuntos\\_2010.pdf](http://wzar.unizar.es/acad/cinesio/Documentos/Pulgar_Apuntos_2010.pdf)
12. Jonsson P, Johnson PW, Hagberg M. Accuracy and feasibility of using an electrogoniometer for measuring simple thumb movements. *Ergonomics.* 2007;50(5):647–59.
13. Gutiérrez OB, Almagià A, Lizana P, Olave E. Aspectos biométricos de la mano de individuos chilenos. *Int J Morphol.* 2012 Jun;30(2):599–606.
14. Weir RFF. (PDF) Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design [Internet]. 1st ed. Myer Klutz, editor. Standard Handbook of biomedical Engineering &

Design. New York: McGraw-Hill; 2003 [cited 2019 Nov 28]. 32.1-32.6. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/303819177\\_Standard\\_Handbook\\_of\\_Bio\\_medical\\_Engineering\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/303819177_Standard_Handbook_of_Bio_medical_Engineering_Design)

15. Belter JT, Segil JL, Dollar AM, Weir RF. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. *J Rehabil Res Dev.* 2013;50(5):599–618.
16. Motores DC de maxon | maxon group [Internet]. [cited 2020 Feb 20]. Available from: <https://www.maxongroup.es/maxon/view/content/overview-dc-motoren>
17. FAULHABER S/G [Internet]. [cited 2020 Feb 20]. Available from: <https://www.faulhaber.com/en/products/dc-motors/ Faulhaber-s-g/>
18. Maxon Corporation. Catálogo Maxon Motor RE 8 0.5 W.
19. Stratasys. ¿Qué es la tecnología de impresión 3D FDM? | Stratasys [Internet]. [cited 2020 Apr 4]. Available from: <https://www.stratasys.com/es/fdm-technology>
20. Placone JK, Engler AJ. Recent Advances in Extrusion-Based 3D Printing for Biomedical Applications. *Adv Healthc Mater.* 2018 Apr 25;7(8).
21. Formlabs. High Resolution SLA and SLS 3D Printers for Professionals | Formlabs [Internet]. [cited 2020 Apr 5]. Available from: <https://formlabs.com/>
22. Formlabs. FDM vs. SLA in 2019: Compare the Two Most Popular Types of 3D Printers | Formlabs [Internet]. [cited 2020 Apr 5]. Available from: <https://formlabs.com/eu/blog/fdm-vs-sla-compare-types-of-3d-printers/>
23. Sánchez G, Tutor G, Gallo M. Diseño de un dedo protésico articulado mediante impresión 3D.
24. Trimaker. Tecnología de impresión 3D FDM vs impresión 3D SLA. 2020 [Internet]. [cited 2020 Apr 5]. Available from: <https://elmundo3d.com/fdm-vs-sla/>
25. Store | Formlabs [Internet]. [cited 2020 Apr 6]. Available from: <https://formlabs.com/store/form-2/>
26. Ultimaker BV. How to print with Ultimaker TPU 95A [Internet]. [ultimaker.com.](https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011952740-How-to-print-with-Ultimaker-PLA) 2019 [cited 2020 Apr 7]. Available from: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011952740-How-to-print-with-Ultimaker-PLA>
27. HTA 3D. ¿Cómo imprimir PLA? - Filamento impresora 3D - HTA3D [Internet]. [cited 2020 Apr 7]. Available from: <https://www.hta3d.com/es/blog/como-imprimir-pla-filamento-3d>
28. 3D C. Altura de capa Impresoras 3d [Internet]. [cited 2020 Apr 7]. Available from: <https://createc3d.com/altura-de-capa/>
29. Trimaker. Aspectos de diseño [Internet]. 2016 [cited 2020 Apr 7]. Available from: <https://soporte-trimaker.zendesk.com/hc/es/articles/210295488-Aspectos-de-diseño>
30. Filament 2 print. La importancia del tipo de relleno en impresión 3D [Internet]. [cited 2020 Apr 7]. Available from: [https://filament2print.com/es/blog/71\\_importancia-relleno-impresion-3d.html](https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html)

31. Trimaker. La importancia del relleno en la impresión 3D - Trimaker [Internet]. [cited 2020 Apr 7]. Available from: <https://trimaker.com/el-relleno-en-impresion-3d-porcentaje-entramado-grosor-velocidad/>
32. 3dfils. Todo lo que tienes que saber sobre el filamento PLA para impresión 3D [Internet]. [cited 2020 Apr 7]. Available from: [https://www.3dfils.com/es/blog/21\\_todopla](https://www.3dfils.com/es/blog/21_todopla)
33. KHK - Bevel Gear (or Miter Gear) Selector [Internet]. [cited 2020 Apr 14]. Available from: <https://khkgears2.net/catalog6/SB1-1545>
34. Tipos de engranajes y cómo saber cuál necesito | Blog Mootio [Internet]. [cited 2020 Apr 14]. Available from: <http://www.mootio-components.com/blog/es/tipos-de-engranajes-cual-necesito/>



## *Anexo: Planos*

1. Dedo Maxon Versión 3.0
2. Soporte Versión 3.0
3. Pasador cilíndrico
4. Pasador con chavetero
5. Corona 28 dientes

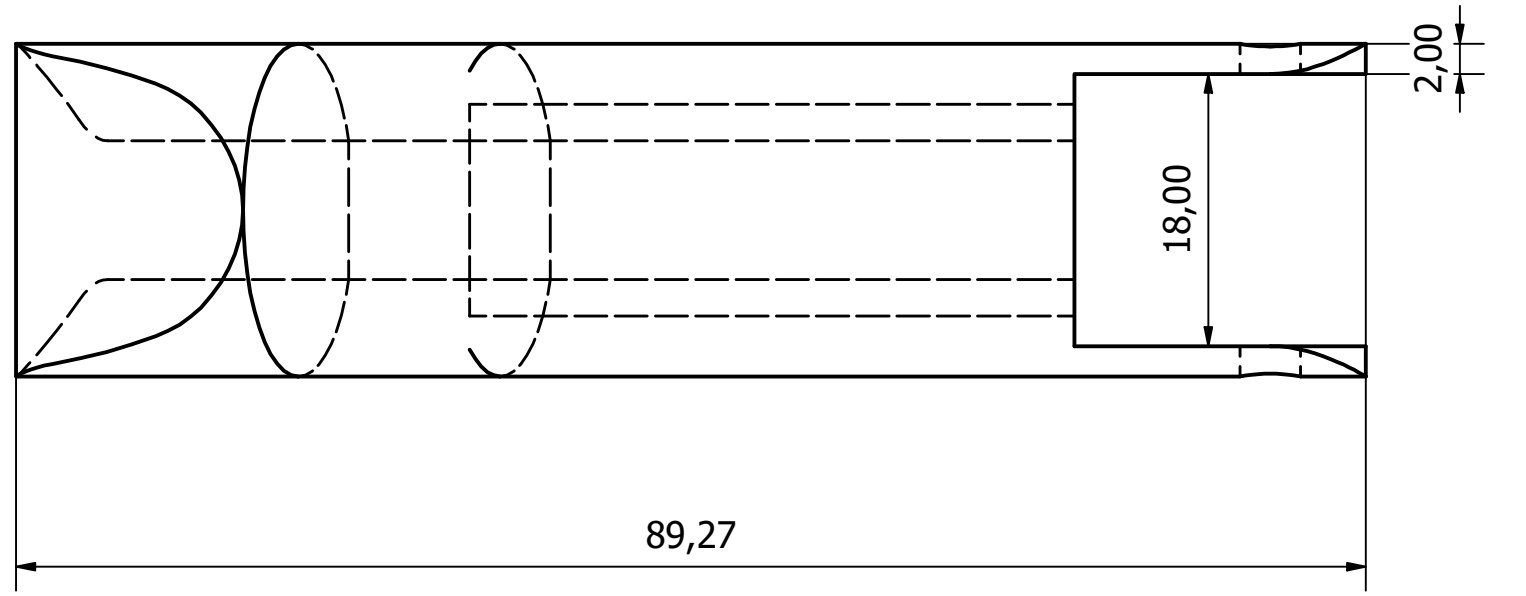
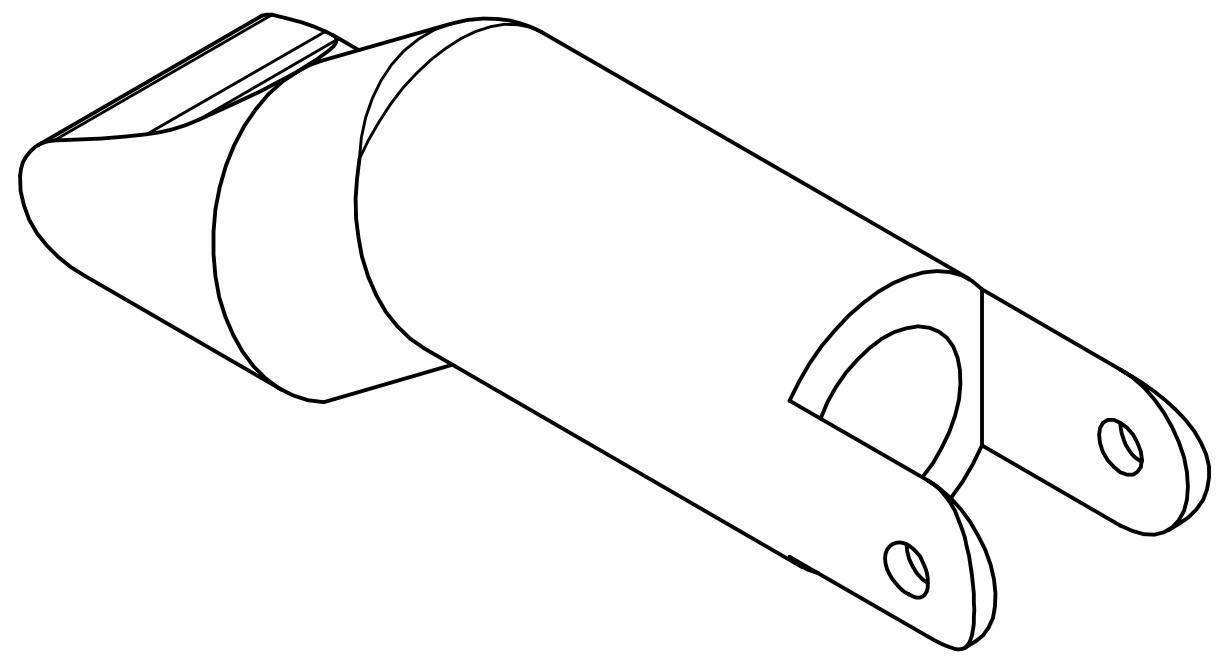
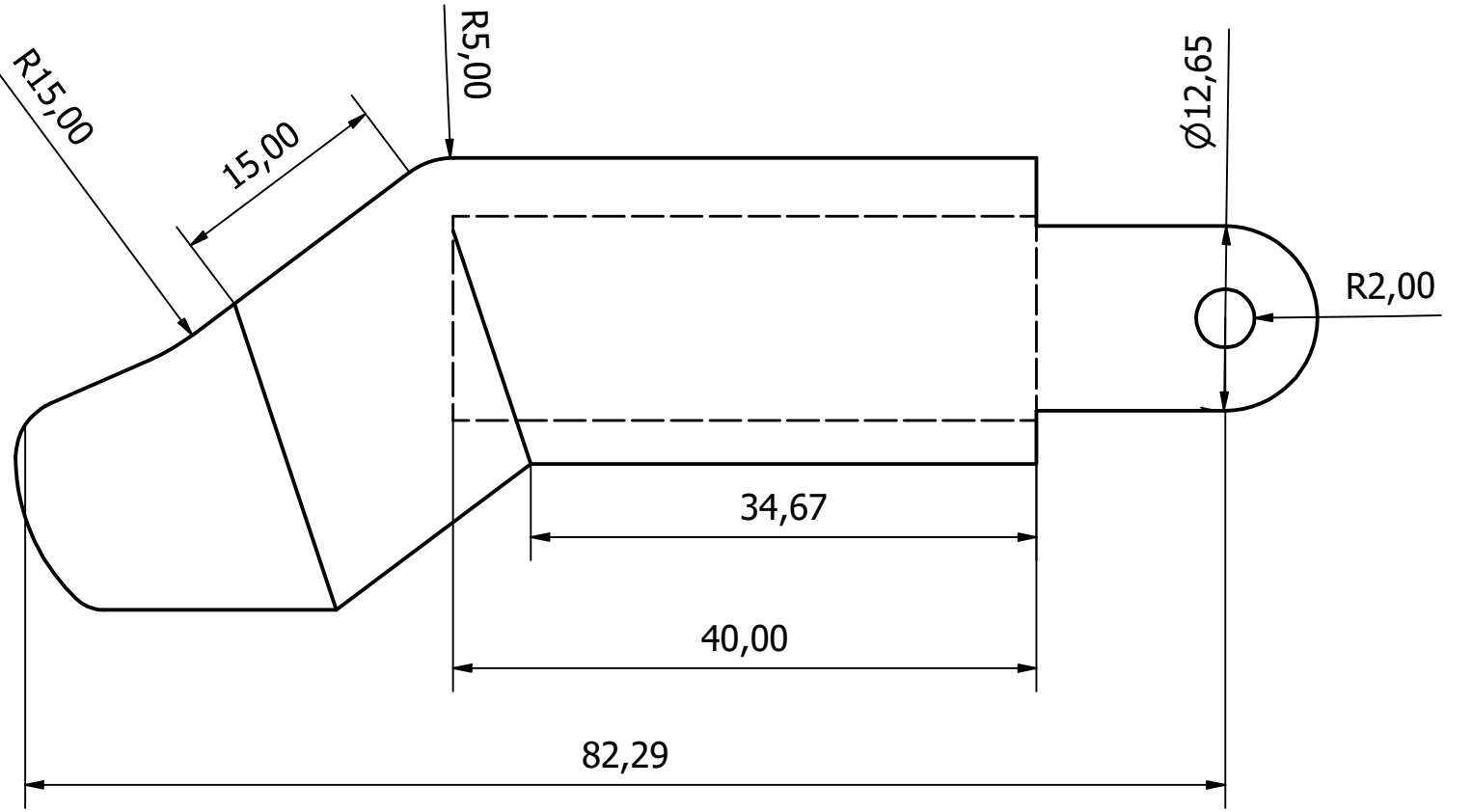
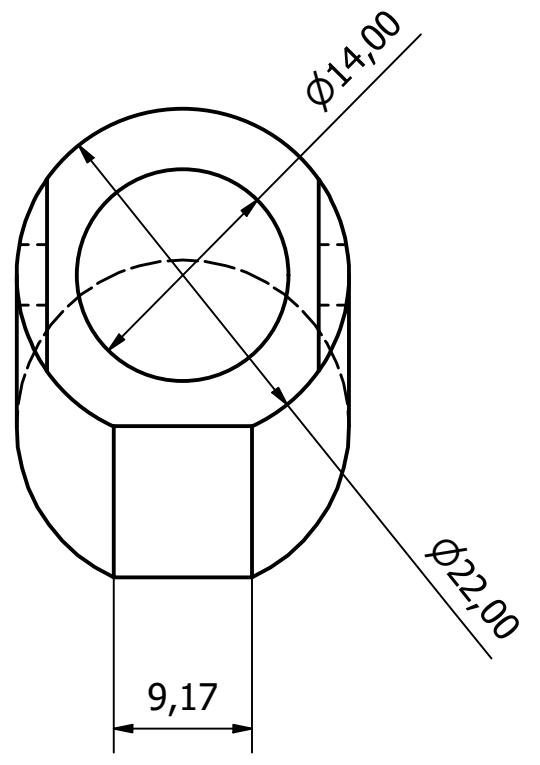
6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

C

B

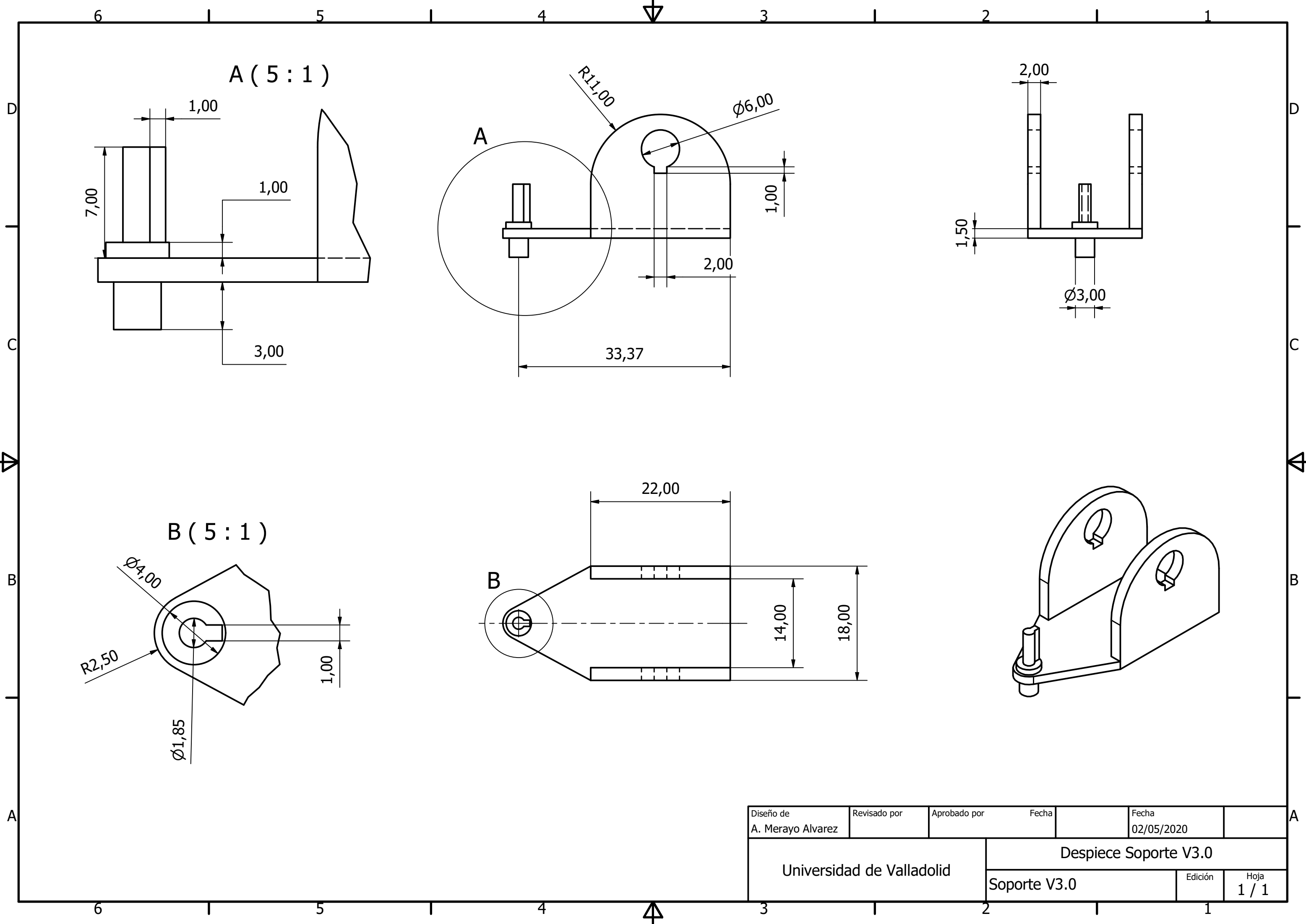
A



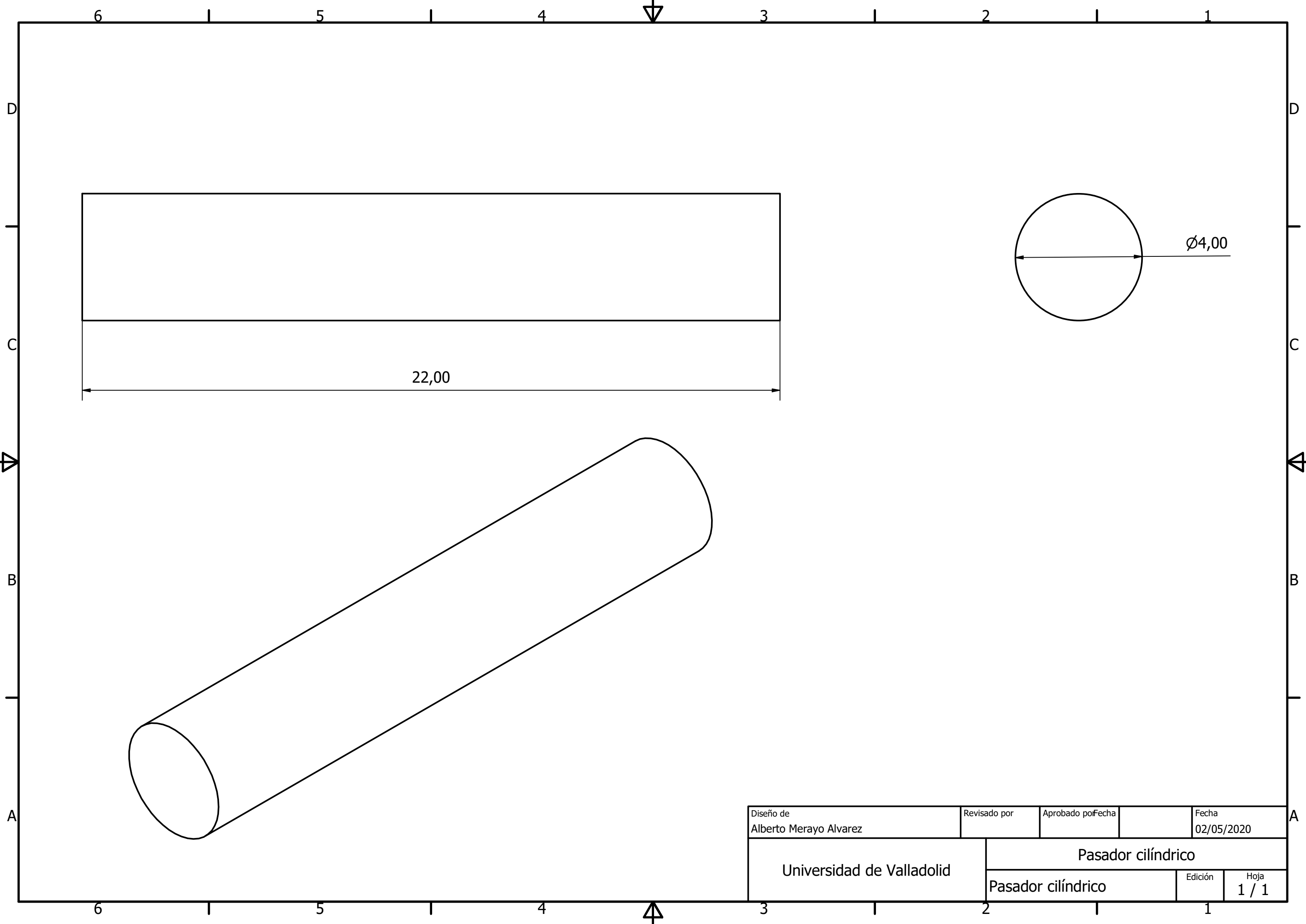
Diseño de A. Merayo Alvarez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 01/05/2020
Universidad de Valladolid			Despiece Dedo V 3.0	
Dedo Maxon A-1			Edición	Hoja 1 / 1

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

A

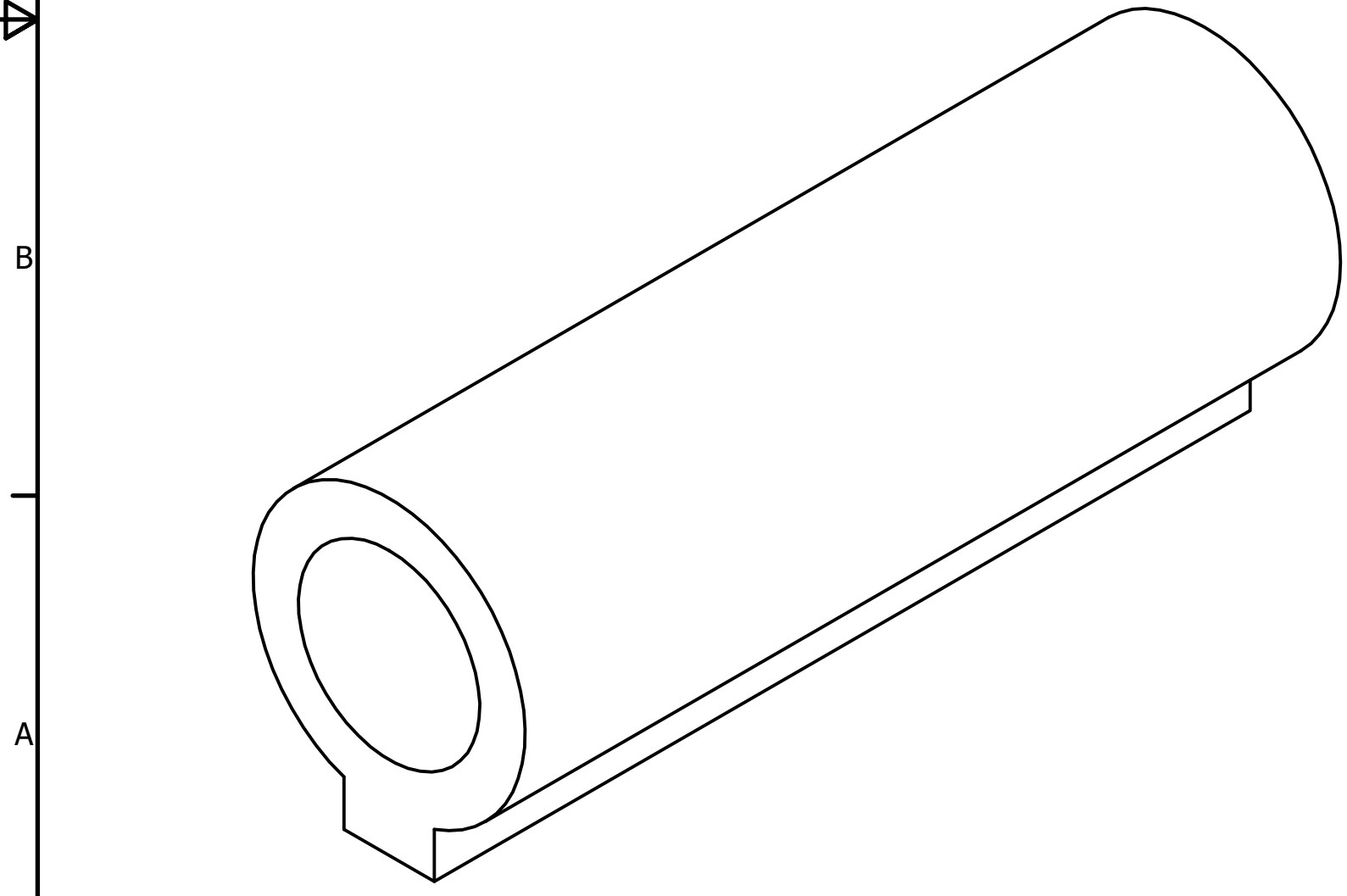
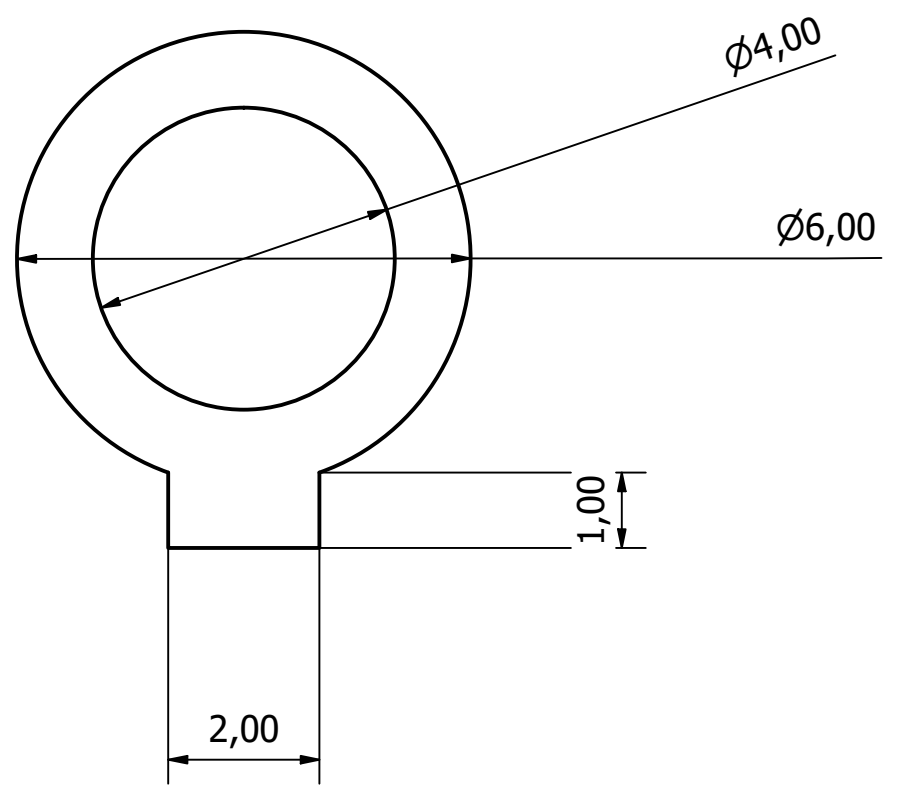
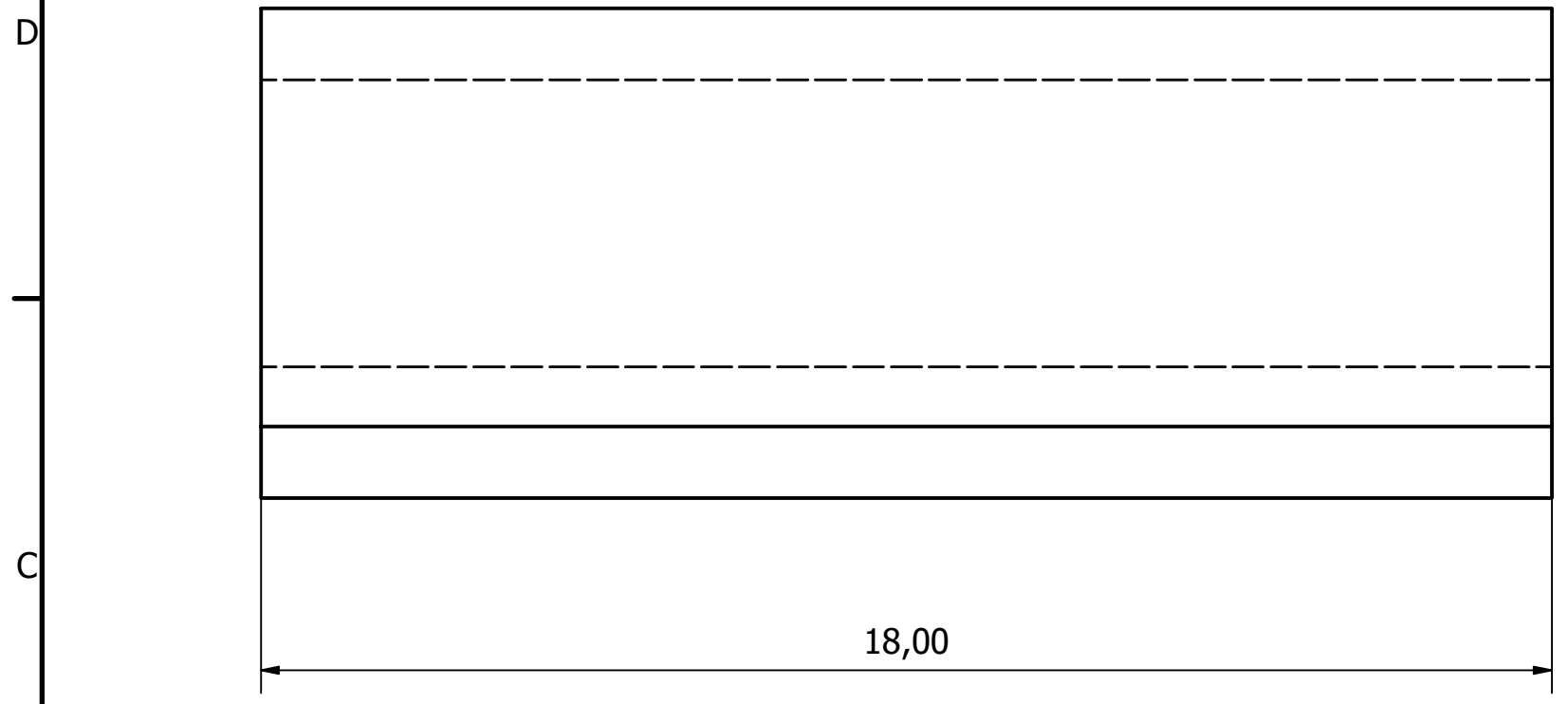


Diseño de A. Merayo Alvarez	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 02/05/2020
Universidad de Valladolid			Despiece Soporte V3.0	
Soporte V3.0			Edición	Hoja 1 / 1



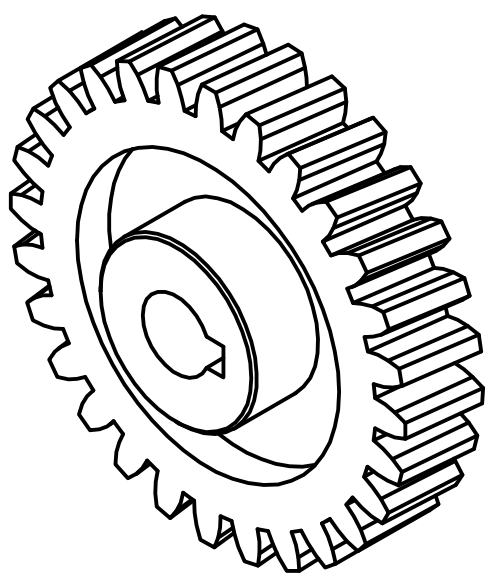
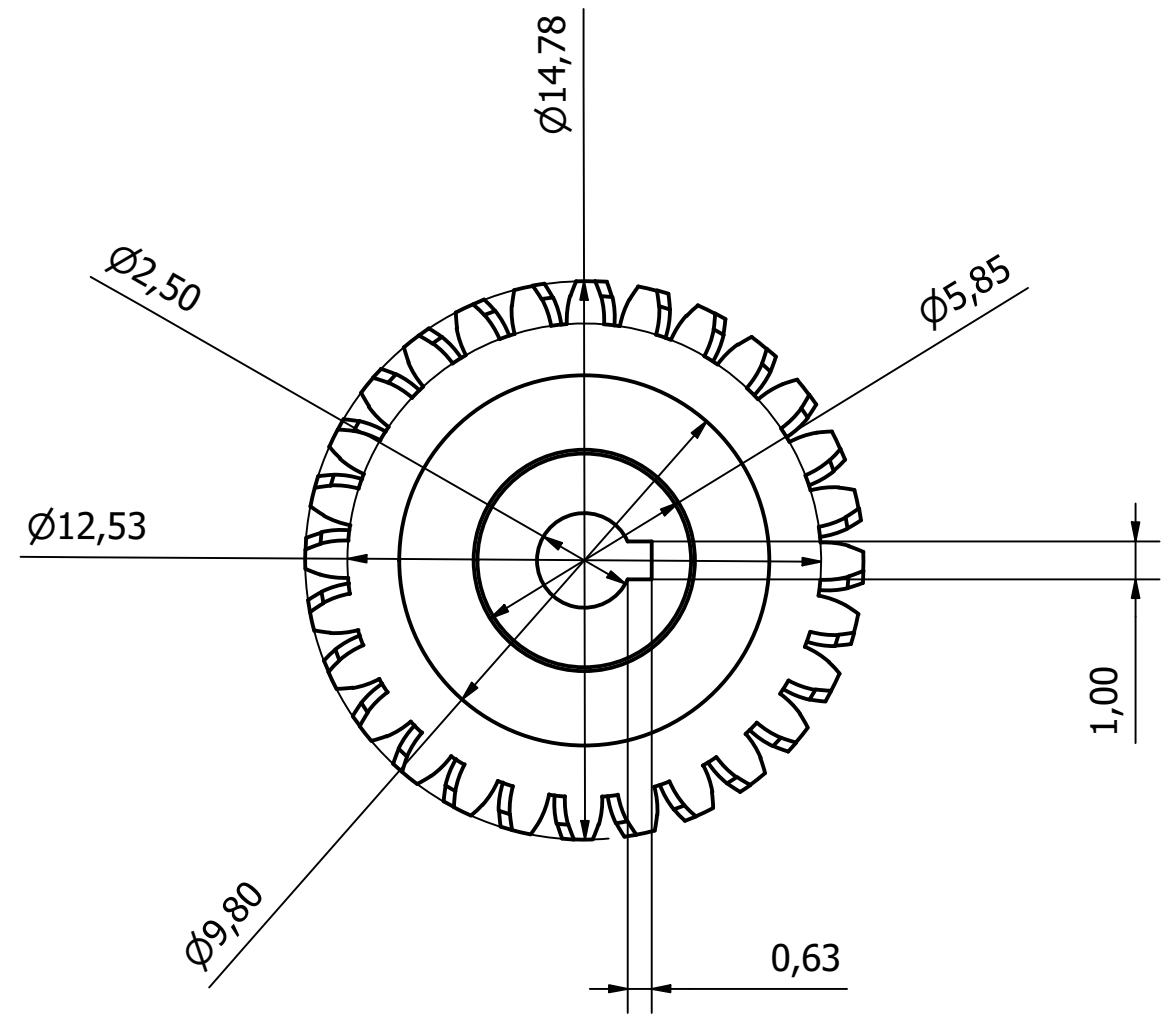
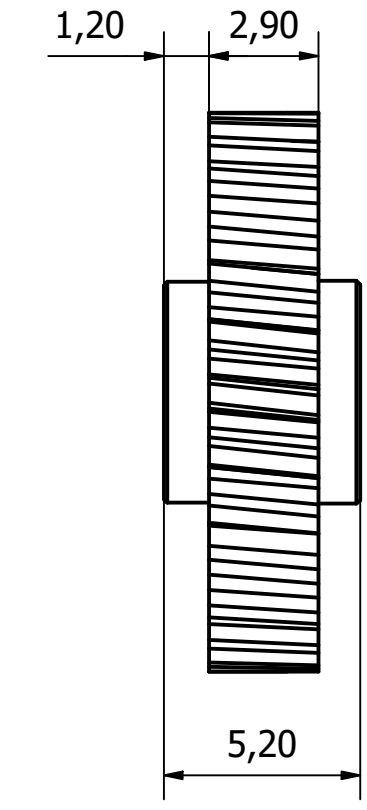
Diseño de Alberto Merayo Alvarez	Revisado por	Aprobado por	Fecha 02/05/2020
Universidad de Valladolid	Pasador cilíndrico		
	Pasador cilíndrico	Edición	Hoja 1 / 1

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1



Diseño de Alberto Merayo Alvarez	Revisado por	Aprobado por	Fecha 02/05/2020
Universidad de Valladolid	Pasador con chavetero		
	Pasador con chavetero	Edición	Hoja 1 / 1

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1



Diseño de Alberto Merayo Alvarez	Revisado por	Aprobado por	Fecha 02/05/2020
Universidad de Valladolid	Corona 28 dientes		
	Corona 28 dientes	Edición	Hoja 1 / 1